



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA TERMOELÉTRICO
PARA REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO**

Vinícius Franzon

Lajeado, junho de 2021

Vinícius Franzon

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA TERMOELÉTRICO PARA REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO

Projeto de monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Lober Hermany.

Lajeado, junho de 2021

Vinícius Franzon

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA TERMOELÉTRICO PARA REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica:

Prof. Dr. Lober Hermany - Orientador
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Me. Carlos Henrique Lagemann
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Profa. Dra. Sônia Elisa Marchi Gonzatti
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Lajeado, junho de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a minha família pelos ensinamentos, apoio, paciência, compreensão e incentivo.

Agradeço ao meu orientador, pelos conhecimentos compartilhados e indicações preciosas.

Agradeço aos colegas da graduação pelo anos de convivência, companheirismo e amizade criada durante esta caminhada, proporcionando experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como profissional.

Agradeço a todos os professores que fizeram parte desta jornada, pelos seus ricos conhecimentos transmitidos além dos conselhos que guiaram meu aprendizado, a minha evolução pessoal e profissional.

“Enquanto nos distraímos, a vida transcorre.”

Sêneca

RESUMO

Com a descoberta dos efeitos termoeletricos, observou-se a geracao ou absorcao de calor reversivel simultaneamente a um gradiente de temperatura e a uma corrente eletrica, onde buscou-se desenvolver materiais semicondutores com maior capacidade de conversao termoeletrica. A simplicidade construtiva do modulo e uma das suas maiores vantagens, entretanto, o sistema apresenta uma eficiencia baixa em relacao aos sistemas convencionais de refrigeracao. Assim sendo, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver um prototipo de um sistema de refrigeracao e aquecimento de um fluido condutor termico, atraves da utilizacao de modulos termoeletricos, baseando-se no efeitos Peltier. O prototipo desenvolvido opera pela configuracao liquido para liquido, utilizando-se de um sistema de condicionador de ar comercial, que teve o sistema de compressor substituido pelo sistema termoeletrico. Os modulos termoeletricos foram testados, analisando seu comportamento termico em relacao a tensao de alimentacao. O funcionamento e comportamento do prototipo foi avaliado a partir de cinco testes, alterando-se apenas os sistemas de bombeamento do fluido e acionamento dos ventiladores. Com os resultados obtidos identificou-se o comportamento termico do sistema. As analises mostraram que o sistema apresenta uma baixa capacidade de refrigeracao e aquecimento.

Palavras-chave:. Efeito Peltier. Efeito termoeletrico. Refrigeracao e aquecimento termoeletrico. Modulos termoeletricos.

ABSTRACT

With the discovery of thermoelectric effects, it was observed the generation or absorption of reversible heat simultaneously to a temperature gradient and an electric current, where it was sought to develop semiconductor materials with greater capacity for thermoelectric conversion. The constructive simplicity of the module is one of its greatest advantages, however, the system presents a low efficiency compared to conventional cooling systems. Therefore, the present work aims to develop a prototype of a system for cooling and heating a thermally conductive fluid, through the use of thermoelectric modules, based on the Peltier effect. The developed prototype operates by the liquid-to-liquid configuration, using a commercial air conditioning system, which had the compressor system replaced by the thermoelectric system. The thermoelectric modules were tested, analyzing their thermal behavior in relation to the supply voltage. The operation and behavior of the prototype was evaluated from five tests, changing only the fluid pumping and the fan drive systems. With the results obtained the thermal behavior of the system was identified. The analyses showed that the system presents a low cooling and heating capacity.

Keywords: Peltier effect. Thermoelectric effect. Thermoelectric heating and cooling. Thermoelectric modules.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Circuito térmico	23
Figura 2 – Mecanismos de transferência de calor	23
Figura 3 – Mecanismos de condução de calor	24
Figura 4 – Linhas de fluxo de calor entre superfícies de contato	25
Figura 5 – Camada-limite do mecanismo de convecção	26
Figura 6 – Propriedades da radiação	27
Figura 7 – Tipos de radiação.....	27
Figura 8 – Representação de um termopar	28
Figura 9 – Diagrama de Temperatura e Entropia para geração elétrica pelo efeito Seebeck	30
Figura 10 – Diagrama de Temperatura e Entropia para refrigeração pelo efeito Peltier	30
Figura 11 – Representação do balanço de energia.....	31
Figura 12 – Gráfico relacionando a Figura de Mérito zT em relação a Temperatura para alguns materiais semicondutores do tipo-p	32
Figura 13 – Gráfico relacionando a Figura de Mérito zT em relação a Temperatura para alguns materiais semicondutores do tipo-n	33
Figura 14 – Representação do sistema de refrigeração termoelétrico e do sistema por ciclo de compressão de gás	34
Figura 15 – Módulo termoelétrico comum com semicondutores do tipo-p e do tipo-n conectados termicamente em paralelo e eletricamente em série.....	35

Figura 16 – Movimentação eletrônica em um metal sem gradiente de temperatura e com gradiente de temperatura	36
Figura 17 – Representação de um par termoelétrico, (a) operando em modo de geração elétrica pelo efeito Seebeck, (b) operando em modo de refrigeração pelo efeito Peltier	37
Figura 18 – Composição do módulo.....	38
Figura 19 – Representação da relação da condutividade elétrica, coeficiente de Seebeck, fator de potência e condutividade térmica, em relação à concentração dos transportadores de carga	39
Figura 20 – Termoelemento semicondutor multisegmentado.....	40
Figura 21 – Máximo COP em relação a um diferencial de temperatura para materiais de diversas qualidades zT	42
Figura 22 – Regimes de refrigeração	42
Figura 23 – Diagrama de resistência térmica	43
Figura 24 – Representação do sistema de troca térmica com utilização de um fluido condutor	44
Figura 25 – Modelo construtivo Ar e Ar	45
Figura 26 – Modelo construtivo Ar e Líquido	45
Figura 27 – Modelo construtivo Direto e Ar	46
Figura 28 – Modelo construtivo Direto e Líquido	46
Figura 29 – Modelo construtivo Líquido e Ar	47
Figura 30 – Modelo construtivo Líquido e Líquido	47
Figura 31 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do protótipo	52
Figura 32 – Fontes de alimentação	55
Figura 33 – Multímetros digitais	55
Figura 34 – Termômetro digital	56
Figura 35 – Proveta de 100ml	56
Figura 36 – Configuração do sistema proposto em modo de refrigeração	58
Figura 37 – Configuração do sistema proposto em modo de aquecimento.....	58
Figura 38 – Características do módulo termoelétrico	59
Figura 39 – Módulo termoelétrico.....	60
Figura 40 – Construção do módulo termoelétrico.....	60
Figura 41 – Superfície de aquecimento do módulo termoelétrico	61

Figura 42 – Superfície de resfriamento do módulo termoeletrico	62
Figura 43 – Características do condicionador de ar utilizado	63
Figura 44 – Unidade externa do sistema.....	63
Figura 45 – Unidade interna do sistema.....	64
Figura 46 – Trocador de calor com aletas de alumínio	64
Figura 47 – Montagem do dos módulos termoeletricos.....	65
Figura 48 – Montagem dos reservatórios de troca térmica	65
Figura 49 – Montagem dos reservatórios de troca térmica	66
Figura 50 – Montagem dos reservatórios de troca térmica	67
Figura 51 – Esquema da alimentação elétrica do protótipo.....	67
Figura 52 – Módulo termoeletrico em simples estágio	68
Figura 53 – Comportamento da temperatura em relação a tensão fornecida para módulo em simples estágio	70
Figura 54 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo em simples estágio.....	70
Figura 55 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo em simples estágio.....	71
Figura 56 – Comportamento da temperatura em relação a tensão fornecida para módulo inferior na configuração de duplo estágio, com o inferior variando a tensão e o superior com tensão fixa	72
Figura 57 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo inferior	73
Figura 58 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo em duplo estágio, com o inferior variando a tensão e o superior com tensão fixa	73
Figura 59 – Fixação do módulo termoeletrico para análise preliminar	74
Figura 60 – Comportamento da temperatura em relação a tensão fornecida para módulo superior na configuração de duplo estágio, com o inferior fixo e o superior variando a tensão.....	75
Figura 61 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo superior	76
Figura 62 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo em duplo estágio, com o inferior com tensão fixa e o superior variando a tensão	76
Figura 63 – Esquema elétrico de alimentação dos módulos	77
Figura 64 – Comportamento térmico do primeiro teste	80

Figura 65 – Comportamento térmico do segundo teste	81
Figura 66 – Comportamento térmico do terceiro teste	82
Figura 67 – Comportamento térmico do quarto teste	83
Figura 68 – Comportamento térmico do quinto teste	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo do sistema de refrigeração por ciclo de compressão de gás com o sistema de modulo termoelétrico	34
Tabela 2 – Propriedades Termofísicas a 300 Kelvin dos materiais selecionados	48
Tabela 3 – Resultados da análise de um módulo em simples estágio	69
Tabela 4 – Resultados da análise do módulo inferior na configuração de duplo estágio com superior fixo e inferior variando	72
Tabela 5 – Resultados da análise do módulo superior na configuração de duplo estágio com superior variando e inferior fixo	74
Tabela 6 – Medição da vazão do sistema da Bomba 1	78
Tabela 7 – Medição da vazão do sistema da Bomba 2	78
Tabela 8 – Resultados da análise do sistema com as duas bombas ligadas e os dois ventiladores acionados	79
Tabela 9 – Resultados da análise do sistema com as duas bombas ligadas e os dois ventiladores desligados	80
Tabela 10 – Resultados da análise do sistema com apenas a bomba e o ventilador do sistema de dissipação de calor ligados	81
Tabela 11 – Resultados da análise do sistema com apenas a bomba do sistema de dissipação de calor ligados	82
Tabela 12 – Resultados da análise do sistema de aquecimento com as duas bombas ligadas e os dois ventiladores acionados	83
Tabela 13 – COP do sistema termoelétrico	84
Tabela 14 – COP do protótipo	85

LISTA DE ABREVIATURAS

α_{AB}	Coeficiente de Seebeck (Volts/Kelvin)
V	Tensão elétrica (Volts)
ΔT	Diferença de temperatura entre as junções (Kelvin)
π_{AB}	Coeficiente de Peltier (Volts)
q	Taxa de aquecimento ou resfriamento da junção (Watts)
I	Corrente elétrica (Ampere)
zT	Figura de Mérito
α	Coeficiente de Seebeck (Volts/Kelvin)
ρ	Resistividade elétrica (Ohms.metro)
k	Condutividade térmica (Watts/(metro.Kelvin))
T	Temperatura (Kelvin)
COP_{Carnot}	Coeficiente de Performance Ideal
T_Q	Temperatura da fonte quente (Kelvin)
T_F	Temperatura da fonte fria (Kelvin)
COP	Coeficiente de Performance
$\dot{m}$	Vazão mássica (kg/segundos);
C_p	Calor específico a pressão constante (J/kg.Kelvin)
T_E	Temperatura de entrada (Kelvin)
T_S	Temperatura de saída (Kelvin)
V	Tensão elétrica (Volts)
I	Corrente elétrica (Ampere)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS.....	13
SUMÁRIO	14
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Tema.....	18
1.2 Delimitação do tema	18
1.3 Problema de pesquisa	18
1.4 Hipótese	19
1.5 Justificativa.....	19
1.6 Objetivos	20
1.7 Objetivos específicos	20
1.8 Estrutura do trabalho	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 Mecanismos de transferência de calor	22
2.1.1 Condução.....	23
2.1.2 Convecção	25
2.1.3 Radiação	26
2.2 Termoeletricidade	27
2.2.1 Efeito Seebeck.....	28
2.2.2 Efeito Peltier	29
2.2.3 Efeito Thomson	29

2.2.4	Figura de Mérito zT	31
2.3	Módulos termoelétricos	33
2.3.1	Características e funcionamento dos módulos termoelétricos	35
2.3.2	Composição dos módulos	37
2.3.3	Semicondutores	39
2.3.4	Desempenho	40
2.4	Sistema de transferência de calor	42
2.5	Modelos construtivos	44
2.5.1	Ar e Ar	44
2.5.2	Ar e Líquido	45
2.5.3	Direto e Ar	45
2.5.4	Direto e Líquido	46
2.5.5	Líquido e Ar	46
2.5.6	Líquido e Líquido	47
2.6	Propriedade térmica dos materiais	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	Definição da pesquisa	50
3.1.1	Quanto aos seus objetivos	50
3.1.2	Quanto a natureza da abordagem	51
3.1.3	Quanto aos procedimentos técnicos	51
3.2	Desenvolvimento do sistema proposto	51
3.2.1	Análise do modelo construtivo	52
3.2.2	Construção do protótipo	52
3.2.3	Análise da configuração dos módulos	53
3.2.4	Testes e coleta de dados	53
3.2.5	Análise dos resultados	54
3.3	Equipamentos utilizados	54
4	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	57
4.1	Análise do modelo construtivo	57
4.2	Construção do protótipo	62
4.3	Análise da configuração dos módulos	68
4.4	Testes e coleta de dados	77
4.4.1	Medição da vazão do sistema	77
4.4.2	Análise do sistema	78
4.4.3	Cálculo do COP	84
4.4.4	Análise dos resultados	85
5	CONCLUSÃO	87
6	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento acerca dos efeitos termoelétricos deu origem em 1821, quando o físico alemão Thomas J. Seebeck realizou a descoberta do primeiro efeito termoelétrico, que demonstrou o surgimento de uma força eletromotriz produzida pelo aquecimento na junção de dois materiais condutores elétricos diferentes (GOLDSMID, 2010).

Em 1834 o francês Jean C. A. Peltier realizou a segunda descoberta do efeito termoelétrico, onde observou que a passagem de uma corrente elétrica na junção de dois materiais condutores e diferentes entre si, ocorria o surgimento de uma pequena geração ou absorção de calor, dependendo do sentido da corrente (IOFFE, 1957).

William Thomsom (Lord Kelvin) aplicou em 1855 a teoria termodinâmica para os efeitos Seebeck e Peltier, descobrindo e estabelecendo a relação que descrevem ambos efeitos, o que é considerado o terceiro efeito termoelétrico, que consiste em uma geração ou absorção de calor reversível simultaneamente a um gradiente de temperatura e a uma corrente elétrica (GOLDSMID, 2010; IOFFE, 1957).

Em 1911, Edmund Altenkirch analisou a conversão de energia e demonstrou que a performance termoelétrica dos termopares pode ser otimizada utilizando materiais que possuem alta condutividade elétrica e baixa condutividade térmica (GOLDSMID, 2010).

Após a descoberta de materiais semicondutores, Abram Fedorovich Ioffe promoveu seu uso e desenvolveu em 1949 o conceito de Figura de Mérito ZT, que

descreve o desempenho dos materiais semicondutores para a aplicação termoeétrica (NORTHWESTERN, 2020).

Desde a descoberta e utilização de materiais semicondutores em aplicações termelétricas até o final do século XX, houve pouco avanço em seu desenvolvimento. Com o significativo desenvolvimento de materiais, estão surgindo novas ideias e aplicações, mesmo que em escalas laboratoriais (GOLDSMID, 2010).

A confiabilidade e durabilidade do sistema termoeétrico pode ser averiguada através da observação a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), que utiliza em suas missões de exploração espacial, o sistema de módulos termoeétricos na forma de Geradores Termoeétricos de Radioisótopos, onde a energia é fornecida pela decomposição natural de plutônio-238 que gera calor e utiliza o frio do espaço para os pares termoeétricos gerarem eletricidade, devido a impossibilidade da utilização da luz solar para a sua alimentação, ocasionado pela baixa incidência solar.

Devido ao sistema do gerador não possuir partes móveis, o que ocasiona maior confiabilidade e simplicidade do sistema, as fontes de energia da Voyager I e Voyager II estão funcionando a mais de 43 anos, permitindo que ela siga operando e realizando descobertas científicas (ANDO JUNIOR, 2014; NORTHWESTERN, 2020; NASA, 2020).

Atualmente estes materiais já são comercializados prontos para aplicabilidade, em formato de placa ou módulo plano, nas formas geométricas quadradas, retangulares e circulares, podendo ser de estágio simples ou multiestágios. O semicondutor utilizado varia de acordo com a aplicabilidade dos módulos e a temperatura de operação, interferindo diretamente na geração de eletricidade ou refrigeração e aquecimento, bem como em seu valor comercial.

A produção em escala destes materiais permite com que eles se tornem competitivos em relação aos equipamentos e tecnologias presente até o momento, tornando-se uma alternativa ou até possuindo vantagem em relação a sua aplicação.

Uma das aplicações que mais desenvolve-se e apresenta interesse comercial é na área de refrigeração, onde já são produzidos alguns equipamentos comerciais como refrigeradores de água e adegas, sendo uma alternativa não poluente em

relação aos sistemas convencionais que atuam através da compressão de gás refrigerante.

1.1 Tema

Analisar a utilização de módulos termoelétricos sólidos em um sistema de refrigeração e aquecimento de um fluido condutor térmico, verificando a possibilidade de aplicação para um equipamento de condicionamento de ar termoelétrico.

1.2 Delimitação do tema

O presente trabalho delimita-se apenas na construção do protótipo e na análise de resultado dos testes práticos do sistema proposto, sendo analisado a configuração de utilização de módulos, em simples estágio e duplo estágio, com a variação da tensão de alimentação dos módulos, sem alterar as demais características do sistema construtivo, e a análise da capacidade de aquecimento e resfriamento do fluido condutor, com a tensão de alimentação dos módulos fixa, variando-se algumas características de funcionamento do sistema.

O dimensionamento dos trocadores de calor, bem como as perdas térmicas do sistema, os mecanismos de transferência de calor e a análise dos semicondutores dos módulos e seus efeitos termoelétricos não serão abordados neste trabalho.

1.3 Problema de pesquisa

O sistema termoelétrico do protótipo possui capacidade de refrigeração e aquecimento suficiente para o desenvolvimento de um equipamento comercial?

1.4 Hipótese

A aplicação dos módulos termoeletricos para o desenvolvimento de um sistema de refrigeração e aquecimento de um fluido condutor, pode apresentar os seguintes resultados:

1. Possui capacidade de operar no modo de refrigeração e/ou aquecimento com resultados expressivos;
2. Não possui capacidade de operar no modo de refrigeração e/ou aquecimento com resultados expressivos.

1.5 Justificativa

O interesse de estudo deste problema de pesquisa surgiu da crescente demanda por sistemas de refrigeração e aquecimento, que são amplamente utilizados, tanto para aplicações residenciais, como para indústrias, aeroespaciais, médicas e militares.

Devido às questões de aplicação da tecnologia e preocupações ambientais, surge a necessidade de buscar por sistemas alternativos de refrigeração, que não operam por ciclos de compressão e utilizem gases refrigerantes nocivos ao meio ambiente, como CFC, HCFC e HFC.

Além do mais, os sistemas de refrigeração por compressão de gases utilizam vários componentes móveis e requerem uma alta especialização de mão de obra para instalação ou realocação, pois se não forem respeitados os procedimentos adequados, o equipamento pode perder eficiência ou até mesmo ser danificado, trazendo grandes prejuízos.

As vantagens em utilizar módulos termoeletricos se dá pela ausência de gases refrigerantes, maior controle e precisão de temperatura, aumento da durabilidade, não possuem partes móveis e conseqüentemente vibrações mecânicas, totalmente silencioso, capacidade de refrigerar e aquecer ou gerar eletricidade, funcionam em qualquer orientação inclusive em ambientes sem gravidade, pouca necessidade de

manutenção e tamanho reduzido se comparado a sistemas de refrigeração convencionais.

Quanto às suas desvantagens, estão relacionadas à baixa eficiência, custo elevado dos componentes, temperaturas suportadas pelos elementos e alguns cuidados com umidade e oxidação.

Desta maneira torna-se interessante o desenvolvimento de sistemas de troca térmica que não trabalhe com gases refrigerante, que possua quantidade de partes móveis reduzidas, reduzindo o impacto ao meio ambiente, facilitando a instalação e manutenção, não exigindo mão de obra extremamente qualificada.

1.6 Objetivos

Desenvolver um protótipo de um sistema de refrigeração e aquecimento de um fluido condutor térmico através da utilização de módulos termoeletrônicos.

1.7 Objetivos específicos

São designados como objetivos específicos:

1. Apresentar e fundamentar a teoria sobre o efeito termoeletrônico;
2. Desenvolver um protótipo com a utilização de módulos termoeletrônicos;
3. Analisar através de medições de temperatura a configuração de montagem, simples e duplo estágio, e alimentação elétrica dos módulos termoeletrônicos, variando-se a tensão de alimentação;
4. Analisar através de medições de temperatura a configuração definida e o comportamento do sistema, variando-se a utilização ou não dos sistemas de ventiladores e bombas elétricas.
5. Analisar através de medições de temperatura, corrente elétrica e tensão elétrica, o desempenho do sistema proposto.

1.8 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada de forma introdutória a história da termoeletricidade e a utilização de módulos termoelétricos, integrando também o tema em estudo, as delimitações do tema, o problema de pesquisa, hipótese, justificativas e objetivos do trabalho.

