



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado e Doutorado -

**ANÁLISE ENERGÉTICA, EXERGÉTICA E
EXERGOECONÔMICA DE UM PROTÓTIPO DE AR-
CONDICIONADO UTILIZANDO MÓDULOS
TERMOELÉTRICOS**

Por

Thiago Rodrigues Alexandria Leite

*Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para a obtenção do grau de Mestre.*

THIAGO RODRIGUES ALEXANDRIA LEITE

**ANÁLISE ENERGÉTICA, EXERGÉTICA E
EXERGOECONÔMICA DE UM PROTÓTIPO DE AR-
CONDICIONADO UTILIZANDO MÓDULOS
TERMOELÉTRICOS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para a obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L533a Leite, Thiago Rodrigues Alexandria.

Análise energética, exergética e exergoeconômica de um protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos / Thiago Rodrigues Alexandria Leite. - João Pessoa, 2022.

95 f. : il.

Orientação: Carlos Antônio Cabral dos Santos.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Termoeletricidade - Módulos termoelétricos. 2. Refrigeração. 3. Exergia. 4. Exergoeconomia. 5. SPECO.
I. Santos, Carlos Antônio Cabral dos. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621.36(043)

ANÁLISE ENERGÉTICA, EXERGÉTICA E EXERGEOCONÔMICA DE UM PROTÓTIPO DE AR- CONDICIONADO UTILIZANDO MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

por

THIAGO RODRIGUES ALEXANDRIA LEITE

Dissertação aprovada em 27 de julho de 2022



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS

Orientador – UFPB



Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO

Examinador Interno - UFPB

Documento assinado digitalmente

gov.br

JOSE CARLOS CHARAMBA DUTRA

Data: 25/08/2022 11:23:23-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. JOSE CARLOS CHARAMBA DUTRA

Examinador Externo – UFPE

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus e a todos aqueles que, do seu próprio modo, me ajudaram chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sempre se fez presente em todos os momentos da minha vida.

À toda minha família pelo incondicional apoio todos os dias.

A todos meus amigos que diariamente participam de minha vida.

À minha namorada Fátima, pelo incentivo e apoio constante.

Ao meu orientador e amigo Prof. Carlos Antônio Cabral dos Santos que desde a graduação é uma das minhas referências de professor e ser humano. O seu apoio e ensinamentos desde o início, sobretudo nos momentos mais difíceis, foram de suma importância para que eu concluísse mais este ciclo.

Ao amigo Altermir que, com sua enorme paciência e boa vontade, me auxiliou em todos os experimentos no laboratório de motores e acionamentos elétricos (LMA).

Aos professores Abel Cavalcante Lima Filho e José Carlos Charamba Dutra que gentilmente aceitaram o convite para participar da banca avaliadora deste trabalho.

À UFPB e à Capes por todo o suporte prestado.

ANÁLISE ENERGÉTICA, EXERGÉTICA E EXERGOECONÔMICA DE UM PROTÓTIPO DE AR-CONDICIONADO UTILIZANDO MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

RESUMO

Neste trabalho, é realizada uma análise energética, exergética e exergoeconômica, através do método SPECO, de um protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoeletrônicos. Dois principais ensaios foram feitos: o primeiro variando a temperatura da água e o segundo variando a corrente de entrada do sistema. Pela análise energética, foi calculada a capacidade de refrigeração (Q_c) e o coeficiente de desempenho do sistema (COP). Foi visto que é mais vantajoso o sistema trabalhar com mais módulos utilizando correntes de entrada mais baixas. Pela análise exergética, foram calculadas a destruição de exergia, a eficiência pela destruição de exergia, as exergias de refrigeração/aquecimento e a eficiência exergética de refrigeração. Notou-se que a refrigeração utilizando módulos termoeletrônicos possui baixa demanda de exergia e que uma solução para melhorar a eficiência seria alimentar o sistema com uma fonte de baixa exergia como, por exemplo, painéis fotovoltaicos. Pela análise exergoeconômica, foi calculado o custo por unidade de refrigeração/aquecimento (c_q) e o custo de refrigeração (\dot{C}_{q_c}). Foi visto a importância de um prévio estudo exergoeconômico, antes de se projetar este tipo de ar-condicionado, a fim de se evitar que o sistema trabalhe em condições que causem pontos de pico em c_q . Ademais, foi feito um ensaio simulando um ambiente a ser refrigerado. Com uma corrente de 3A, o protótipo conseguiu baixar a temperatura em 10.4 °C com apenas 5 minutos de funcionamento. Com este estudo, conclui-se que o sistema de refrigeração termoeletrônico proposto, nas características e condições dos ensaios, teve resultados satisfatórios e que as análises energéticas, exergéticas e exergoeconômicas se mostraram eficazes para evidenciar sob quais condições o sistema tem melhor desempenho e menor custo.

Palavras-chave: Módulos termoeletrônicos. Refrigeração. Exergia. Exergoeconomia. SPECO.

ENERGETIC, EXERGETIC AND EXERGOECONOMIC ANALYSIS OF AN AIR CONDITIONER PROTOTYPE USING THERMOELECTRIC MODULES

ABSTRACT

In this work an energetic, exergetic and exergoeconomic analysis, through the SPECO method, is carried out of an air conditioning prototype using thermoelectric modules. Two main tests were carried out: the first varying the water temperature and the second varying the system inlet current. Through the energy analysis, the cooling capacity (Q_c) and the system performance coefficient (COP