O segundo capítulo compreende a revisão de literatura sobre os efeitos térmicos e termoelétricos bem como o funcionamento dos módulos termoelétricos.

Durante o terceiro capítulo é apresentado os procedimentos metodológicos para o desenvolvimento da pesquisa.

No quarto capítulo incide na apresentação do desenvolvimento construtivo do protótipo, os resultados obtidos com os testes e as análises dos resultados.

O quinto capítulo contempla as considerações finais e a conclusão do trabalho.

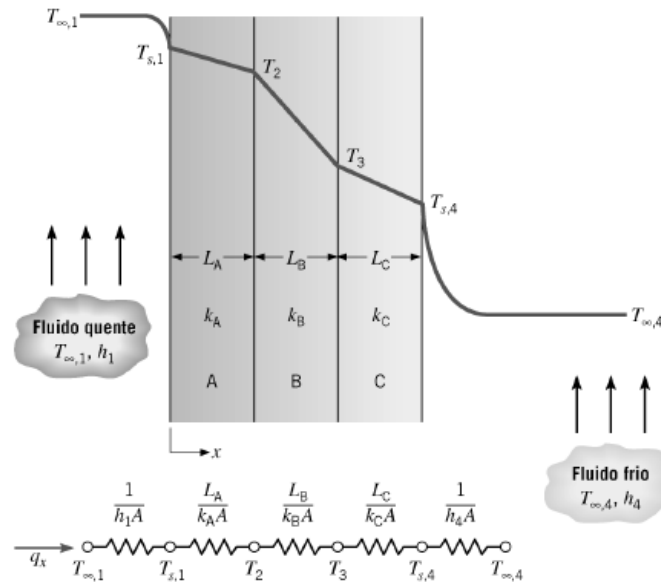
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos relacionados ao funcionamento do módulo termoelétrico, desde os mecanismos de transferência térmica, os efeitos termoelétricos, bem como o princípio de operação e as características construtivas e de aplicação do módulo.

2.1 Mecanismos de transferência de calor

Segundo Çengel (2012) e Incropera et al. (2011) o calor é uma forma de energia que pode ser transferida de um meio a outro, através da existência de um diferencial térmico, ocorrendo no sentido do mais energético para o menos energético. Características específicas do meio tem papel fundamental na transferência de calor, desta forma, pode-se relacionar a dificuldade da transferência de calor no meio como uma resistência térmica.

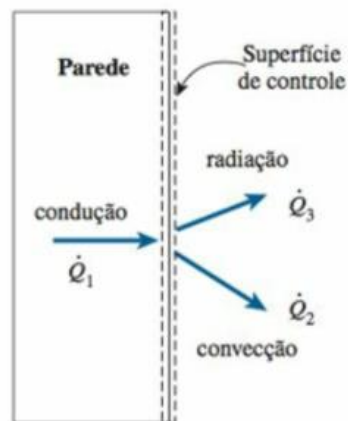
Figura 1 – Circuito térmico



Fonte: Incropera et al. (2011).

Os mecanismos de transferência de calor alteram-se ao se locomover de um meio para o outro, a condução de calor ocorre ao longo de um meio até a sua superfície, onde ocorrerá a convecção do calor entre a superfície em relação a um fluido em movimento, e a radiação da superfície para um ambiente vizinho (ÇENGEL, 2012; INCROPERA et al., 2011).

Figura 2 – Mecanismos de transferência de calor



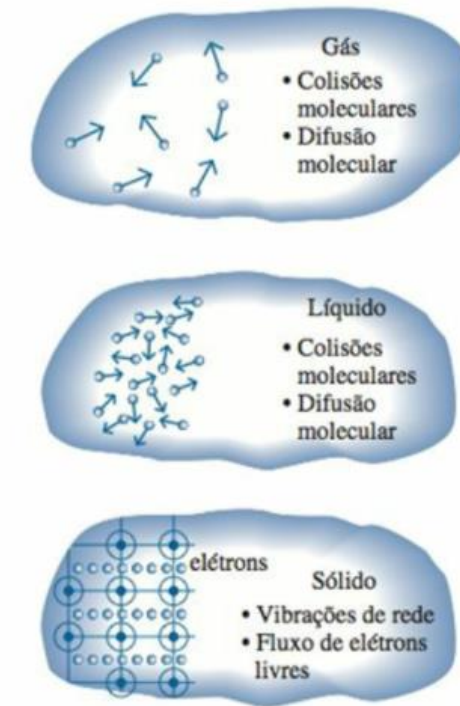
Fonte: Çengel (2012).

2.1.1 Condução

Conforme Çengel (2012), Incropera et al. (2011) e Welty et al. (2017) o mecanismo da condução de calor ocorre na presença de um gradiente térmico,

através da transferência de energia de um meio entre as suas partículas mais energéticas para as partículas menos energéticas, devido à suas interações entre si. Em materiais líquidos e gasosos ocorre através das colisões e difusões moleculares, e em materiais sólidos devido a atividade atômica proveniente das ondas de vibrações nos retículos e de translação de elétrons livres.

Figura 3 – Mecanismos de condução de calor



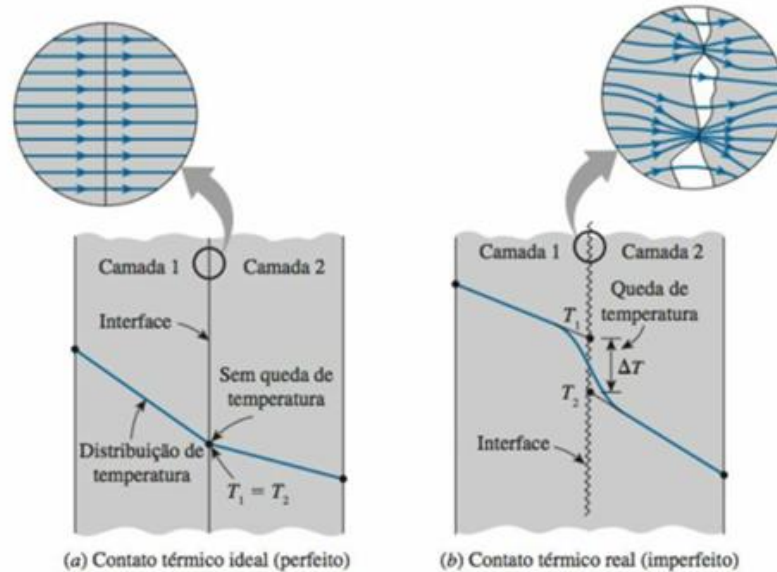
Fonte: Çengel (2012).

A condutividade térmica é a capacidade de condução de calor pelos materiais, sendo a dos materiais sólidos normalmente mais elevada do que a dos líquidos, que, por sua vez, é maior que a dos gases, devido ao seu espaçamento intermolecular (INCROPERA et al., 2011).

Observa-se uma relação simples entre a condutividade térmica e elétrica, onde materiais que possuem uma condutividade térmica elevada normalmente são bons condutores de elétricos e vice-versa (WELTY et al., 2017).

Em sistemas compostos por mais de um elemento sólido, possuem em sua interface de contato entre si, uma queda na condução térmica causada pela resistência térmica de contato. A resistência térmica de contato é causada pela rugosidade superficial do sólido, reduzindo a área de contato entre os elementos sólidos e consequentemente a condução de calor (INCROPERA et al., 2011).

Figura 4 – Linhas de fluxo de calor entre superfícies de contato



Fonte: Çengel (2012).

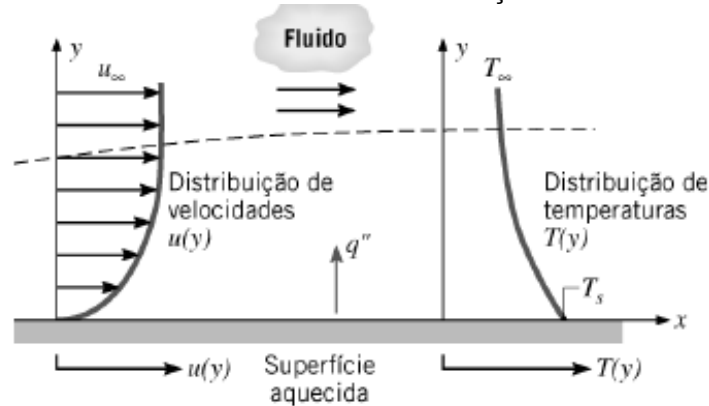
2.1.2 Convecção

O mecanismo de transferência de calor por convecção é composto por dois modos, a transferência de energia proveniente da difusão molecular e a transferência proveniente pelo movimento global do fluido em relação a uma determinada superfície de contato (INCROPERA et al., 2011).

A convecção pode ser classificada de acordo com a força motriz que causa o escoamento de fluido, podendo ocorrer através da convecção natural, onde o fluido movimenta-se devido a variação de densidade e do empuxo, causados pela transferência térmica, ou pode ocorrer por convecção forçada, onde a movimentação do fluido é proveniente de algum agente externo, como bombas e ventiladores (WELTY et al., 2017).

A rugosidade da superfície influencia no mecanismo de convecção, criando uma região onde a velocidade do fluido varia desde a sua velocidade associada ao escoamento a velocidade zero na região em contato com a superfície, sendo conhecida como camada-limite hidrodinâmica. Devido a este efeito, forma-se uma camada-limite térmica (INCROPERA et al., 2011).

Figura 5 – Camada-limite do mecanismo de convecção



Fonte: Incropera et al. (2011).

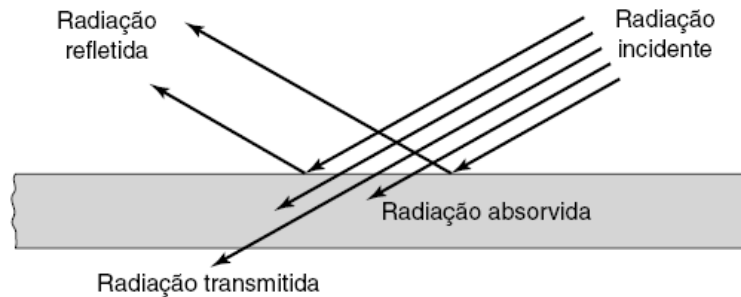
O mecanismo de convecção é dependente das propriedades do fluido como viscosidade dinâmica, condutividade térmica, densidade e calor específico, de propriedades de escoamento como a velocidade e tipo de escoamento (laminar ou turbulento) e de propriedades de superfície como geometria e rugosidade superficial (ÇENGEL, 2012).

2.1.3 Radiação

O mecanismo de radiação térmica é a emissão de energia proveniente da matéria, quando existe um diferencial de temperatura, ocorrendo em sólidos, líquidos ou gases. A emissão de energia é proveniente da mudança nas configurações eletrônicas dos átomos que constituem a matéria, sendo transportada por ondas eletromagnéticas (fótons), sem a necessidade da existência de um meio material para que isso ocorra, sendo inclusive mais eficiente no vácuo (ÇENGEL, 2012; INCROPERA et al., 2011).

As superfícies dos materiais podem emitir radiação e/ou absorver radiação, dependendo da sua temperatura, composição do material da superfície e acabamento (INCROPERA et al., 2011; WELTY et al., 2017).

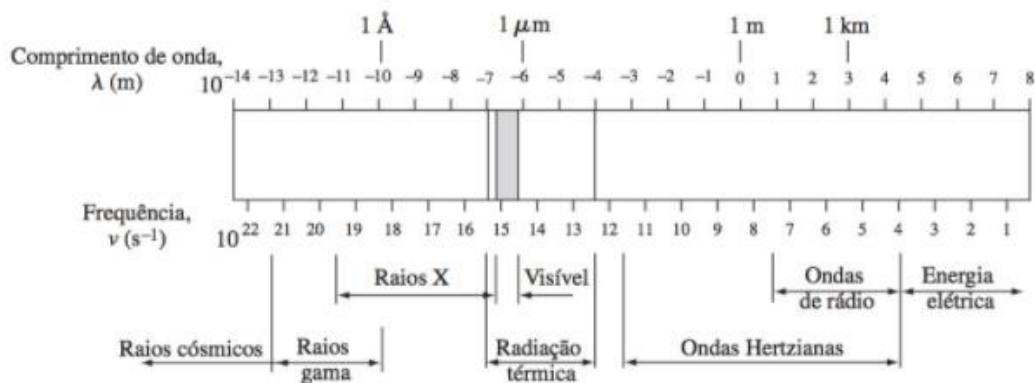
Figura 6 – Propriedades da radiação



Fonte: Welty et al. (2017).

A emissividade e a absorvidade é a propriedade de um material de emitir ou absorver energia em relação a um corpo negro, que é considerado a superfície ideal com a máxima taxa de radiação, um perfeito emissor e perfeito absorvedor. O corpo negro pode variar de acordo com o tipo de radiação, sendo dependente da frequência e do comprimento de onda eletromagnética (ÇENGEL, 2012).

Figura 7 – Tipos de radiação

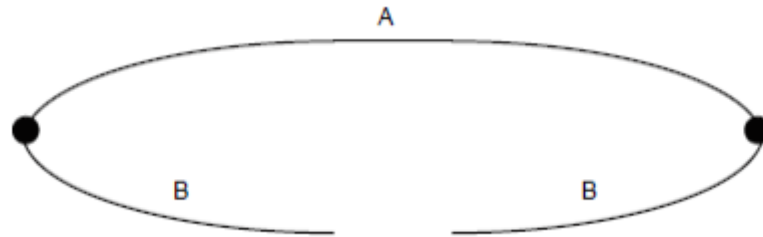


Fonte: Kreith et al. (2014).

2.2 Termoeletricidade

A análise dos efeitos termoeletricos pode ser demonstrada considerando a representação de um termopar. Conforme apresentado na Figura 8, considera-se ambos elementos condutores A e B isotrópicos e de materiais diferentes.

Figura 8 – Representação de um termopar



Fonte: Goldsmid (2010).

2.2.1 Efeito Seebeck

Analisando a Figura 8, o elemento condutor A está unido a ambos elementos condutores B, o elemento condutor B está dividido em duas partes, para que seja inserido um voltímetro entre os condutores. Supondo que ocorra uma diferença de temperatura (ΔT) entre as uniões (AB) de um lado em relação ao outro, ocorre uma diferença de potencial (V) entre os elementos condutores B, gerando uma força eletromotriz.

Desta forma, o efeito Seebeck ocorre na junção de diferentes materiais condutores, que ao submeter as junções a uma variação de temperatura, os elétrons do material que possui menor energia migram para o material que possui maior energia, dando origem assim a força eletromotriz (GOLDSMID, 2010; ROWE, 2006).

O coeficiente de Seebeck é considerado positivo quando a força eletromotriz flui da união quente para a união fria através do elemento condutor A (GOLDSMID, 2010; ROWE, 2006).

O coeficiente de Seebeck é representado por:

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

Sendo:

α_{AB} = Coeficiente de Seebeck (Volts/Kelvin);

V = Tensão elétrica (Volts);

ΔT = Diferença de temperatura entre as junções (Kelvin).

2.2.2 Efeito Peltier

O efeito Peltier é considerado o inverso do efeito Seebeck, ele consiste na condução de elétrons de um material condutor para outro material condutor, de modo que ao alterar a energia transportada, ocasione aquecimento ou arrefecimento nas uniões (GOLDSMID, 2010; ROWE, 2006).

Considerando o mesmo termopar da Figura 8, supondo que conecte-se aos elementos condutores B uma fonte elétrica, a partir do momento que a corrente flui pelo circuito, faz com que a união AB de um lado aqueça e a união AB do outro lado esfrie, em função do sentido da corrente.

O coeficiente de Peltier é considerado positivo quando a união na qual a corrente entra é aquecida.

O coeficiente de Peltier é representado por:

$$\pi_{AB} = \frac{q}{I} \quad (2)$$

Sendo:

π_{AB} = Coeficiente de Peltier (Volts);

q = Taxa de aquecimento ou resfriamento da junção (Watts);

I = Corrente elétrica (Ampere).

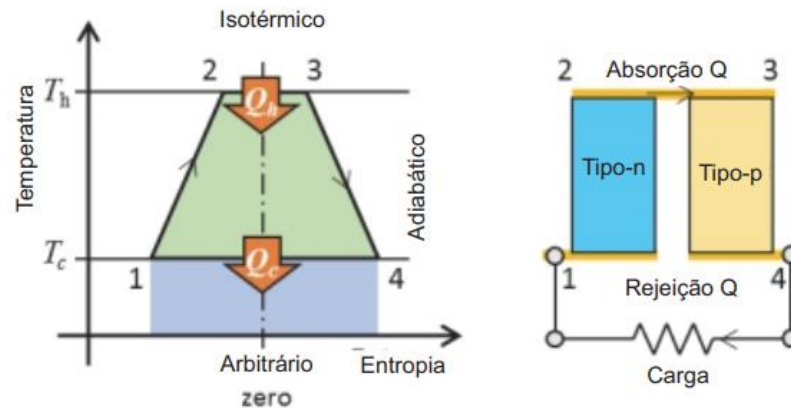
2.2.3 Efeito Thomson

Thomson demonstrou a relação entre os efeitos Seebeck e Peltier, ambos podem ocorrer em um mesmo elemento, no entanto o efeito consiste na taxa de geração ou absorção de calor reversível, devido a passagem de uma corrente elétrica ao longo de um condutor homogêneo exposto a um diferencial de temperatura (IOFFE, 1957; ROWE, 2006).

A Figura 9 e a Figura 10 apresentam os contornos gerais do ciclo termodinâmico ideal, considerando o processo adiabático e isotérmico, através do

diagramas de temperatura e entropia para um termoelemento genérico (YAZAWA et al., 2021).

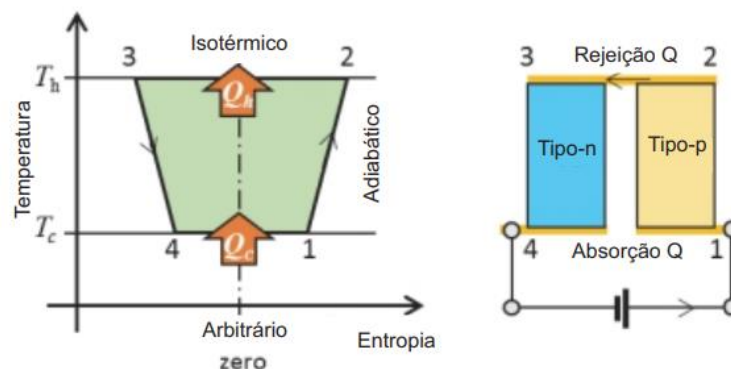
Figura 9 – Diagrama de Temperatura e Entropia para geração elétrica pelo efeito Seebeck



Fonte: Yazawa et al. (2021).

Os processos 1 e 2 correspondem ao elemento do tipo-n e os processos 3 e 4 o elemento do tipo-p. Apenas é considerado os contatos das superfícies quente e fria dos termoelementos, e o ponto considerado como zero arbitrário em entropia é o ponto médio entre o par de termoelementos (YAZAWA et al., 2021).

Figura 10 – Diagrama de Temperatura e Entropia para refrigeração pelo efeito Peltier

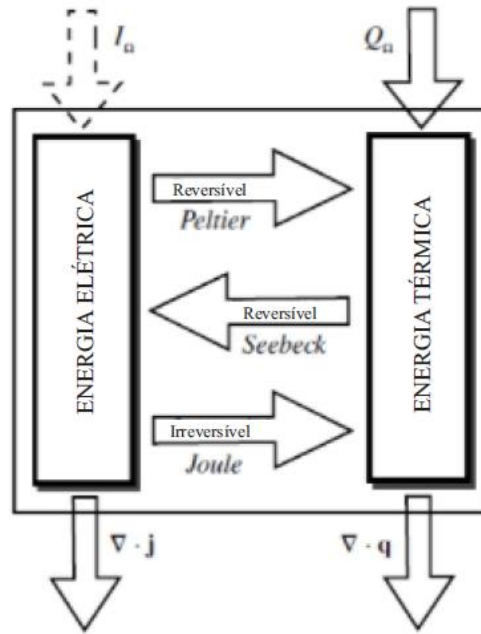


Fonte: Yazawa et al. (2021).

Este efeito ocorre na direção do fluxo elétrico, podendo aumentar a energia potencial quando ocorre no sentido oposto ao gradiente térmico ou reduzir a energia potencial quando ocorre no sentido do gradiente térmico, devido aos fenômenos irreversíveis do efeito Joule. O efeito Thomson não possui grande relevância para os dispositivos termoeletrônicos, porém não deve ser negligenciado (GOLDSMID, 2010; IOFFE, 1957; ROWE, 2006).

A Figura 11 representa o balanço de energia do termoelemento de acordo com os efeitos ocorridos, onde os efeitos Peltier e Seebeck apresentam reversibilidade e o efeito Joule irreversibilidade.

Figura 11 – Representação do balanço de energia



Fonte: Adaptado de Pérez-Aparicio (2012).

2.2.4 Figura de Mérito zT

A Figura de mérito zT determina a qualidade dos materiais termoeletrônicos, medindo a capacidade dos materiais de transformar energia térmica em energia elétrica ou de energia elétrica em energia térmica, para isso devem possuir elevados coeficientes de Seebeck, elevada condutividade elétrica, minimizando o aquecimento pelo efeito Joule devido à resistência, e possuir baixa condutividade térmica, minimizando as perdas de calor (NORTHWESTERN, 2020; ROWE, 2006).

A Figura de mérito é representada por:

$$zT = \frac{\alpha^2}{\rho k} T \quad (3)$$

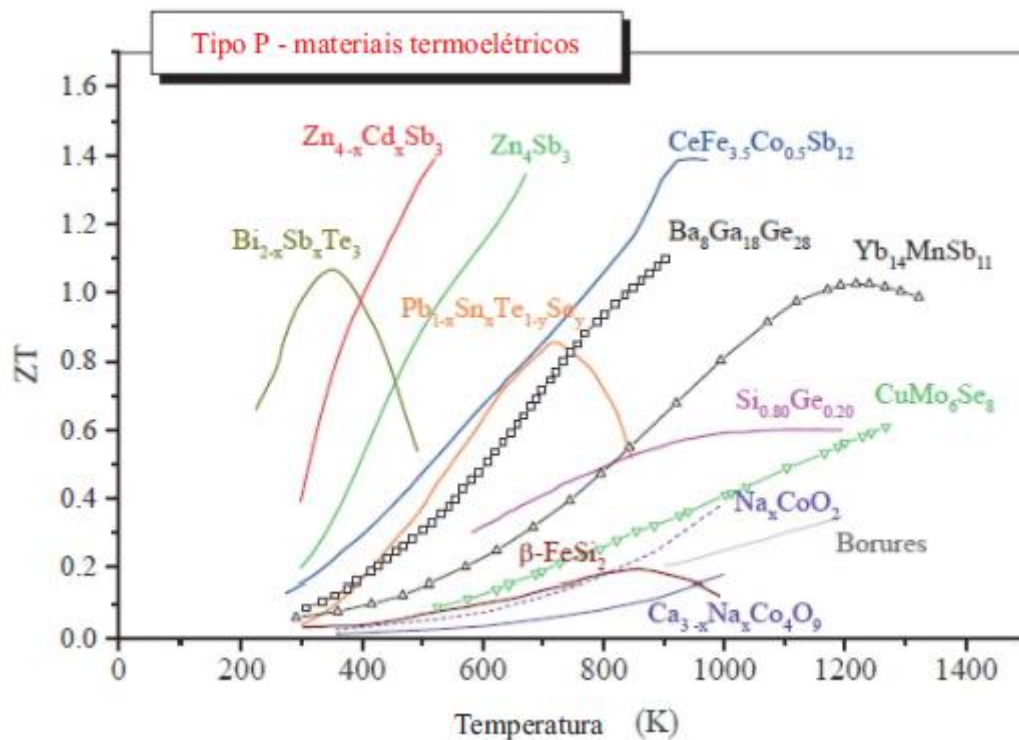
Sendo:

zT = Figura de Mérito;

α = Coeficiente de Seebeck (Volts/Kelvin);
 ρ = Resistividade elétrica (Ohms.metro);
 k = Condutividade térmica (Watts/(metro.Kelvin);
 T = Temperatura (Kelvin).

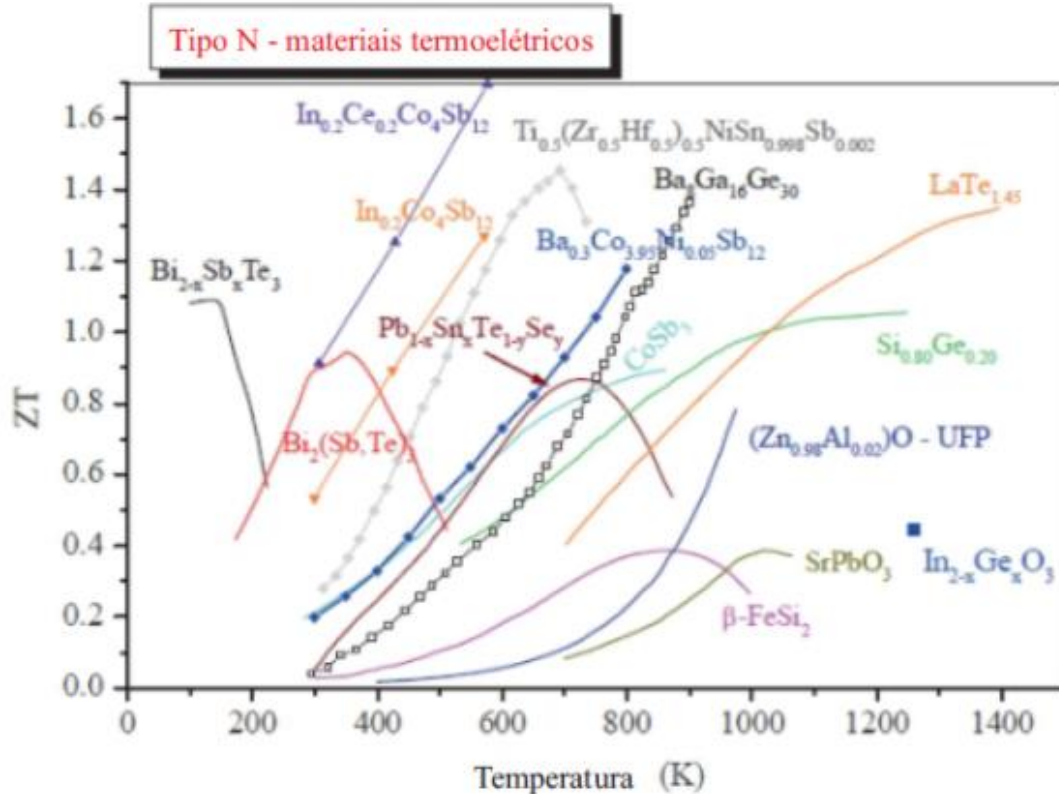
As Figuras 12 e 13 apresentam alguns materiais termoelétricos utilizados comercialmente com figuras de méritos zT variadas em relação a sua temperatura de operação, para a correta aplicação os materiais devem ser selecionados, tanto os materiais semicondutores do tipo-n quanto os materiais dopados do tipo-p. Para a seleção dos materiais deve ser levado em consideração o tipo de aplicação, temperatura de operação, compatibilidade entre os elementos, estabilidade química, ambiente de operação e a expansão/contração térmica dos componentes (NORTHWESTERN, 2020; ROWE, 2006).

Figura 12 – Gráfico relacionando a Figura de Mérito zT em relação a Temperatura para alguns materiais semicondutores do tipo-p



Fonte: Adaptado de Zlatić (2009).

Figura 13 – Gráfico relacionando a Figura de Mérito zT em relação a Temperatura para alguns materiais semicondutores do tipo-n

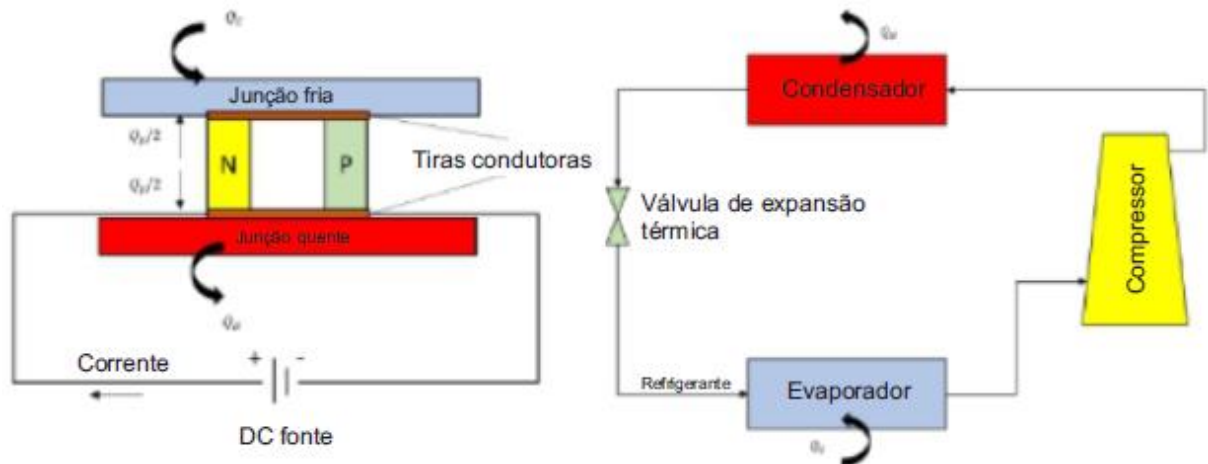


Fonte: Adaptado de Zlatić (2009).

2.3 Módulos termoelétricos

Os módulos termoelétricos podem ser comparados aos sistemas de refrigeração convencionais, que operam por compressão de fluidos refrigerantes, onde os mesmos trocam de fase líquida para gasosa, e vice-versa, durante o processo. A Figura 14 representa ambos sistemas, que possuem elementos ou regiões onde encontram-se trocadores de calor que absorvem o calor e liberam o calor absorvido. No sistema termoelétrico, o compressor é substituído por uma fonte de energia elétrica e o fluido refrigerante é substituído pela corrente elétrica que passa pelo sistema (ALAOUI, 2011; KAR KIN et al, 2018).

Figura 14 – Representação do sistema de refrigeração termoelétrico e do sistema por ciclo de compressão de gás



Fonte: Adaptado de Kar Kin et al. (2018).

A Tabela 1 apresenta o comparativo da similaridade e descreve as características de funcionamento entre os elementos que compõe o sistema de refrigeração por ciclo de compressão de gás e os elementos que compõe o modulo termoelétrico.

Tabela 1 – Comparativo do sistema de refrigeração por ciclo de compressão de gás com o sistema de modulo termoelétrico

Componente	Compressão de gás	Termoelétrico
Evaporador	Trocador de calor onde o fluido refrigerante pressurizado possa se expandir, ferver e evaporar (o calor é absorvido durante a mudança do estado liquido para o gasosos).	Superfície da junção onde o calor é absorvido pela movimentação eletrônica a medida que os elétrons passam de um nível de baixa energia (tipo-p) para um de alta energia (tipo-n)
Compressor	Atua comprimindo o fluido refrigerante em estado gasoso.	A fonte de alimentação elétrica que fornece energia para a movimentação eletrônica.
Condensador	Dissipa o calor absorvido pelo fluido no evaporador e no sistema de compressão, para o ambiente externo, retornando o fluido para a fase liquida.	Superfície da junção onde o calor é dissipado para o ambiente pela movimentação eletrônica a medida que os elétrons passam de um nível de alta energia (tipo-n) para um de baixa energia (tipo-p).
Meio de condução	Fluido refrigerante que muda de estado liquido para gasoso durante o processo.	Movimentação eletrônica através da passagem de uma corrente elétrica.
Elemento de expansão	Válvula de expansão que permite que o fluido se expanda e reduza a sua temperatura.	Termo elemento do tipo-p que possui deficiência de elétrons permitindo que ocorra a absorção térmica pela corrente elétrica.

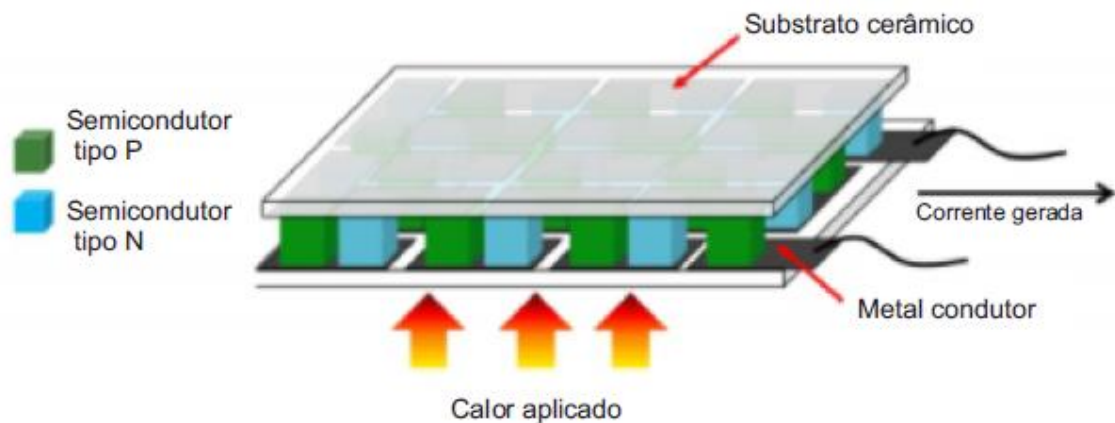
Fonte: Adaptado de Alaoui (2011).

2.3.1 Características e funcionamento dos módulos termoeétricos

Materiais termoeétricos possuem a capacidade de converter energia térmica em energia elétrica através do efeito Seebeck ou converter energia elétrica em energia térmica através do efeito Peltier, que baseia-se na cinética eletrônica de materiais semicondutores metálicos.

A Figura 15 apresenta um módulo termoeétrico comum, utilizado tanto para conversão de energia térmica em energia elétrica, como para a conversão de energia elétrica em energia térmica, alterando-se apenas os materiais semicondutores. Dentro do módulo termoeétrico simples encontram-se dois semicondutores, um do tipo-p, que são dopados para ter deficiência de elétrons, e outro do tipo-n, que são dopados para ter excesso de elétrons. A conexão elétrica entre os semicondutores permite a transferência elétrica entre os semicondutores criando um fluxo de corrente (KIM et al., 2012).

Figura 15 – Módulo termoeétrico comum com semicondutores do tipo-p e do tipo-n conectados termicamente em paralelo e eletricamente em série

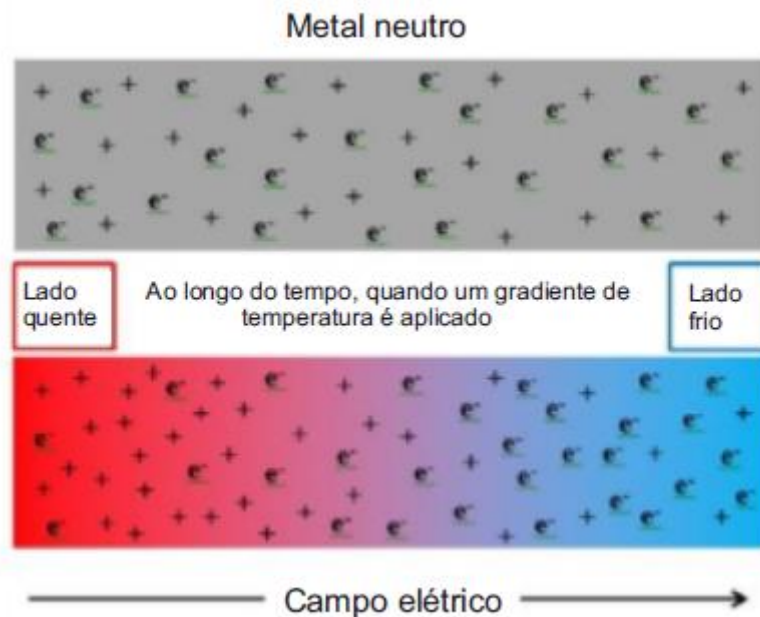


Fonte: Adaptado de Kim et al. (2012).

Ao aplicar um gradiente de temperatura a um módulo termoeétrico de modo que uma das faces mantenha-se quente e a outra fria, ocorre uma movimentação de elétrons dos semicondutores. No lado quente dos semicondutores, devido a energia térmica os elétrons possuem maior energia cinética do que os elétrons do lado frio, fazendo com que eles movam-se do lado quente (de maior energia) em direção ao lado frio (de menor energia) (KIM et al., 2012; RIERA JUNIOR, 2013).

A Figura 16 representa a distribuição de elétrons em um corpo metálico na ausência de um gradiente de temperatura e na existência de um gradiente de temperatura.

Figura 16 – Movimentação eletrônica em um metal sem gradiente de temperatura e com gradiente de temperatura

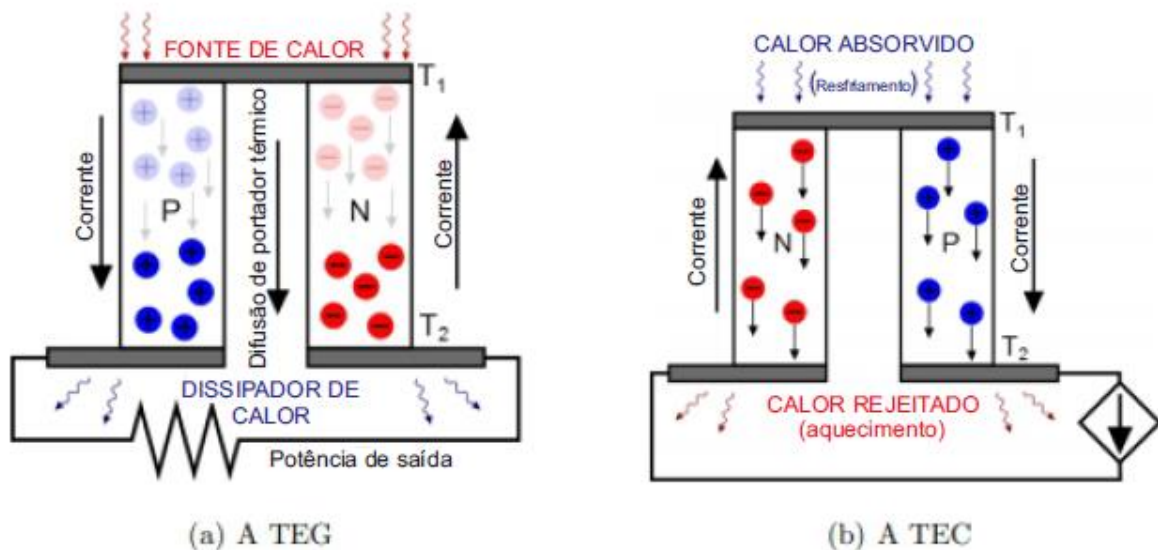


Fonte: Adaptado de Kim et al. (2012).

Com isso o lado frio dos semicondutores obtém excesso de elétrons, deixando o lado quente com excesso de lacunas, fazendo com que predomine cargas positivas. Portanto, ao criar-se um gradiente de temperatura, cria-se um gradiente de carga, formando assim um campo elétrico. Este efeito é reversível, de modo que o efeito Peltier converte energia elétrica em energia térmica ao passar a corrente elétrica pelas junções dos materiais, fazendo com que os elétrons movem-se de um elemento com alto nível de energia (tipo n) para um elemento de baixo nível de energia (tipo p), carregando consigo mais ou menos energia térmica, acumulando ou removendo calor das respectivas junções (KIM et al., 2012; LAIRD, 2020; RIERA JUNIOR, 2013).

Ao passar uma corrente elétrica pelo sistema, faz-se com que os portadores de carga movam-se todos no mesmo sentido, de forma que conduzam o calor no mesmo sentido, absorvendo de um lado e liberando em outro, conforme representado na Figura 17. Ao ligar-se em série estes elementos aumenta-se a voltagem operacional e o fluxo de calor conduzido pelo sistema (RIERA JUNIOR, 2013).

Figura 17 – Representação de um par termoeletrico, (a) operando em modo de geração elétrica pelo efeito Seebeck, (b) operando em modo de refrigeração pelo efeito Peltier



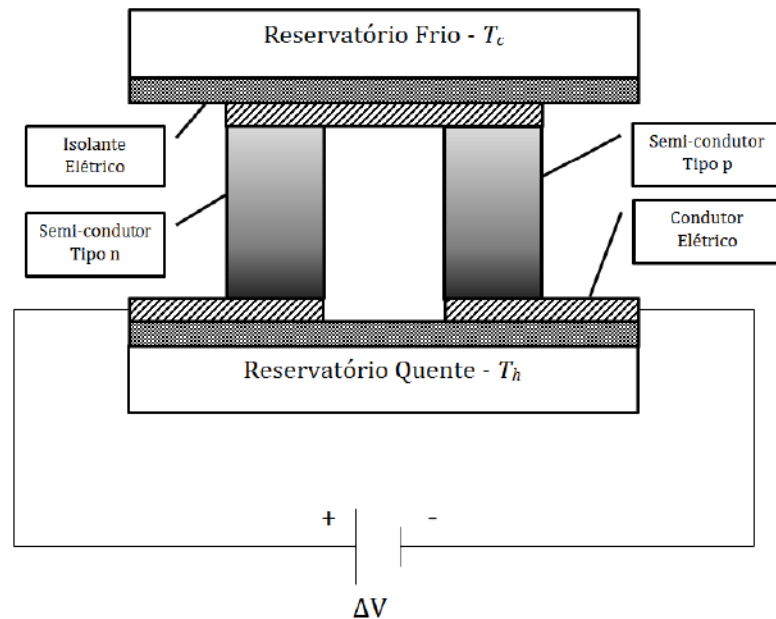
Fonte: Adaptado de Conrad (2015).

A variação do bombeamento de energia térmica não varia linearmente com o aumento da corrente ou do número de pares termoeletricos devido às perdas ocasionadas pelo efeito joule (GOLDSMID, 2010; ROWE, 2006).

2.3.2 Composição dos módulos

Conforme apresentado por De Oliveira (2014), Rowe (2006) e Goldsmid (2010), a maioria dos módulos encontrados comercialmente possui construção semelhante à apresentada na Figura 18. Nele encontram-se duas chapas de material isolante elétrico, que também deve ser um bom condutor térmico, pares de semicondutores dopados do tipo-p e do tipo-n, que são unidos em suas extremidades por finas lâminas de material bom condutor elétrico e bom condutor térmico, normalmente utiliza-se o cobre. Os módulos possuem dimensões limitadas devido aos efeitos da contração e da dilatação térmica presentes em seu funcionamento.

Figura 18 – Composição do módulo

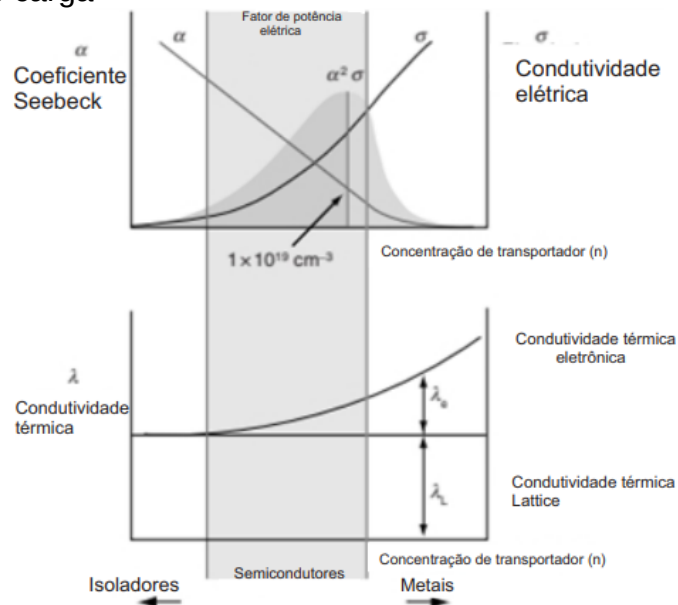


Fonte: De Oliveira (2014).

Uma das propriedades dos materiais é sua resistividade elétrica, que é a característica de restrição do material ao fluxo de corrente elétrica, podendo ser classificados os materiais com alta resistividade elétrica como isolantes elétricos, os materiais com baixa resistividade elétrica como condutores elétricos, e os semicondutores, que possuem resistividade menor que os isolantes, porém maior que os condutores (DE OLIVEIRA, 2014).

Pode-se observar na Figura 19, que a condutividade elétrica dos materiais é muito baixa nos isolantes e elevada nos condutores, ficando os materiais semicondutores em uma posição intermediária, isto ocorre devido a concentração dos transportadores de carga elétrica. Conforme o aumento da condutividade elétrica ocorre o aumento da condutividade térmica e o decaimento do coeficiente Seebeck. Deste modo, conseguimos analisar a qualidade dos materiais termoelétricos, buscando um material que possua um bom fator de potência, com uma boa relação entre o coeficiente de Seebeck, condutividade elétrica e condutividade térmica (ROWE, 2006).

Figura 19 – Representação da relação da condutividade elétrica, coeficiente de Seebeck, fator de potência e condutividade térmica, em relação à concentração dos transportadores de carga



Fonte: Adaptado de Rowe (2006).

2.3.3 Semicondutores

A dopagem de semicondutores é o processo que altera o tipo e a quantidade de alguns átomos da rede cristalina do material, utiliza-se como base semicondutores de alta pureza por serem sensíveis a presença de pequenas concentrações de dopante, na ordem de 7 a 10% (DE OLIVEIRA, 2014; HUMEL, 2014).

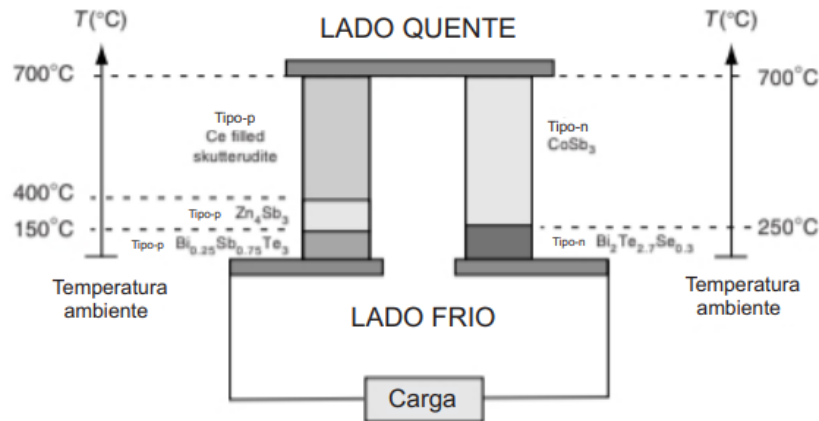
Nos semicondutores do tipo-n, alguns átomos da estrutura cristalina são substituídos por outros que possuem um maior número de elétrons em sua banda de valência, possuindo grande número de portadores de carga negativa (DE OLIVEIRA, 2014).

Já os semicondutores do tipo-p, possuem alguns átomos da sua estrutura cristalina substituídos por outros átomos que possuem um menor número de elétrons em sua banda de valência, criando lacunas, possuindo grande número de portadores de carga positiva (DE OLIVEIRA, 2014).

A inserção de desordem no sistema, até certo ponto, maximiza a Figura de mérito zT e minimiza a condutância térmica (DA ROCHA, 2010).

Alguns módulos termoeétricos podem apresentar os pares dos semicondutores termoeétricos do tipo-p e tipo-n multisegmentados, conforme representado na Figura 20, sendo utilizado em busca de maior performance e resistêcia a temperaturas mais elevadas (ROWE, 2006).

Figura 20 – Termoelemento semiconductor multisegmentado



Fonte: Adaptado de Rowe (2006).

2.3.4 Desempenho

O desempenho dos refrigeradores é normalmente expressado pelo Coeficiente de Performance (*Coefficient Of Performance* - COP), sendo a potência de resfriamento dividida pela taxa de consumo elétrico.

A análise de desempenho do sistema ideal de refrigeração e/ou aquecimento, é calculada com o COP do ciclo de Carnot, que utiliza para o cálculo apenas as temperaturas de entrada e saída do sistema, desconsiderando qualquer existência de perda no sistema (FUNAHASHI et al., 2021; YAZAWA et al., 2021).

O COP de Carnot para um sistema de refrigeração é representado por:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_F}{T_Q - T_F} \quad (4)$$

O COP de Carnot para um sistema de aquecimento é representado por:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_Q}{T_Q - T_F} \quad (5)$$

Sendo:

COP_{Carnot} = Coeficiente de Performance Ideal;

T_Q = Temperatura da fonte quente (Kelvin);

T_F = Temperatura da fonte fria (Kelvin).

Para a análise de desempenho do sistema real de refrigeração e/ou aquecimento, o COP é calculado pela potência de refrigeração, através do cálculo da taxa de calor removido do fluido, durante um determinado intervalo de tempo, dividido pela potência elétrica consumida, que é o produto da corrente elétrica pela voltagem do sistema (CAVALCANTI et al.,2010; FUNAHASHI et al., 2021; YAZAWA et al.,2021).

O COP real para um sistema de refrigeração é representado por:

$$COP = \frac{\dot{Q}_R}{P} = \frac{\dot{m}.C_p.(T_E - T_S)}{V.I} \quad (6)$$

O COP real para um sistema de aquecimento é representado por:

$$COP = \frac{\dot{Q}_A}{P} = \frac{\dot{m}.C_p.(T_S - T_E)}{V.I} \quad (7)$$

Sendo:

COP = Coeficiente de Performance;

$\dot{m}$ = Vazão mássica (kg/segundos);

C_p = Calor específico a pressão constante (J/kg.Kelvin);

T_E = Temperatura de entrada (Kelvin);

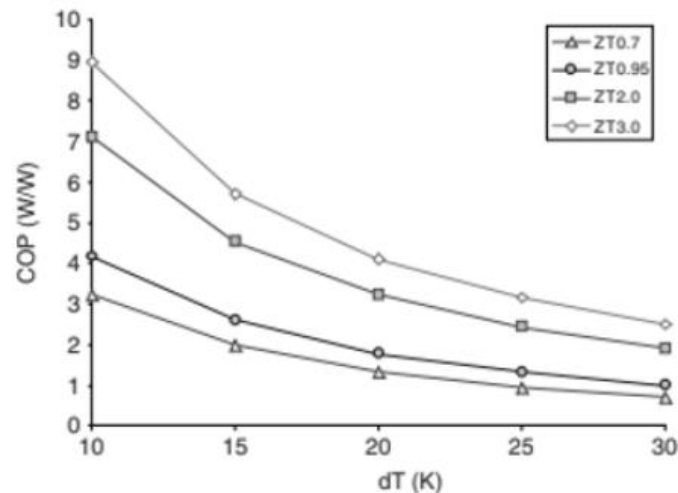
T_S = Temperatura de saída (Kelvin);

V = Tensão elétrica (Volts);

I = Corrente elétrica (Ampere).

A Figura 21 apresenta o máximo COP para um determinado diferencial de temperatura, considerando alguns valores de qualidade de material zT (ROWE, 2006).

Figura 21 – Máximo COP em relação a um diferencial de temperatura para materiais de diversas qualidades zT



Fonte: Rowe (2006).

A Figura 22 apresenta o COP para os três regimes de refrigeração, em que considera a utilização de um módulo termoeletrico de 40 x 40 mm, de Figura de Mérito do material com $zT=0,95$, que opera na configuração apresentada pela Figura 24, com os valores de resistência térmica da Figura 23, considerados como um sistema de transferência de calor ideal (ROWE, 2006).

Figura 22 – Regimes de refrigeração

		Ar condicionado	Refrigeração	Congelamento
Temperatura do dissipador (ambiente)	°C	35.0	25.0	25.0
Fonte de temperatura (fria)	°C	23.0	5.0	-18.0
Diferença de temperatura (dT)	°C	12.0	20.0	43.0
COP_{max} for $ZT=0.95$ material	W/W	3.67	1.80	0.50

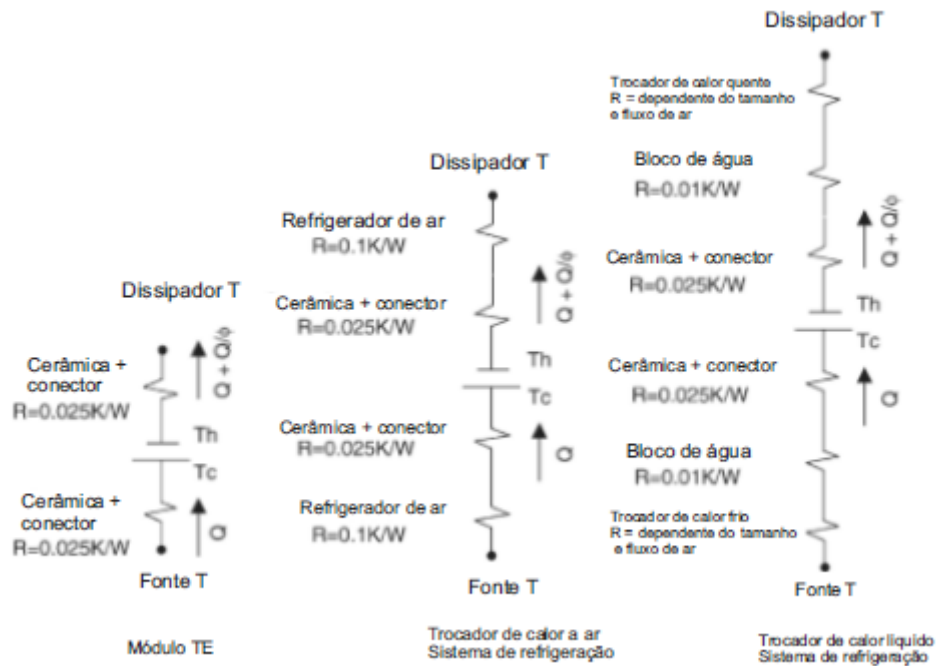
Fonte: Adaptado de Rowe (2006).

2.4 Sistema de transferência de calor

Componentes que constituem o módulo como as placas de isolante elétrico e os condutores elétricos, bem como os dissipadores térmicos e demais componentes associados ao sistema, apresentam uma determinada resistência térmica,

impactando significativamente na transferência de calor e consequentemente na eficiência do sistema. A Figura 23 apresenta alguns valores de resistência térmica tidos como ideais para três configurações de aplicação, considerando um módulo de 40 x 40 mm (ROWE, 2006).

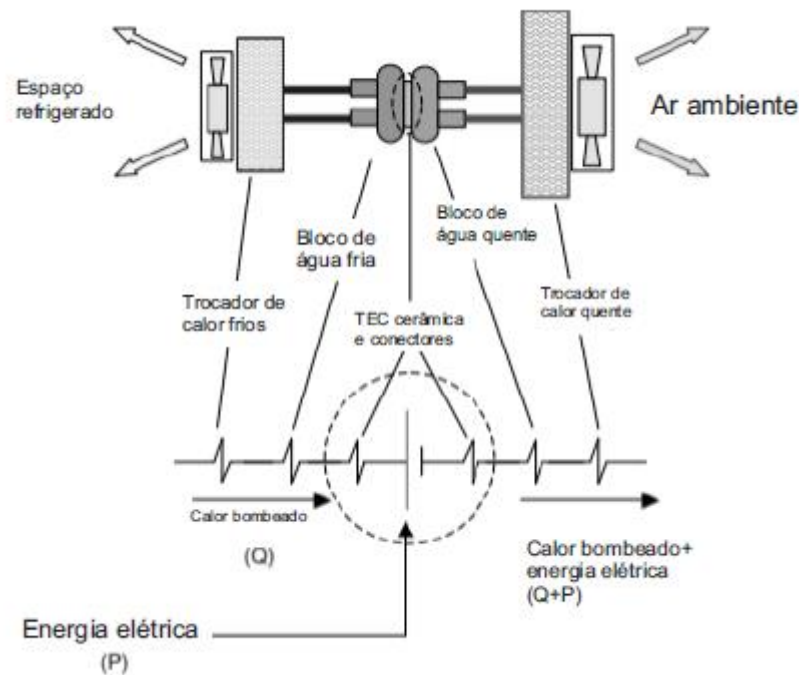
Figura 23 – Diagrama de resistência térmica



Fonte: Adaptado de Rowe (2006).

A redução das resistências térmicas é um fator fundamental para a melhoria da eficiência do sistema, sendo mais aconselhável a utilização de trocadores de calor líquidos, que adicionam mais custo e complexidade ao sistema, onde o módulo é montado sob uma superfície sólida, conhecida como bloco de água, de modo que o calor é transferido para um fluido, que então é conduzido até um trocador de calor do tipo feixe tubular aletado, onde realiza a troca térmica com o ar, conforme pode ser visto na Figura 24 (ROWE, 2006).

Figura 24 – Representação do sistema de troca térmica com utilização de um fluido condutor



Fonte: Adaptado de Rowe (2006).

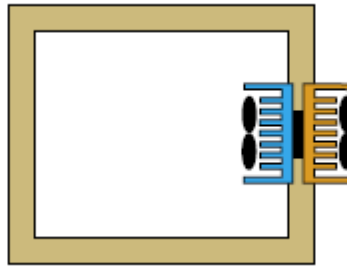
2.5 Modelos construtivos

Supercool AB (2004) apresenta as principais configurações de aplicação dos módulos termoeletrônicos, onde cada configuração possui suas particularidades e características, sendo a escolha da configuração dependente do tipo de aplicação.

2.5.1 Ar e Ar

O sistema construtivo Ar e Ar é representado pela Figura 25, este sistema utiliza-se de dois trocadores de calor sólidos, onde um conectado ao lado de refrigeração do módulo termoeletrônico, responsável por refrigerar o ambiente interno, e o outro é conectado ao lado de aquecimento do módulo, sendo responsável pela dissipação de calor ao ambiente externo.

Figura 25 – Modelo construtivo Ar e Ar

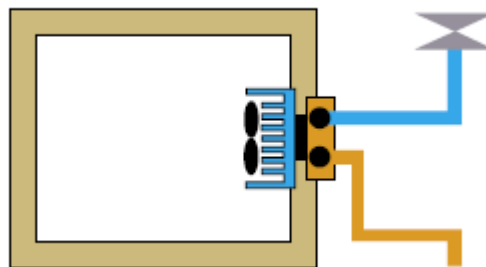


Fonte: Supercool AB (2004).

2.5.2 Ar e Líquido

O sistema construtivo Ar e Líquido é representado pela Figura 25, este sistema utiliza-se de um trocador de calor sólido, que é conectado ao lado de refrigeração do módulo termoelétrico, responsável por refrigerar o ambiente interno, e de um trocador de calor com a utilização de fluido líquido, que é conectado ao lado de aquecimento do módulo, sendo responsável pela dissipação de calor do módulo.

Figura 26 – Modelo construtivo Ar e Líquido

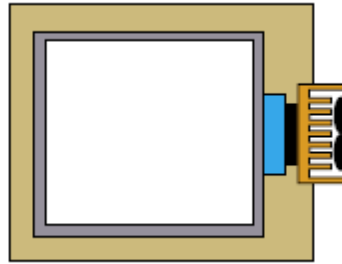


Fonte: Supercool AB (2004).

2.5.3 Direto e Ar

O sistema construtivo Direto e Ar é representado pela Figura 27, este sistema utiliza-se de apenas um trocador de calor sólido, que é conectado ao lado de aquecimento do módulo, sendo responsável pela dissipação de calor ao ambiente externo, o lado de refrigeração do módulo termoelétrico é conectado diretamente sobre a estrutura interna do ambiente a ser refrigerado.

Figura 27 – Modelo construtivo Direto e Ar

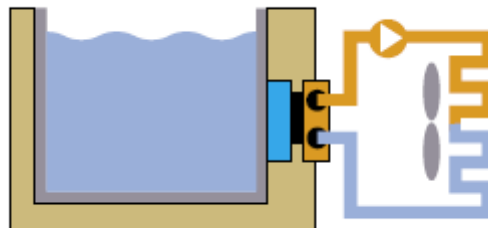


Fonte: Supercool AB (2004).

2.5.4 Direto e Líquido

O sistema construtivo Direto e Líquido é representado pela Figura 28, este sistema utiliza-se de apenas um trocador de calor com a utilização de fluido líquido, que é conectado ao lado de aquecimento do módulo, sendo responsável pela dissipação de calor através da condução do fluido até outro trocador de calor, que realiza a troca térmica com o ambiente externo. O lado de refrigeração do módulo termoelétrico é conectado diretamente sobre a estrutura interna do reservatório de líquido a ser refrigerado ou mesmo ao ambiente interno.

Figura 28 – Modelo construtivo Direto e Líquido



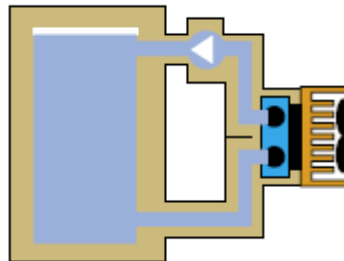
Fonte: Supercool AB (2004).

2.5.5 Líquido e Ar

O sistema construtivo Líquido e Ar é representado pela Figura 29, este sistema utiliza-se de um trocador de calor com a utilização de fluido líquido, que é conectado ao lado de refrigeração do módulo termoelétrico, responsável por refrigerar o ambiente interno ou o reservatório de líquido, e de um trocador de calor sólido, que é conectado

ao lado de aquecimento do módulo, sendo responsável pela dissipação de calor do módulo ao ambiente externo.

Figura 29 – Modelo construtivo Líquido e Ar

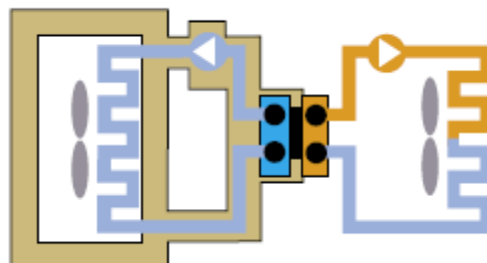


Fonte: Supercool AB (2004).

2.5.6 Líquido e Líquido

O sistema construtivo Líquido e Líquido é representado pela Figura 30, este sistema utiliza-se de um trocador de calor com a utilização de fluido líquido, que é conectado ao lado de refrigeração do módulo termoeletrônico, responsável por refrigerar o ambiente interno, através da condução do fluido até outro trocador de calor, que realiza a troca térmica com o ambiente interno, e de um trocador de calor com a utilização de fluido líquido, que é conectado ao lado de aquecimento do módulo, sendo responsável pela dissipação de calor do módulo através da condução do fluido até outro trocador de calor, que realiza a troca térmica com o ambiente externo.

Figura 30 – Modelo construtivo Líquido e Líquido



Fonte: Supercool AB (2004).

2.6 Propriedade térmica dos materiais

A propriedade térmica da matéria é considerada a capacidade de transporte de energia térmica pelo material, sendo dependente da sua estrutura física, atômica e molecular, e está diretamente relacionada com o estado físico da matéria. A condução térmica pelos materiais também podem sofrer variações proporcionadas pela influência da variação de temperatura e pressão (INCROPERA et al.,2011).

Os materiais apresentam valores distintos de condutividade térmica, sofrendo variações propiciadas pela sua composição estrutural da matéria e pela construção física de determinado componente (INCROPERA et al.,2011).

O calor específico de um material mede a necessidade de energia térmica para que ocorra a variação de 1°C para cada grama do material, demonstrando o comportamento termodinâmico do material analisado (ÇENGEL, 2012; INCROPERA et al.,2011).

Os processos de transferência térmica entre os materiais está diretamente relacionado com as propriedades de condutividade térmica de cada elemento presente no sistema. A Tabelas 2 apresenta alguns valores de condutividade térmica (k) e calor específico (C_p) de alguns materiais em estado sólido, líquido e gasoso, servindo como guia comparativo para seleção de componentes.

Tabela 2 – Propriedades Termofísicas a 300 Kelvin dos materiais selecionados

Material	ρ (kg/m ³)	C_p (J/(kg.K))	k (W/(m.K))
Alumínio Puro	2702	903	237
Cobre Puro	8933	385	401
Aço Carbono	7854	434	60,5
Aço inox 304	7900	477	14,9
Estanho	7310	227	66,6
Madeira	720	1255	0,16
Argamassa de cimento	1860	780	0,72
Tijolo comum	1920	835	0,72
Fibra de vidro	32	835	0,038
Poliestireno extrudado	55	1210	0,27
Cortiça	120	1800	0,039

Vidro	2500	750	1,4
PVC	1380	960	
Ar	1,1614	1007	0,0263
Amônia	0,6894	2158	0,0247
Óleo de motor	884,1	1909	0,145
Etilenoglicol	1114,4	2415	0,252
Mercúrio	13,529	1393	8,54
Agua	1,003	4179	0,613

Fonte: Adaptado Incropera et al. (2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados os procedimentos metodológicos utilizados para a elaboração da pesquisa experimental.

3.1 Definição da pesquisa

A pesquisa pode ser definida como um procedimento racional e sistemático que tem por objetivo coletar informações suficientes para apresentar respostas satisfatórias aos problemas propostos (GIL, 2018).

3.1.1 Quanto aos seus objetivos

A pesquisa é classificada como pesquisa aplicada pois tem o objetivo de adquirir conhecimento tendo em vista a situação específica de aplicação (GIL, 2018).

3.1.2 Quanto a natureza da abordagem

Quanto ao modo de abordagem da pesquisa, é considerado quantitativo, pois os procedimentos para a análise e a coleta de dados são objetivos, fundamentado em teorias existentes, que busca analisar as hipóteses da pesquisa sem a interferência do pesquisador no processo, apresenta resultados mensuráveis e numéricos (BAPTISTA, 2018; DE SORDI, 2017).

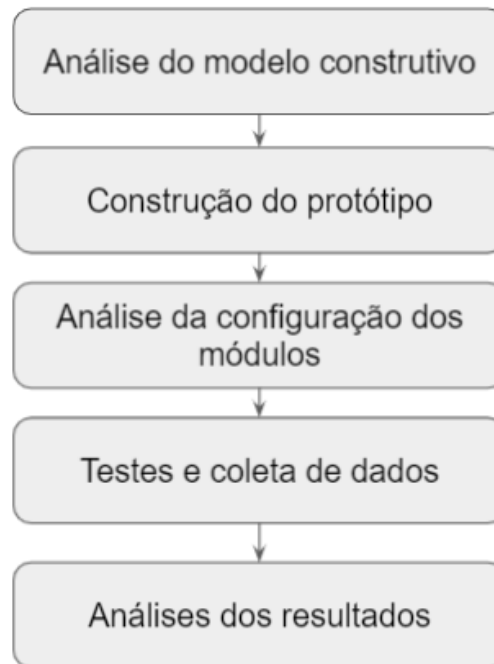
3.1.3 Quanto aos procedimentos técnicos

A pesquisa é classificada como bibliográfica e experimental, pois ela inicia com o levantamento de referências já publicadas em livros, artigos científicos, teses de doutorado e dissertação de mestrado, para a melhor compreensão sobre o assunto. Ela também é considerada experimental porque os dados da pesquisa são obtidos através da experimentação, onde seleciona-se variáveis capazes de influenciar o objeto, de forma a observar-se os efeitos produzidos (GIL, 2018; LAKATOS, 2017).

3.2 Desenvolvimento do sistema proposto

O desenvolvimento experimental da construção do protótipo do condicionador de ar termoelétrico iniciou-se com o estudo do sistema construtivo e o conceito de funcionamento dos equipamentos, seguindo como base o fluxograma representado na Figura 31.

Figura 31 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do protótipo



Fonte: Do autor (2021).

3.2.1 Análise do modelo construtivo

Através da leitura de trabalhos de pesquisa e da busca por produtos termoeletrônicos comerciais, sendo analisado o modelo construtivo adotado, buscou-se identificar um modelo com configuração que apresente desempenho satisfatório, de simples construção e versátil em termos de aplicação.

Com a escolha do modelo construtivo definido e com o conhecimento necessário sobre as características e funcionamento dos módulos termoeletrônicos, buscou-se verificar qual seria a melhor maneira de desenvolver o protótipo e quais equipamentos necessários, de modo a atender da melhor maneira todas as características necessárias para um bom desempenho do sistema.

3.2.2 Construção do protótipo

O desenvolvimento do protótipo iniciou-se com a aquisição do sistema de condicionamento de ar comercial, que apresentava defeito. Posteriormente buscou-

se revisar o equipamento para que fosse possível a sua utilização, momento em que também foram realizadas as adequações necessárias.

Após esta etapa iniciou-se a aquisição dos demais componentes necessários, como os dissipadores de alumínio, os módulos termoeletrônicos, termômetros, mangueiras, entre outros.

A montagem foi sendo realizada conforme a disponibilidade dos itens.

3.2.3 Análise da configuração dos módulos

Para a utilização dos módulos termoeletrônicos da maneira que apresenta um melhor desempenho térmico, realizou-se testes para identificar a melhor configuração de montagem do sistema, sendo analisado a montagem em simples e duplo estágio, e a alimentação elétrica fornecida aos módulos, variando a tensão de alimentação de 0 Vdc até 13 Vdc, para ambas configurações de montagem.

3.2.4 Testes e coleta de dados

Depois de definido a configuração de montagem e alimentação dos módulos termoeletrônicos, será realizado cinco testes com o protótipo. Quatro testes serão realizados com a mesma configuração de montagem dos módulos, operando em sistema de refrigeração, fornecendo a mesma tensão e corrente de alimentação, realizando-se apenas variações de funcionamento do sistema de bombas e ventiladores do protótipo. O quinto teste será realizado a alteração das mangueiras para operar em modo de aquecimento.

O primeiro teste será realizado com as duas bombas e os dois ventiladores ligados. O segundo teste apenas com as bombas ligadas. O terceiro teste será realizado apenas com uma bomba ligada e um ventilador ligado. O quarto teste apenas com uma bomba ligada. O quinto teste será realizado em modo de aquecimento, com as duas bombas e os dois ventiladores ligados.

A coleta de dados foi realizada por meio da leitura das temperaturas do fluido utilizado para a troca térmica, na entrada e saída dos reservatórios de refrigeração e de dissipação de calor, que estão em contato com os módulos termoeletrônicos, bem como do ar dentro e fora do ambiente a ser refrigerado. Além disso, a medição da vazão proporcionada pelas bombas do sistema e a medição do consumo elétrico do equipamento.

3.2.5 Análise dos resultados

Com a obtenção dos dados de temperatura, vazão, tensão e corrente, foi realizado análise de consumo elétrico do sistema, da potência de refrigeração, potência elétrica do sistema e o cálculo do COP do equipamento.

Posteriormente, verificou-se os fatores que influenciam o desempenho do sistema, analisando melhorias a serem desenvolvidas para melhorar o desempenho do equipamento.

3.3 Equipamentos utilizados

Para o fornecimento da energia elétrica para os módulos termoeletrônicos e as bombas elétricas, utilizou-se como fonte de alimentação elétrica, dois carregadores de bateria, representados na Figura 32, devido a corrente de alimentação dos componentes serem corrente contínua e a tensão do sistema ser de 12 Volts. A alimentação dos carregadores é feita com 220Vac e 60Hz e a saída de um dos modelos é 12 Vdc e 30 Adc e a do outro é de 12/24 Vdc e 50 Adc.

Figura 32 – Fontes de alimentação



Fonte: Do autor (2021).

Para as medições elétricas, utilizou-se de três multímetros digitais, conforme apresentado na Figura 33, realizando a medição da corrente elétrica e da tensão elétrica, tanto para corrente contínua como para corrente alternada.

Figura 33 – Multímetros digitais



Fonte: Do autor (2021).

Para as medições de temperatura foi utilizado termômetro digital de aplicação genérica, conforme apresentado na Figura 34, com faixa de medição de temperatura de -50°C até 110°C , com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ e precisão da medição de temperatura de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Figura 34 – Termômetro digital



Fonte: Do autor (2021).

Para a medição da vazão das bombas elétricas, utilizou-se de uma proveta de capacidade de 100ml, conforme Figura 35, o cronômetro utilizado foi o do smartphone da Xiaomi MI A1.

Figura 35 – Proveta de 100ml



Fonte: Do autor (2021).

4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do protótipo, as análises realizadas e os resultados obtidos.

4.1 Análise do modelo construtivo

Com a análise dos sistemas construtivos realizada e o conhecimento prévio apresentado no referencial teórico, definiu-se o modelo a ser adotado para este trabalho, sendo escolhido o sistema de líquido para líquido.

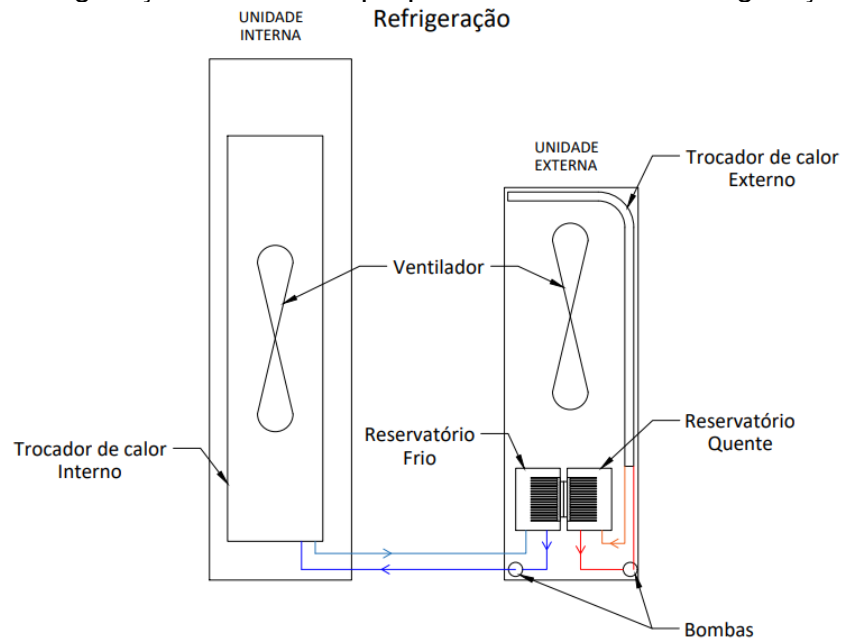
Para a construção deste sistema, o módulo deve ficar em contato com trocadores de calor líquidos, de modo que, transfira a energia térmica para o fluido condutor. O fluido é conduzido até os trocadores térmicos que realizam a troca térmica com o ar, tanto para o ambiente a ser refrigerado como para dissipação de calor do sistema.

Optou-se por utilizar um equipamento de condicionamento de ar comercial para realizar as trocas térmicas com o ar, adaptando-o para as necessidades de utilização.

Este sistema foi escolhido devido a sua versatilidade, uma vez que poderiam ser ligados vários equipamentos em um mesmo trocador de calor.

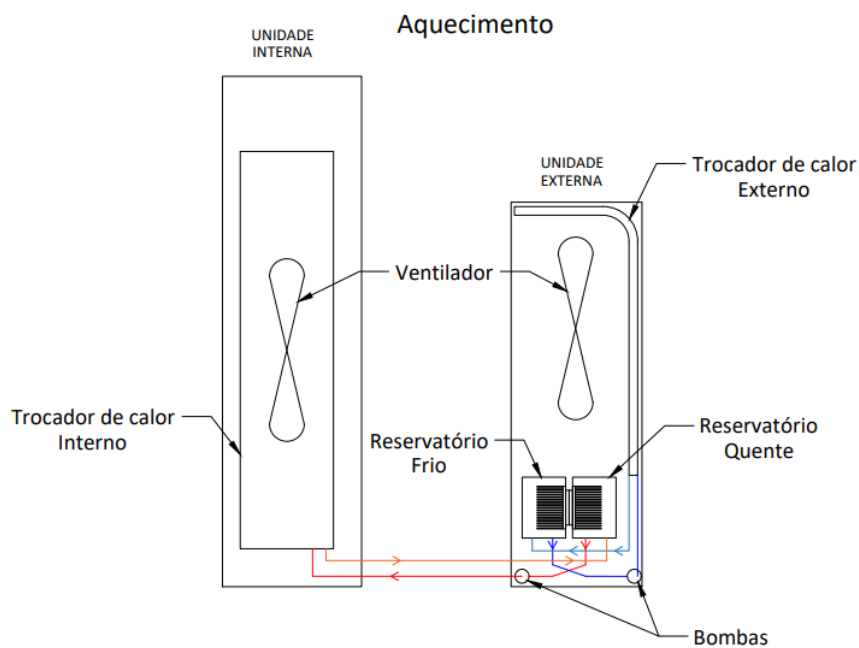
A Figura 36 e a Figura 37 apresentam o esquema de montagem do protótipo, representando o sistema de reservatórios onde são realizadas as trocas térmicas entre os módulos e o fluido condutor, o sistema de bombeamento e a representação do circuito de fluido, com a cor azul representando o fluido refrigerado e a cor vermelha o fluido aquecido, para os sistemas de refrigeração e de aquecimento

Figura 36 – Configuração do sistema proposto em modo de refrigeração



Fonte: Do autor (2021).

Figura 37 – Configuração do sistema proposto em modo de aquecimento



Fonte: Do autor (2021).

Para o sistema termoeletrico foi selecionado um modelo de módulo termoeletrico disponível no mercado nacional, que já é utilizado pela indústria para fabricação de alguns equipamentos. O módulo escolhido é da marca ASAFAN, conforme observado na Figura 39, os dados das características do módulo termoeletrico foram informados pelo fabricante, conforme apresentado na Figura 38.

Figura 38 – Características do módulo termoeletrico

ASA ADDA SOUTH AMERICA CORPORATION LTDA
FAN

Pastilhas Termoeletricas PELTIER
DADOS TÉCNICOS



MODELO
T41

CARACTERÍSTICAS
DIMENSÃO: 40x40 mm
FIO DE LIGAÇÃO: 295 mm (O comprimento do fio pode ser definido pelo cliente). O final do fio está descascado 8mm e estanhado.
VERMELHO: Positivo
PRETO: Negativo

DADOS DA ENERGIA
VOLTAGEM (máxima): 15.4v
AMP(máxima): 4A
GERAÇÃO DE FRIO (máxima): 36W
RESISTÊNCIA DE ENERGIA INTERNA (1KHz): 1.9-2.1Ω.

TEMPERATURA
DIFERENÇA DE TEMPERATURA: ≥65°C
GERAÇÃO MÁXIMA DE CALOR: Temperatura máxima inferior a 90°C

TESTE MECÂNICO
Teste de resistência dos fios de ligação com peso de 1.8kg durante 10 segundos.

Rua Ibituruna, 400 - Parque Imperial - São Paulo - SP
Tel.: (11) 3565-0105 | 5594-2446

www.asafan.com.br

Fonte: Asafan (2021).

Figura 39 – Módulo termoeletrico



Fonte: Do autor (2021).

Para uma compreensão melhor da construção do módulo termoeletrico, sacrificou-se um dos módulos adquiridos, realizando a remoção da superfície cerâmica condutora térmica, de maneira que possibilitasse visualizar a construção dos pares termoeletricos e suas ligações elétricas, conforme representado pela Figura 40.

Figura 40 – Construção do módulo termoeletrico



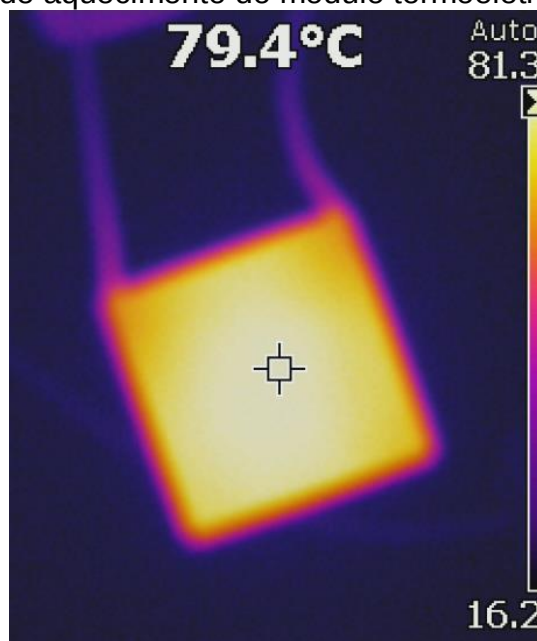
Fonte: Do autor (2021).

Como a transferência térmica entre as superfícies cerâmicas ocorre apenas pela área do semicondutor, buscando compreender melhor a distribuição térmica da

superfície e funcionamento térmico do módulo, foi realizado a captura da imagem térmica do lado em que ocorre o aquecimento do módulo quando submetido a uma corrente elétrica.

A Figura 41, demonstra a imagem que foi obtida apenas com o módulo sendo alimentado eletricamente com 12V, pelo tempo de 10s, estando suspenso pelo fios de alimentação, em temperatura ambiente próxima a 20°C e sem nenhuma influência na dissipação de calor da superfície.

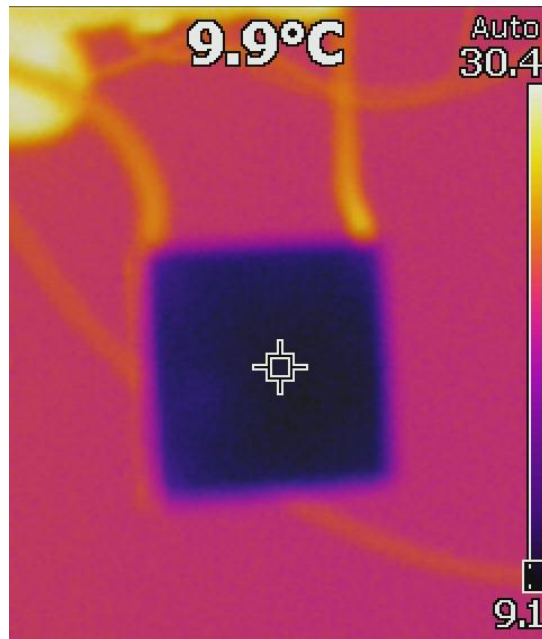
Figura 41 – Superfície de aquecimento do módulo termoeletrico



Fonte: Do autor (2021).

Do mesmo modo em que foi realizado a captura da imagem térmica do lado de aquecimento do módulo, realizou-se a captura do lado de refrigeração, apresentado na Figura 42, aguardando-se alguns minutos entre as capturas para que o módulo retornasse à temperatura ambiente.

Figura 42 – Superfície de resfriamento do módulo termoeletrônico



Fonte: Do autor (2021).

Estes testes tinham por objetivo apenas verificar a distribuição térmica da superfície dos módulos, uma vez que a área de condução térmica não é a área total da superfície do módulo, mas sim a dos pallets semicondutores.

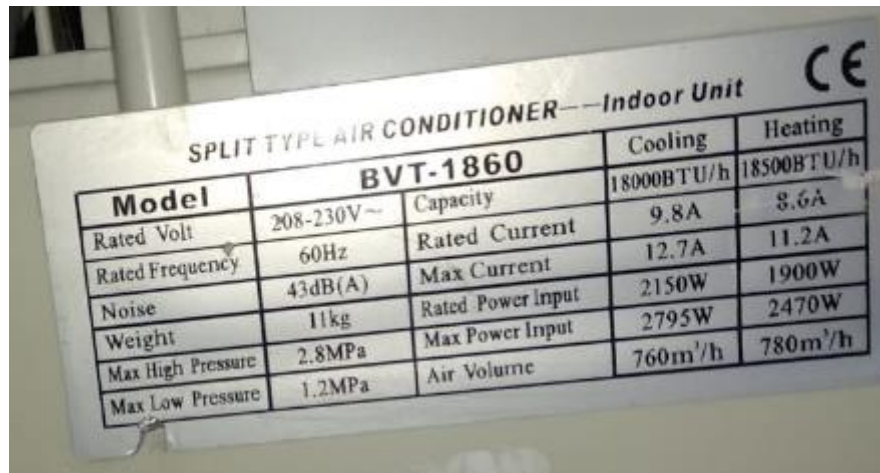
A temperatura que o módulo pode atingir do lado de refrigeração é dependente do sistema de dissipação térmica do lado de aquecimento.

4.2 Construção do protótipo

A construção do protótipo iniciou-se com a aquisição do equipamento comercial de condicionador de ar, para serem utilizados os trocadores de calor e o sistema de ventiladores.

As características do equipamento adquirido para ser utilizado no protótipo são apresentadas na Figura 43

Figura 43 – Características do condicionador de ar utilizado



SPLIT TYPE AIR CONDITIONER—Indoor Unit			Cooling	Heating
Model	BVT-1860		18000BTU/h	18500BTU/h
Rated Volt	208-230V~	Capacity	9.8A	8.6A
Rated Frequency	60Hz	Rated Current	12.7A	11.2A
Noise	43dB(A)	Max Current	2150W	1900W
Weight	11kg	Rated Power Input	2795W	2470W
Max High Pressure	2.8MPa	Max Power Input	760m³/h	780m³/h
Max Low Pressure	1.2MPa	Air Volume		

Fonte: Do autor (2021).

A Figura 44 apresenta a unidade externa do sistema, que foi desmontada para limpeza e para remoção do sistema de compressor, que não será utilizado. O trocador de calor é do tipo tubo de cobre, possuindo aletas de alumínio envolvidas nos tubos, para o aumento da área de troca térmica. O percurso da tubulação do trocador de calor não foi alterado.

Figura 44 – Unidade externa do sistema



Fonte: Do autor (2021).

A Figura 45 apresenta a unidade interna do sistema, que foi apenas desmontada para limpeza, mantendo todas suas características originais de funcionamento do sistema, tendo seu trocador de calor com as mesmas

características e materiais construtivos da unidade externa. O percurso da tubulação do trocador de calor não foi alterado.

Figura 45 – Unidade interna do sistema



Fonte: Do autor (2021).

Para o sistema de troca térmica da superfície dos módulos com o fluido condutor, foram confeccionados dois trocadores de calor, que também servem como reservatório do fluido.

Os reservatórios foram confeccionados com a utilização de um tubo retangular de alumínio de 100mm x 50mm, com altura total de 300mm, tendo a sua extremidade inferior fechada com uma barra chata de alumínio de 2" x 1/8" com 100mm de comprimento e a extremidade superior com uma chapa de acrílico incolor, permitindo a visualização do nível e o escoamento do fluido dentro do reservatório.

Buscando aumentar a área térmica de contato do fluido com a superfície do módulo, utilizou-se 4 trocadores de calor sólidos com aletas de alumínio, conforme apresentado na Figura 46, que foram instalados dentro dos reservatórios.

Figura 46 – Trocador de calor com aletas de alumínio

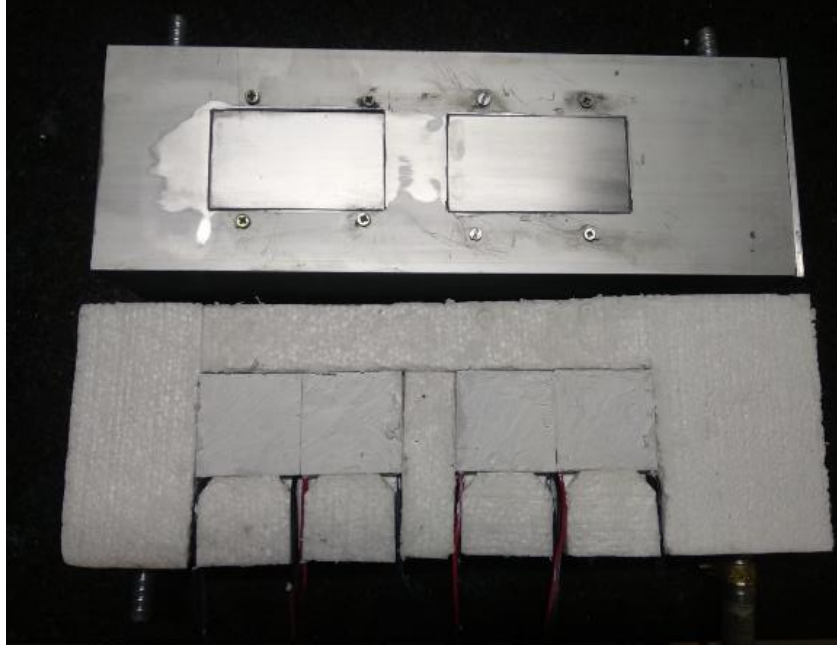


Fonte: Do autor (2021).

Com a configuração de montagem dos módulos já definida, em duplo estágio, realizou-se a montagem definitiva do sistema de troca térmica, realizando a montagem dos módulos com a utilização de pasta térmica entre as superfícies de contato e a

utilização de Poliestireno Expandido (EPS) entre os trocadores de calor, envolvendo as laterais dos módulos, conforme representado na Figura 47.

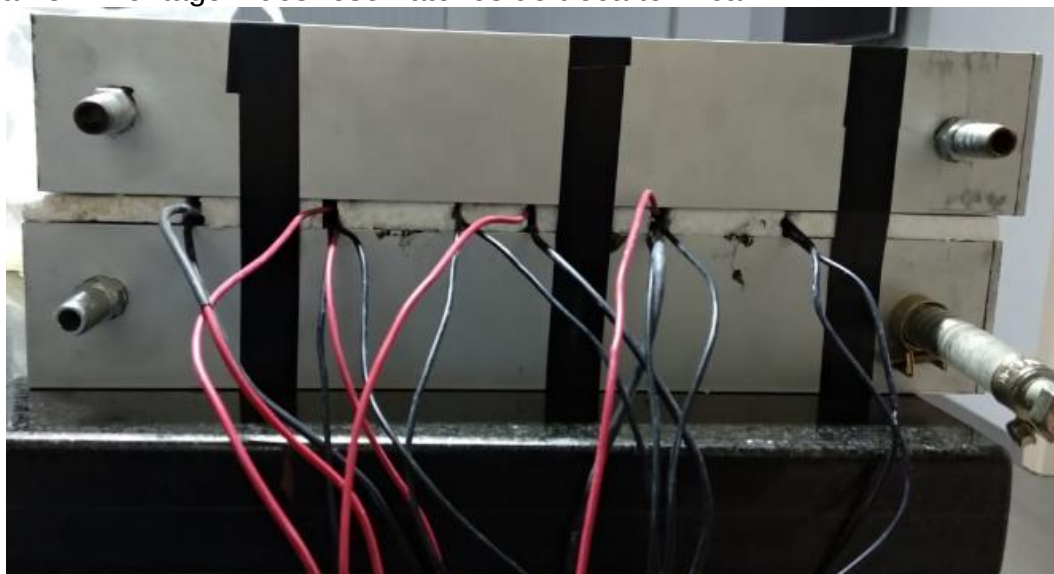
Figura 47 – Montagem do dos módulos termoeletrônicos



Fonte: Do autor (2021).

A Figura 48 representa o sistema dos reservatórios de troca térmica já montado com os módulos termoeletrônicos sendo fixados apenas pela compressão realizada pelos reservatórios após a instalação de uma abraçadeira metálica.

Figura 48 – Montagem dos reservatórios de troca térmica



Fonte: Do autor (2021).

Para o sistema de bombeamento do fluido, foram utilizadas duas bombas elétricas de combustível, de origem automotiva e usadas, uma para o circuito de

bombeamento de água fria e outra para o circuito de bombeamento de dissipação da água quente, conforme apresentado na Figura 49.

Figura 49 – Montagem dos reservatórios de troca térmica



Fonte: Do autor (2021).

Para a condução do fluido utilizou-se mangueiras do tipo PVC Cristal de 3/8" com 1,5mm de espessura de parede, não sendo realizado o isolamento térmico das mesmas.

Após a montagem das mangueiras foi realizado o isolamento térmico do reservatório de refrigeração com a utilização de EPS, buscando minimizar as perdas térmicas do reservatório com o ambiente externo.

Os termopares dos termômetros foram instalados nas mangueiras de PVC, para realizar a medição de temperatura do fluido, próximas a entrada e saída dos reservatórios, conforme representado na Figura 50.

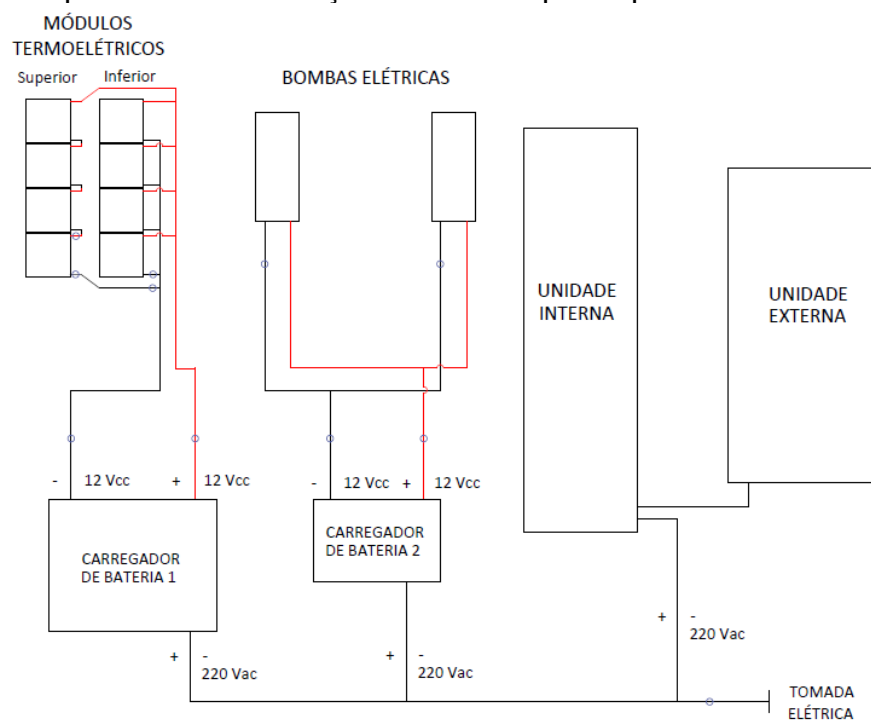
Figura 50 – Montagem dos reservatórios de troca térmica



Fonte: Do autor (2021).

A Figura 51 demonstra o esquema elétrico de alimentação de todo o equipamento e dos pontos das medições elétricas de corrente e tensão realizados para a análise do sistema, sendo representados pelos círculos sobre a representação dos fios.

Figura 51 – Esquema da alimentação elétrica do protótipo



Fonte: Do autor (2021).

O sistema elétrico completo abrange o carregador de bateria 1, com potenciômetro, que realizou a alimentação dos módulos termoeletricos e permitiu a variação da tensão de alimentação de 0 Vdc a 13 Vdc, o carregador de bateria 2, para a alimentação das duas bombas elétricas, possuindo a alimentação da tensão fixa em 10,8 Vdc, e o equipamento do condicionador de ar comercial, que opera com tensão de 220 Vac.

Todos equipamentos foram ligados em uma única extensão elétrica, para que fosse possível realizar a medição da corrente elétrica consumida por todo o equipamento.

4.3 Análise da configuração dos módulos

Durante a construção do protótipo, antes da montagem definitiva do sistema, realizou-se o teste de configuração de montagem do sistema, para identificar qual a melhor forma de disposição construtiva e alimentação elétrica do sistema, sendo realizado três análises.

A primeira análise foi realizada com o módulo em simples estágio, conforme apresentado na Figura 52, sendo fixado à superfície do reservatório de troca térmica para dissipação do lado quente do módulo, foi utilizado pasta térmica entre as superfícies de contato do módulo com o dissipador, buscando-se reduzir a resistência térmica de contato.

Figura 52 – Módulo termoeletrico em simples estágio



Fonte: Do autor (2021).

O dissipador térmico operou com o sistema de bomba elétrica em funcionamento, realizando a circulação da água do sistema, bombeando do

reservatório de dissipação térmica para o trocador de calor, que estava com o sistema de ventilador inoperante.

Na superfície de refrigeração foi fixado o termopar do termômetro, para medir a temperatura que o módulo consegue atingir de acordo com a tensão de alimentação. Para a identificação da tensão de alimentação e da corrente elétrica consumida pelo módulo utilizou-se dois multímetros que ficaram conectados ao sistema elétrico.

A alimentação elétrica do módulo foi fornecida através da utilização do carregador de bateria com potenciômetro, sendo variado a tensão de alimentação de 0 Vdc até 13 Vdc. Para a alimentação elétrica do sistema de bomba elétrica, utilizou-se do carregador de bateria com alimentação constante de 10,8 Vdc.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos com o teste, sendo realizado a variação da tensão de alimentação de 0 Vdc até 13 Vdc, com o incremento de 1 Vdc para cada medição, sendo mantido a mesma alimentação por 5 minutos para a estabilização da temperatura da superfície do módulo para a leitura. A temperatura ambiente no dia da análise era de 25°C.

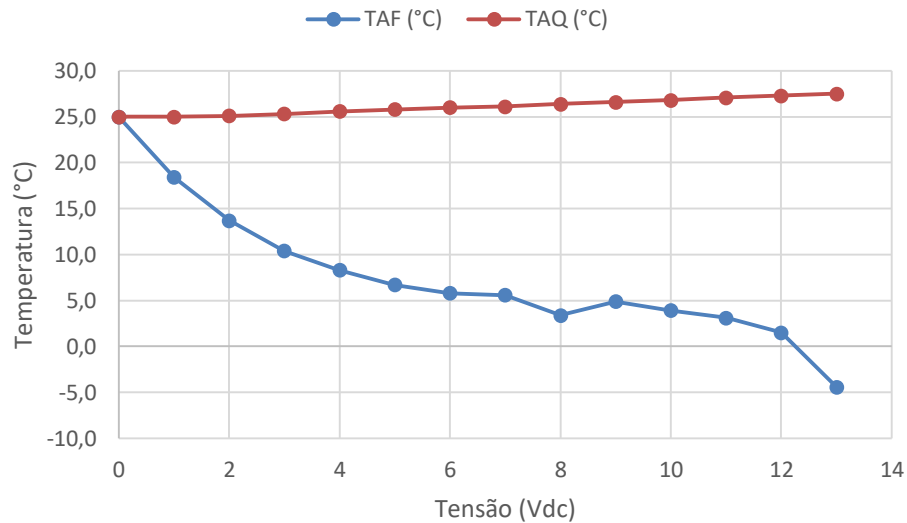
Tabela 3 – Resultados da análise de um módulo em simples estágio

Tensão (V)	Corrente (A)	Temperatura Água de dissipação (°C)	Temperatura Superfície do Módulo (°C)
0	0	25,0	25,0
1	0,25	25,0	18,4
2	0,44	25,1	13,7
3	0,68	25,3	10,4
4	0,86	25,6	8,3
5	1,08	25,8	6,7
6	1,32	26,0	5,8
7	1,58	26,1	5,6
8	1,81	26,4	3,4
9	2,02	26,6	4,9
10	2,24	26,8	3,9
11	2,48	27,1	3,1
12	2,71	27,3	1,5
13	2,91	27,5	-4,4

Fonte: Do autor (2021).

Com os dados obtidos foi possível criar o gráfico apresentado na Figura 53, demonstrando uma melhor visualização do comportamento térmico em relação à tensão de alimentação do módulo termoeletrico em simples estágio.

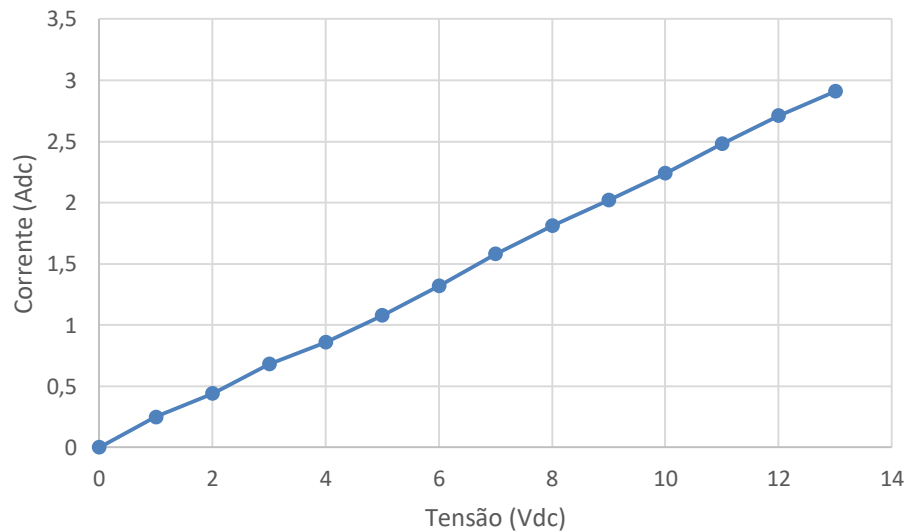
Figura 53 – Comportamento da temperatura em relação a tensão fornecida para módulo em simples estágio



Fonte: Do autor (2021).

Ainda com os dados obtidos, pode-se construir o gráfico da Figura 54, apresentando o comportamento da corrente em relação a variação da tensão de alimentação do módulo termoeletrico em simples estágio.

Figura 54 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo em simples estágio



Fonte: Do autor (2021).

A segunda análise foi realizada de modo similar a primeira, alterando apenas o módulo para duplo estágio, conforme apresentado na Figura 55. Ele foi fixado à superfície do reservatório de troca térmica para dissipação do lado quente do módulo

inferior, já o módulo superior foi fixado com a sua superfície de aquecimento sobre a superfície de refrigeração do módulo inferior.

Figura 55 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo em simples estágio



Fonte: Do autor (2021).

O dissipador térmico operou conforme o teste anterior.

O termopar do termômetro foi fixado na superfície de refrigeração do módulo superior, para medir a temperatura que se consegue atingir de acordo com a tensão de alimentação.

Para a identificação da tensão de alimentação e da corrente elétrica consumida pelo módulo inferior, utilizou-se dois multímetros, que ficaram conectados ao sistema elétrico, para o módulo superior utilizou-se outro multímetro, realizando as leituras pontuais, uma vez que a alimentação manteve-se a mesma durante a análise.

A alimentação elétrica dos módulos foi fornecida através da utilização de dois carregadores de bateria, o módulo inferior foi alimentado com o carregador que possui um potenciômetro, sendo variado a tensão de alimentação de 0 Vdc até 13 Vdc.

O módulo superior e a bomba elétrica foram alimentados com o carregador que não possui potenciômetro, mantendo-se constante a tensão fornecida de 10,8 Vdc.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com o teste, sendo realizado a variação da tensão de alimentação de 0 Vdc até 13 Vdc do módulo inferior, com o incremento de 1 Vdc para cada medição, mantendo-se a mesma alimentação por 5 minutos para a estabilização da temperatura da superfície do módulo superior para a leitura.

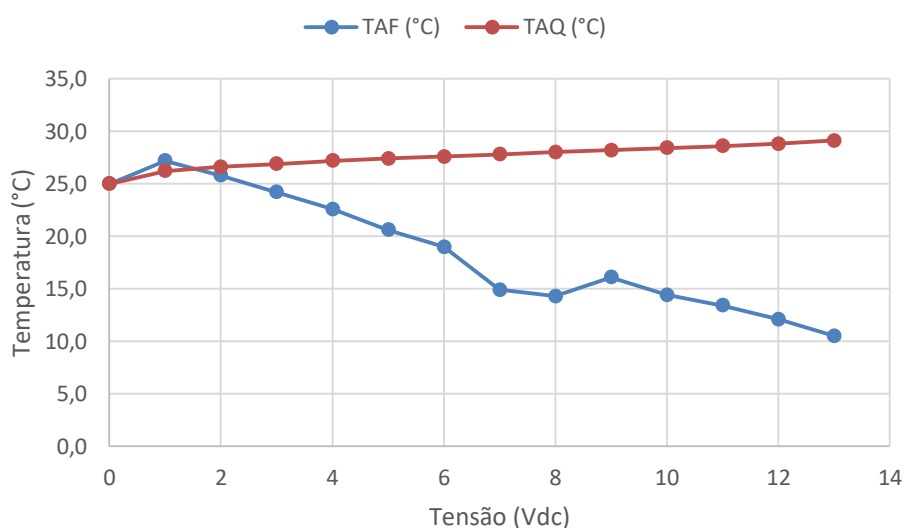
Tabela 4 – Resultados da análise do módulo inferior na configuração de duplo estágio com superior fixo e inferior variando

Tensão (V)	Corrente (A)	Temperatura Água de dissipação (°C)	Temperatura Superfície do Módulo (°C)
0	0	25,0	25,0
1	0,78	26,2	27,2
2	1,00	26,6	25,8
3	1,18	26,9	24,2
4	1,36	27,2	22,6
5	1,56	27,4	20,6
6	1,75	27,6	19,0
7	1,94	27,8	14,9
8	2,15	28,0	14,3
9	2,33	28,2	16,1
10	2,51	28,4	14,4
11	2,72	28,6	13,4
12	2,90	28,8	12,1
13	3,00	29,1	10,5

Fonte: Do autor (2021).

Com os dados obtidos pode-se criar o gráfico representado na Figura 56, demonstrando uma melhor visualização do comportamento térmico em relação a variação da tensão de alimentação do módulo termoeletrico em duplo estágio, sendo o superior alimentado com tensão constante e o inferior com variação da tensão.

Figura 56 – Comportamento da temperatura em relação a tensão fornecida para módulo inferior na configuração de duplo estágio, com o inferior variando a tensão e o superior com tensão fixa

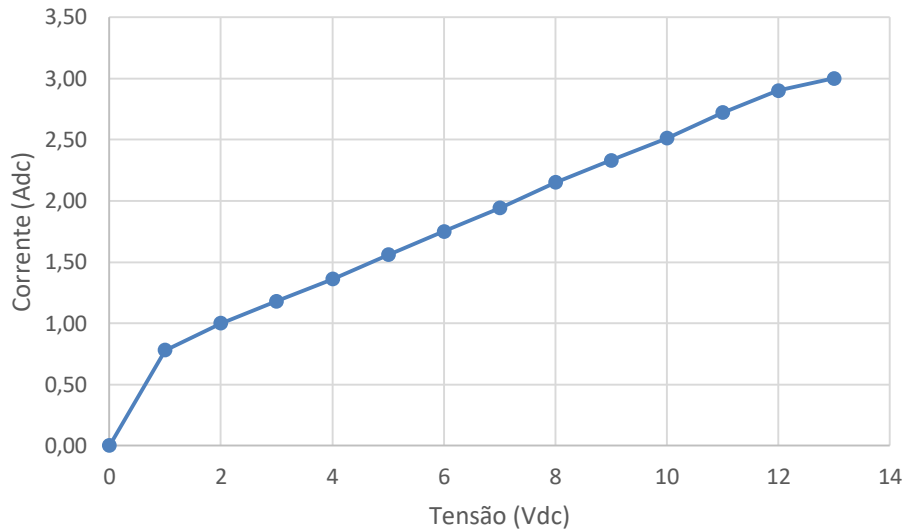


Fonte: Do autor (2021).

Ainda com os dados obtidos, pode-se construir o gráfico da Figura 57, apresentando o comportamento da corrente em relação a variação da tensão de alimentação para o módulo inferior, já a Figura 58 apresenta o comportamento para o

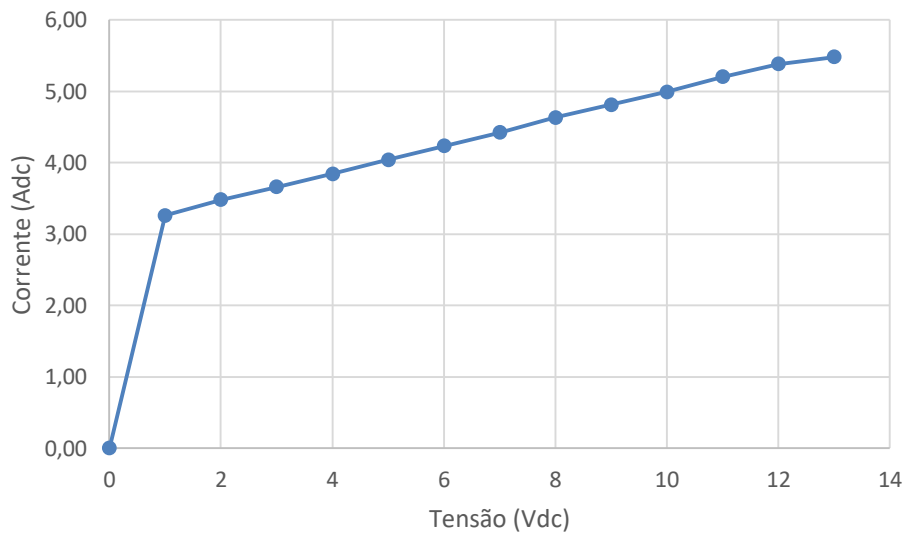
módulo termoeletrico em duplo estágio, com o superior alimentado com tensão constante e o inferior possuindo variação da tensão.

Figura 57 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo inferior



Fonte: Do autor (2021).

Figura 58 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo em duplo estágio, com o inferior variando a tensão e o superior com tensão fixa



Fonte: Do autor (2021).

A terceira análise foi realizada com o módulo em duplo estágio, conforme apresentado na segunda análise, não ocorrendo nenhuma modificação no sistema de fixação do módulo e do termopar, modificando-se apenas as ligações elétricas dos módulos.

A Figura 59 apresenta a fixação dos módulos e do termopar para a realização das análises.

Figura 59 – Fixação do módulo termoeletrico para análise preliminar



Fonte: Do autor (2021).

Para a identificação da tensão de alimentação e da corrente elétrica consumida pelo módulo superior, utilizou-se dois multímetros, que ficaram conectados ao sistema elétrico, para o módulo inferior utilizou-se outro multímetro, realizando as leituras pontuais, uma vez que a alimentação manteve-se a mesma durante a análise.

A alimentação elétrica dos módulos foi realizada conforme o teste anterior, alterando-se apenas o módulo que foi variado a tensão de alimentação.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos com o teste, sendo realizado a variação da tensão de alimentação de 0 Vdc até 13 Vdc do módulo superior, com o incremento de 1 Vdc para cada medição, mantendo-se a mesma alimentação por 5 minutos para a estabilização da temperatura da superfície do módulo para a leitura.

Tabela 5 – Resultados da análise do módulo superior na configuração de duplo estágio com superior variando e inferior fixo

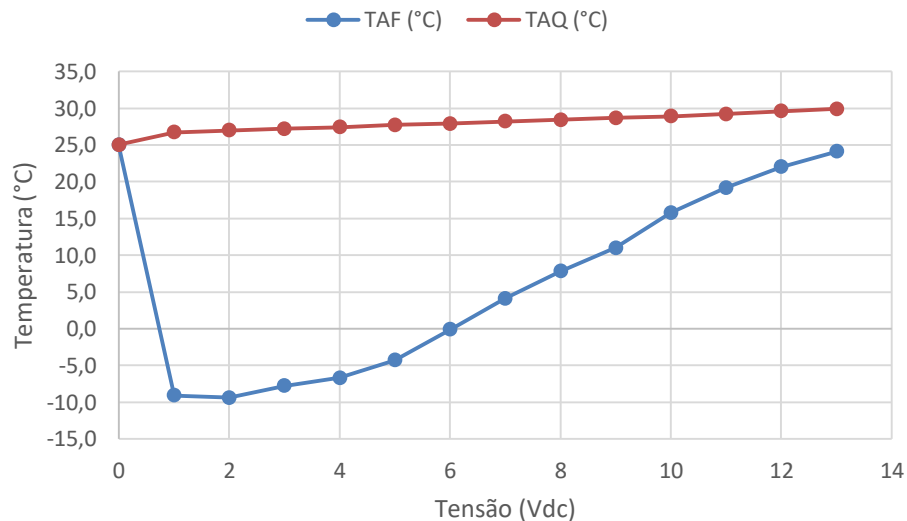
Tensão (V)	Corrente (A)	Temperatura Água de dissipação (°C)	Temperatura Superfície do Módulo (°C)
0	0	25,0	25,0
1	0,31	26,7	-9,1
2	0,52	27,0	-9,4
3	0,74	27,2	-7,8
4	0,98	27,4	-6,7
5	1,18	27,7	-4,3

6	1,39	27,9	-0,1
7	1,53	28,2	4,1
8	1,70	28,4	7,8
9	1,86	28,7	11,0
10	2,00	28,9	15,8
11	2,14	29,2	19,2
12	2,27	29,6	22,0
13	2,40	29,9	24,1

Fonte: Do autor (2021).

Com os dados obtidos pode-se criar o gráfico da Figura 60, apresentando uma melhor visualização do comportamento térmico em relação a variação da tensão de alimentação do módulo termoeletrico em duplo estágio, sendo o inferior alimentado com tensão constante e o superior com variação da tensão.

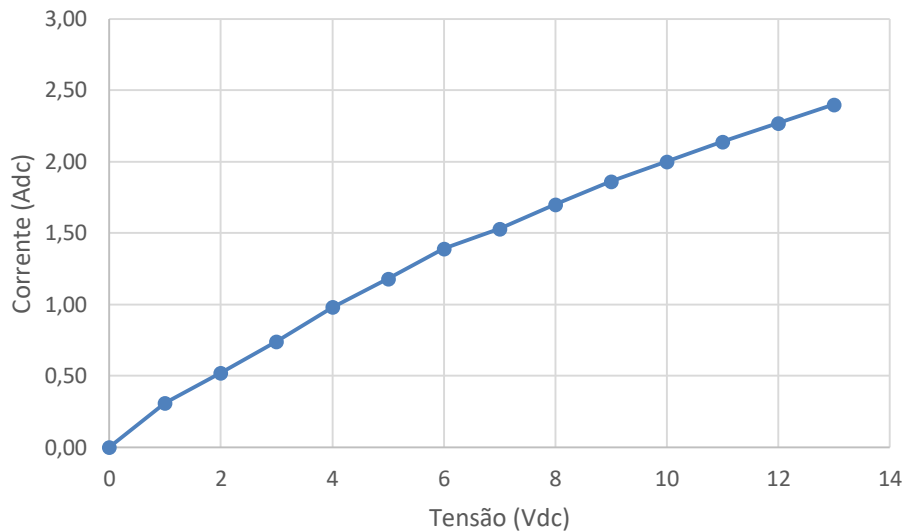
Figura 60 – Comportamento da temperatura em relação a tensão fornecida para módulo superior na configuração de duplo estágio, com o inferior fixo e o superior variando a tensão



Fonte: Do autor (2021).

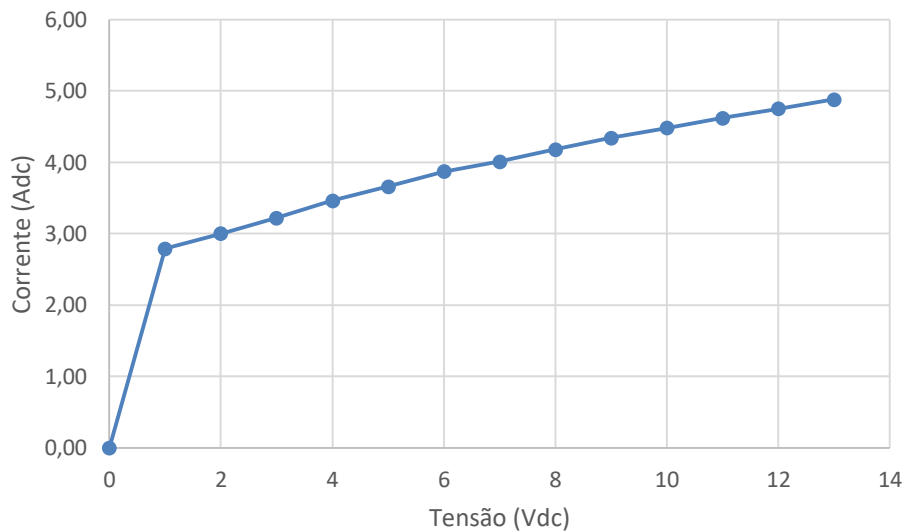
Ainda com os dados obtidos, pode-se construir o gráfico apresentado pela Figura 61, demonstrando o comportamento da corrente em relação a variação da tensão de alimentação para o módulo superior, já a Figura 62 apresenta o comportamento do módulo termoeletrico em duplo estágio, com o superior possuindo variação da tensão de alimentação e com o inferior tendo a sua tensão constante.

Figura 61 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo superior



Fonte: Do autor (2021).

Figura 62 – Comportamento da corrente em relação a tensão fornecida para módulo em duplo estágio, com o inferior com tensão fixa e o superior variando a tensão

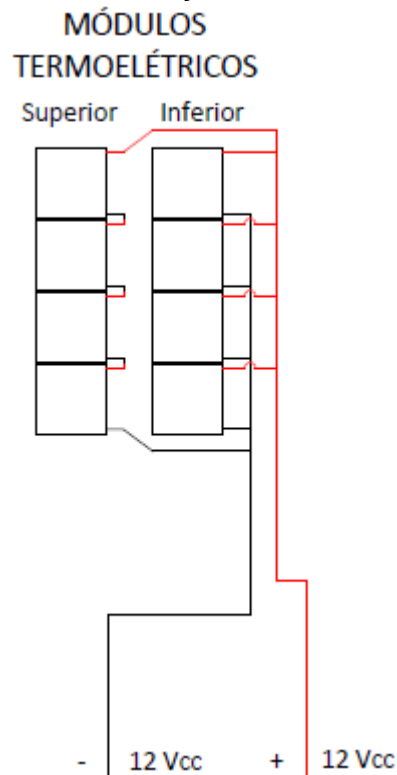


Fonte: Do autor (2021).

Com estas análises pode-se observar que o melhor resultado foi obtido com os módulos em duplo estágio, sendo o inferior alimentado com uma tensão de 10,8 Vdc e o superior com 2 Vdc, onde obteve-se a menor temperatura de superfície do módulo, de -9,4°C.

Através desta análise preliminar definiu-se a configuração de montagem definitiva do sistema, conforme representado no esquema elétrico da Figura 63.

Figura 63 – Esquema elétrico de alimentação dos módulos



Fonte: Do autor (2021).

A montagem definitiva do sistema contempla a utilização dos módulos em duplo estágio, sendo utilizado no total 8 módulos, 4 módulos inferiores ligados em paralelo ao sistema de alimentação de 12Vdc e os 4 módulos superiores foram ligados em série entre si, com a alimentação ligada em paralelo ao sistema inferior.

4.4 Testes e coleta de dados

Com a montagem definitiva do protótipo realizada, deu-se início aos testes definitivos para avaliar o comportamento e funcionamento do equipamento.

4.4.1 Medição da vazão do sistema

A medição da vazão do sistema foi realizada através de cinco tomadas de medidas, onde coletou-se o fluido do retorno dos trocadores de calor. A coleta foi realizada com o sistema de bombeamento ligado, despejando a água em um

recipiente, ao início da contagem do tempo, a mangueira é redirecionada para a proveta e mantida até atingir tempo determinado, finalizado o tempo, a mangueira foi desviada da proveta, voltando a despejar a água no recipiente.

Os dados coletados são apresentados na Tabela 6, para a bomba 1, que é a utilizada para o sistema de bombeamento do reservatório para a unidade interna do condicionador de ar, a Tabela 7 apresenta a vazão da bomba 2, que é responsável pelo bombeamento do reservatório para a unidade externa.

Tabela 6 – Medição da vazão do sistema da Bomba 1

	Volume (L)	Tempo (segundos)	Vazão (L/s)	Vazão mássica (kg/s)
Medida 1	0,089	1,95	0,0456	0,0458
Medida 2	0,091	2,08	0,0438	0,0439
Medida 3	0,091	1,98	0,0460	0,0461
Medida 4	0,077	1,78	0,0433	0,0434
Medida 5	0,092	2,10	0,0438	0,0439
Média	0,088	1,97	0,0445	0,0446

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 7 – Medição da vazão do sistema da Bomba 2

	Volume (L)	Tempo (segundos)	Vazão (L/s)	Vazão mássica (kg/s)
Medida 1	0,075	2,15	0,0349	0,0350
Medida 2	0,074	2,01	0,0368	0,0369
Medida 3	0,081	2,43	0,0333	0,0334
Medida 4	0,081	2,23	0,0363	0,0364
Medida 5	0,093	2,73	0,0341	0,0342
Média	0,081	2,31	0,0351	0,0352

Fonte: Do autor (2021).

4.4.2 Análise do sistema

Foram realizados cinco testes com o protótipo, mantendo a mesma configuração de instalação dos equipamentos.

A unidade interna do sistema foi instalada dentro de um ambiente com um volume de 5,28m³ e a unidade externa, que contempla o sistema de refrigeração termoelétrico, ao lado de fora deste ambiente. O ambiente a ser refrigerado é constituído por paredes de alvenaria, sendo revestido com pisos e azulejos de porcelanato. O vão de acesso ao ambiente foi fechado com a utilização de filme de

plástico incolor, de modo a possibilitar a leitura do termômetro instalado internamente no ambiente.

A alimentação elétrica dos módulos manteve-se a mesma para os três testes, sendo a tensão de alimentação do sistema fixada em 11 Vdc e corrente de 7,35 Adc. O sistema de ventiladores do condicionador de ar é alimentado com 220Vcc e consome 0,3Acc. O sistema de bombas elétricas foi alimentado com 10,8 Vdc e 5,27 Adc.

O primeiro teste foi realizado com as duas bombas elétricas ligadas e os ventiladores da unidade interna e externa ligados. A coleta dos dados ocorreu a cada 10 minutos, com tempo total de análise de 80 minutos. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 8.

A Tabela 8 apresenta os valores coletados no instante de tempo (t) para o valores da temperatura da água fria de entrada do reservatório (T_{EF}), temperatura de saída da água fria do reservatório (T_{SF}), temperatura da água de dissipação do sistema na entrada do reservatório de água quente (T_{EQ}), temperatura da água de dissipação do sistema na saída do reservatório de água quente (T_{SQ}) e a temperatura do ambiente interno (T_I). A temperatura do ambiente externo para esta análise encontrava-se em 18°C.

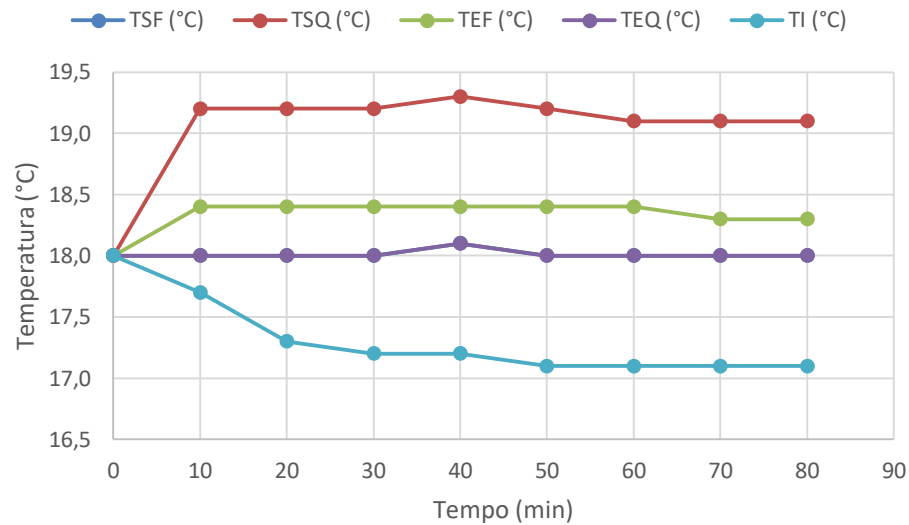
Tabela 8 – Resultados da análise do sistema com as duas bombas ligadas e os dois ventiladores acionados

t (min)	T_{EF} (°C)	T_{SF} (°C)	T_{EQ} (°C)	T_{SQ} (°C)	T_I (°C)
0	18,0	18,0	18,0	18	18
10	18,4	17,8	18,0	19,2	17,7
20	18,4	17,8	18,0	19,2	17,3
30	18,4	17,8	18,0	19,2	17,2
40	18,4	17,8	18,1	19,3	17,2
50	18,4	17,8	18,0	19,2	17,1
60	18,4	17,8	18,0	19,1	17,1
70	18,3	17,8	18,0	19,1	17,1
80	18,3	17,8	18,0	19,1	17,1

Fonte: Do autor (2021).

Com os dados obtidos pode-se criar o gráfico da Figura 64, apresentando uma melhor visualização do comportamento térmico em relação ao tempo de análise.

Figura 64 – Comportamento térmico do primeiro teste



Fonte: Do autor (2021).

O segundo teste foi realizado com as duas bombas elétricas ligadas e os ventiladores da unidade interna e externa desligados. A coleta dos dados ocorreu conforme a análise anterior. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 9. A temperatura do ambiente externo para esta análise encontrava-se em 18°C.

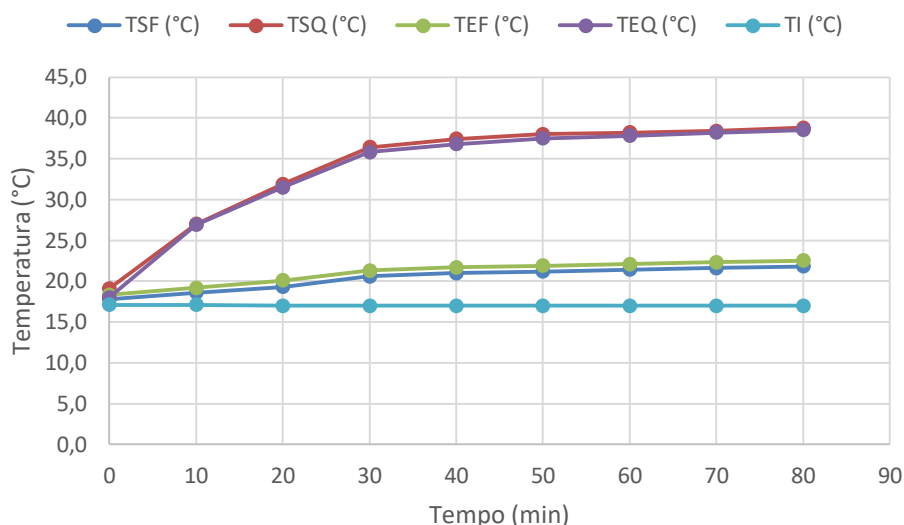
Tabela 9 – Resultados da análise do sistema com as duas bombas ligadas e os dois ventiladores desligados

t (min)	T _{EF} (°C)	T _{SF} (°C)	T _{EQ} (°C)	T _{SQ} (°C)	T _I (°C)
0	18,3	17,8	18,0	19,1	17,1
10	19,2	18,6	26,9	27,0	17,1
20	20,1	19,3	31,5	31,9	17,0
30	21,3	20,6	35,8	36,4	17,0
40	21,7	21,0	36,8	37,4	17,0
50	21,9	21,2	37,5	38,0	17,0
60	22,1	21,4	37,8	38,2	17,0
70	22,3	21,6	38,2	38,4	17,0
80	22,5	21,8	38,5	38,8	17,0

Fonte: Do autor (2021).

Com os dados obtidos pode-se criar o gráfico da Figura 65, apresentando uma melhor visualização do comportamento térmico em relação ao tempo de análise.

Figura 65 – Comportamento térmico do segundo teste



Fonte: Do autor (2021).

O terceiro teste foi realizado com apenas uma bomba elétrica ligada, a do sistema de dissipação de calor, e o ventilador da unidade externa ligado. A coleta dos dados ocorreu conforme as análises anteriores. Para esta análise foi desconsiderada a temperatura do ambiente interno, uma vez que não ocorreu circulação de fluido por este ambiente. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 10. A temperatura do ambiente externo para esta análise encontrava-se em 17°C.

A Tabela 10 apresenta os valores coletados no instante de tempo (t) para o valores da temperatura da água fria dentro do reservatório (T_{AF}), temperatura da água de dissipação do sistema na entrada do reservatório de água quente (T_{EQ}) e a temperatura da água de dissipação do sistema na saída do reservatório de água quente (T_{SQ}). A temperatura do ambiente externo para esta análise encontrava-se em 17°C.

Tabela 10 – Resultados da análise do sistema com apenas a bomba e o ventilador do sistema de dissipação de calor ligados

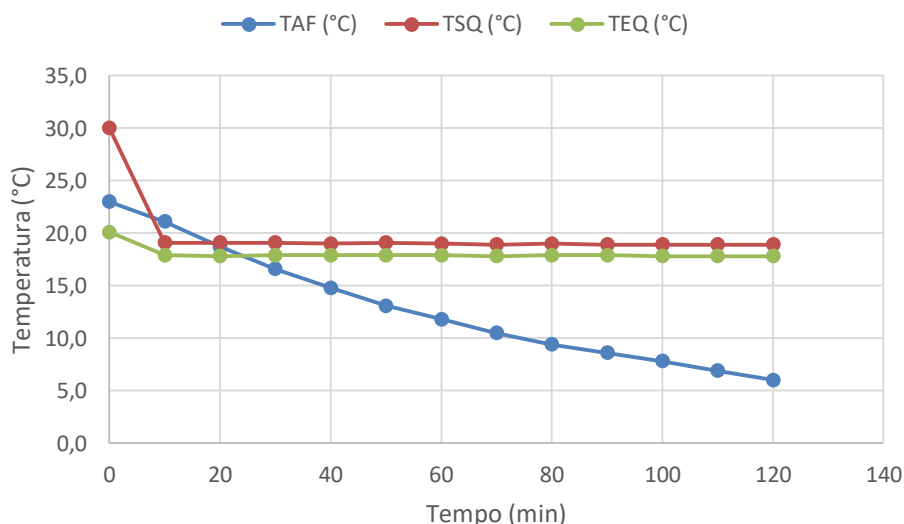
t (min)	T_{AF} (°C)	T_{EQ} (°C)	T_{SQ} (°C)
0	23,0	20,1	30,0
10	21,1	17,9	19,1
20	18,7	17,8	19,1
30	16,6	17,9	19,1
40	14,8	17,9	19,0
50	13,1	17,9	19,1
60	11,8	17,9	19,0
70	10,5	17,8	18,9
80	9,4	17,9	19,0
90	8,6	17,9	18,9

100	7,8	17,8	18,9
110	6,9	17,8	18,9
120	6,0	17,8	18,9

Fonte: Do autor (2021).

Com os dados obtidos pode-se criar o gráfico da Figura 66, apresentando uma melhor visualização do comportamento térmico em relação ao tempo de análise.

Figura 66 – Comportamento térmico do terceiro teste



Fonte: Do autor (2021).

O quarto teste foi realizado com apenas uma bomba elétrica ligada, a do sistema de dissipação de calor, e ambos ventiladores desligados. A coleta dos dados ocorreu conforme as análises anteriores. Para esta análise foi desconsiderada a temperatura do ambiente interno, uma vez que não ocorreu circulação de fluido por este ambiente, sendo apenas considerado a temperatura do reservatório do fluido de refrigeração. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 11. A temperatura do ambiente externo para esta análise encontrava-se em 15,6°C.

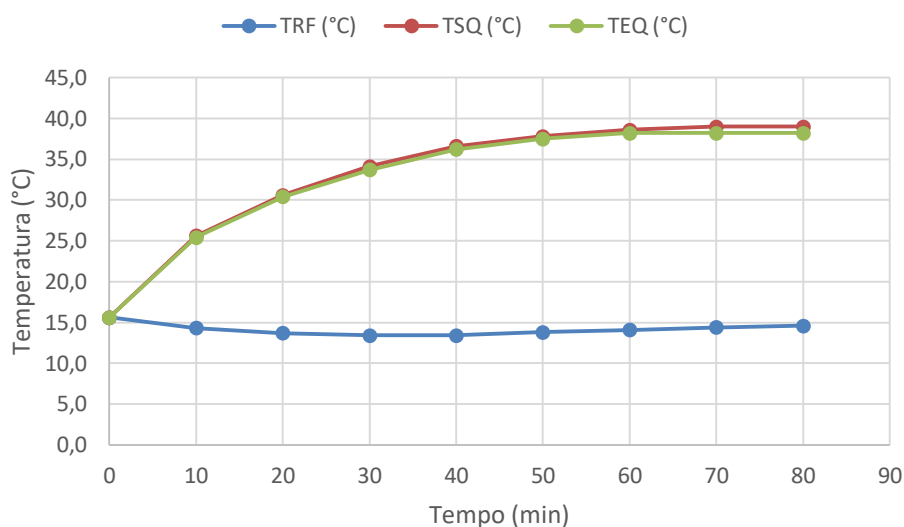
Tabela 11 – Resultados da análise do sistema com apenas a bomba do sistema de dissipação de calor ligados

t (min)	T _{AF} (°C)	T _{EQ} (°C)	T _{SQ} (°C)
0	15,6	15,6	15,6
10	14,3	25,4	25,6
20	13,7	30,4	30,6
30	13,4	33,7	34,1
40	13,4	36,2	36,6
50	13,8	37,5	37,8
60	14,1	38,2	38,6
70	14,4	38,2	39,0
80	14,6	38,2	39,0

Fonte: Do autor (2021).

Com os dados obtidos pode-se criar o gráfico da Figura 67, apresentando uma melhor visualização do comportamento térmico em relação ao tempo de análise.

Figura 67 – Comportamento térmico do quarto teste



Fonte: Do autor (2021).

O quinto teste foi realizado com duas bombas elétricas ligadas e os ventiladores da unidade interna e externa ligados. A coleta dos dados ocorreu conforme as análises anteriores. Para esta análise foi realizada a modificação no sistema para realizar o aquecimento do ambiente interno. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 12. A temperatura do ambiente externo para esta análise encontrava-se em 16°C.

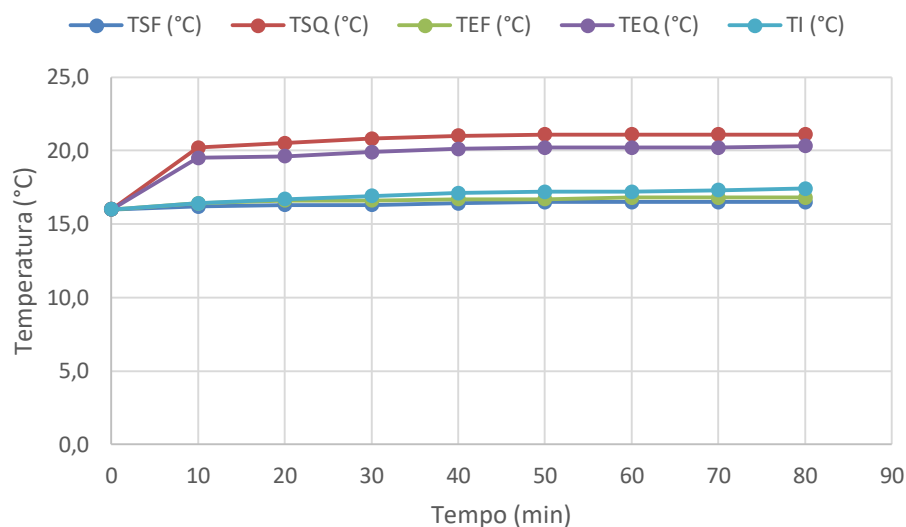
Tabela 12 – Resultados da análise do sistema de aquecimento com as duas bombas ligadas e os dois ventiladores acionados

t (min)	T _{EF} (°C)	T _{SF} (°C)	T _{EQ} (°C)	T _{SQ} (°C)	T _I (°C)
0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0
10	16,4	16,2	19,5	20,2	16,4
20	16,6	16,3	19,6	20,5	16,7
30	16,6	16,3	19,9	20,8	16,9
40	16,7	16,4	20,1	21,0	17,1
50	16,7	16,5	20,2	21,1	17,2
60	16,8	16,5	20,2	21,1	17,2
70	16,8	16,5	20,2	21,1	17,3
80	16,8	16,5	20,3	21,1	17,4

Fonte: Do autor (2021).

Com os dados obtidos pode-se criar o gráfico da Figura 68, apresentando uma melhor visualização do comportamento térmico em relação ao tempo de análise.

Figura 68 – Comportamento térmico do quinto teste



Fonte: Do autor (2021).

4.4.3 Cálculo do COP

Com os dados obtidos nos testes é possível realizar o cálculo do COP do sistema termoeletrico e do protótipo, identificando a capacidade real de refrigeração do equipamento.

Para o cálculo do COP utiliza-se da Equação 6 e Equação 7 apresentadas no referencial bibliográfico, tendo seus resultados para o sistema termoeletrico apresentados na Tabela 12, e para o protótipo, na Tabela 13.

O cálculo do COP do sistema termoeletrico considerou apenas a potência elétrica consumida pelos módulos, sendo esta em corrente continua. Para o cálculo do COP do protótipo, utilizou-se a potência elétrica total consumida pelo sistema, proveniente de corrente alternada.

Tabela 13 – COP do sistema termoeletrico

	<i>COP</i>
Análise 1	0,911
Análise 2	1,275
Análise 3	0,161
Análise 4	0,012
Análise 5	1,458

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 14 – COP do protótipo

	<i>COP</i>
Análise 1	0,209
Análise 2	0,293
Análise 3	0,037
Análise 4	0,003
Análise 5	0,335

Fonte: Do autor (2021).

4.4.4 Análise dos resultados

Na análise para a definição do sistema construtivo de montagem dos módulos termoeletrônicos conseguimos verificar que o módulo em simples estágio conseguiu atingir uma temperatura de $-4,4^{\circ}\text{C}$.

Analizando a utilização dos módulos em duplo estágio observamos que realizando a alimentação do módulo inferior com uma tensão menor que a do módulo superior, ele apresenta um desempenho inferior ao módulo em simples estágio. O desempenho do sistema em duplo estágio só apresenta resultados relevantes com a alimentação do módulo superior sendo menor que a do módulo inferior, onde obteve-se na melhor análise $-9,4^{\circ}\text{C}$.

Levando somente em consideração a capacidade de refrigeração da superfície do módulo, o módulo em duplo estágio apresenta um melhor desempenho, entretanto os custos relacionados a construção de um equipamento e seu consumo elétrico, podem tornar o módulo em simples estágio a melhor escolha.

Ao observarmos o comportamento da corrente elétrica em relação a tensão, verificamos que a resistência térmica do sistema exerce influência direta no desempenho do módulo, influenciando em seu consumo elétrico.

Analizando o protótipo em sua montagem definitiva, o primeiro teste com o sistema de bombas e ventiladores acionados, demonstra que o protótipo conseguiu realizar uma pequena redução da temperatura do ambiente analisado. Entretanto, não apresentou um desempenho satisfatório, dependendo de um tempo longo para atingir os resultados.

Na segunda análise e na quarta análise, que realizou-se com os sistemas de ventiladores desligados, comprovamos que o desempenho do sistema termoelétrico para refrigeração está diretamente ligado à eficiência do processo de dissipação de calor do lado de aquecimento do módulo.

Na terceira análise, onde o sistema de dissipação estava com a bomba e o ventilador acionados, observamos que o protótipo apresentou uma boa capacidade de refrigeração do fluido, tendo atingido 6°C, entretanto o tempo necessário para que isso fosse possível foi demasiadamente longo, o que dificulta a sua aplicação em sistemas de refrigeração.

Na quinta análise, a qual foi utilizada para verificar a capacidade de aquecimento do ambiente interno, tendo seu sistema de bombas e ventiladores acionados, apresentou um incremento temperatura no ambiente de apenas 1,4°C, realizando o aquecimento do ar, apesar do tempo demasiado para que isto ocorresse.

O protótipo apresentou uma corrente elétrica de 1,6 Acc, resultando na potência elétrica consumida de 352W.

Analisando os resultados do COP para o protótipo e apenas para o sistema termoelétrico, verificamos que ele apresenta capacidade de aquecimento e refrigeração de fluido, apesar do tempo necessário para que isto ocorra. Seu desempenho com condicionador de ar não apresenta resultados satisfatórios, tendo um tempo muito elevado para uma pequena variação de temperatura.

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal do trabalho foi desenvolver o protótipo do sistema de refrigeração e aquecimento por meio da utilização de módulos termoeletricos, realizando-se a análise da capacidade do sistema, de modo que, buscou-se responder a hipótese do problema de pesquisa. Para este protótipo desenvolvido, nas características de construção apresentadas e nas condições de análise realizadas, o sistema apresentou uma baixa capacidade de operar no modo de refrigeração e aquecimento com resultados expressivos.

Através das análises realizadas, observamos que a influência do sistema de troca térmica é o fator mais importante para um sistema termoeletrico. Deste modo, o dimensionamento do sistema de troca térmica dos módulos com o fluido deve ser revisto, uma vez que os módulos possuem uma capacidade de refrigeração adequada da sua superfície.

Outro fator com grande influência são as perdas térmicas de contato e os isolamentos térmicos, devendo-se buscar instalar os módulos em superfícies que favoreçam o contato térmico e realizar o isolamento adequado das linhas de condução do fluido frio até a unidade interna e do reservatório de fluido frio.

Durante a realização dos testes ocorreram alguns fatores que podem ter influenciado a análise, como a contaminação da água com o óleo residual presente

no sistema original dos trocadores de calor da unidade interna e externa do condicionador de ar, que ficou depositado sobre as aletas de alumínio.

Outro fator foi a tensão de alimentação que sofreu algumas oscilações, chegando a variar em alguns instantes 1 Vdc, acima e abaixo da tensão fixada nas análises, este fato ocorreu devido à instabilidade da rede, oriunda do fornecimento de energia proveniente da companhia elétrica.

Cabe ressaltar que a análise do protótipo foi realizada dentro de um ambiente residencial, sem muitos recursos disponíveis e sem o controle adequado da temperatura ambiente, dificultando a possibilidade de testagem em condições de operação diversas.

Sabe-se que a cada ano desenvolvem-se mais pesquisas e estudos sobre os componentes termoeletricos, em busca de desenvolver elementos que atinjam maior eficiência, porém, seu custo ainda é elevado e de difícil acesso. Deste modo, sugere-se a realização de uma análise com a utilização de módulos termoeletricos com maior potência e eficiência dos termoelementos, além de realizar o dimensionamento dos trocadores de calor.

6 REFERÊNCIAS

ALAOUI, Chakib. **Peltier Thermoelectric Modules Modeling and Evaluation**. vol. 5. International Journal of Engineering, Malásia, mar. 2011.

ASAFAN. **Adda South America Corporation**. São Paulo, 2021.

BAPTISTA, Makilim N.; DE CAMPOS, Dinael C. **Metodologias de pesquisa em ciências: análises quantitativa e qualitativa**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CAVALCANTI, Eduardo J. C.; et al. **Análise da eficiência energética de um chiller doméstico funcionando com compressão mecânica e sistema termoeletrico**. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, 2010.

CONRAD, Kyle. **A physics-based compact model for thermoelectric devices**. 2015. 138f. Master of Science in Electrical and Computer Engineering, Purdue University, Indiana, mai. 2015.

CUSTOM THERMOELECTRIC. **Water Blocks / Liquid Cold Plates**. Custom Thermoelectric, LLC. Bishopville, Maryland, EUA. Disponível em: <<https://customthermoelectric.com/water-block-3-0-x-3-0-x-0-85.html>>. Acesso em: 31 out. 2020.

ÇENGEL, Yanus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

DA ROCHA, Edroaldo L. **Transporte de Fônons em Geometrias Fractais**. 2010. 96f Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, set. 2010.

DE OLIVEIRA, Klaudio S. M. **Avaliação numérica do desempenho termodinâmico de células termoeletrônicas**. 2014. 144f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, fev. 2014.

DE SORDI, José O. **Desenvolvimento de projeto de pesquisa**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

FUNAHASHI, Ryoji; et al. **Thermoelectric Energy Conversion: Theories and Mechanisms, Materials, Devices, and Applications**. 1. ed. Amsterdã: Elsevier, 2021.

GIL, Antonio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

GOLDSMID, H. Julian. **Introduction to Thermoelectricity**. Berlin: Springer-Verlag, 2010.

HUMEL, Vitor. **Potenciais aplicações de módulos termoeletrônicos**. 2014. 47f. Monografia (Graduação) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

IOFFE, Abram F. **Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling**. 1. ed. London: Infosearch Ltd., 1957.

KAR KIN, Looi; et al. **Analytical Investigation of Thermoelectric Performance of Cooling Application**. vol. 46. Journal of Advanced Research on Fluid Mechanics and Thermal Sciences, Malásia, jun. 2018.

KIM, Hyun-Jung; et al. **System to Measure Thermal Conductivity and Seebeck Coefficient for Thermoelectrics**. National Aeronautics and Space Administration, Hampton, dez. 2012.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. **Princípios de transferência de calor**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

LAIRD TECHNOLOGIES. **Thermoelectric Handbook**. Laird Technologies, Inc. Morrisville, North Carolina, USA. Disponível em: <<https://www.lairdthermal.com/sites/default/files/ckfinder/files/resources/Handbooks/Thermoelectric-Assemblies-Handbook.pdf>> Acesso em: 25/10/2020.

LAKATOS, Eva M.; MARCONI, Marina de A. **Metodologia do trabalho científico: projeto de pesquisa/ pesquisa bibliográfica/ teses de doutorado, dissertação de mestrado, trabalhos de conclusão de curso**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MAESTRELLI, Everlise. **Desenvolvimento de um sistema de condicionamento de ar em escala reduzida utilizando módulos termoeletrônicos**. 2015. 85f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

NASA, NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Jet Propulsion Laboratory**. California Institute of Technology. Disponível em: <<https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/status/>>. Acesso em: 05 out. 2020.

NORTHWESTERN MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING. **Thermoelectrics**. Disponível em: <<http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/index.html>>. Acesso em: 13 set. 2020.

PÉREZ-APARICIO, José. L.; et al. **Finite element analysis and material sensitivity of Peltier thermoelectric cells coolers**. International Journal of Heat and Mass Transfer, Espanha, mai, 2012.

RIERA JUNIOR, Alberto T. **Efeitos Termoeletrônicos em sistemas nanoscópicos**. 2013. 182f. Tese (Doutorado) - Instituto de Física, Departamento de Física dos Materiais e Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ROWE, David M. **Thermoelectrics Handbook: macro to nano**. Londres: Taylor & Francis, 2006.

SUPERCOOL AB. **Thermoelectric Solutions**. Suécia: Supercool AB, 2004.

WELTY, James R.; et al. **Fundamentos de transferência de momento, calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

YAZAWA, Kazuaki; et al. **Thermoelectric Energy Conversion Devices and Systems**. 1. ed. Singapura: World Scientific, 2021.

ZLATIĆ, Veljko; HEWSON, Alex C. **Properties and Applications of Thermoelectric Materials: The Search for New Materials for Thermoelectric Devices**. Londres: Springer, 2009.



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09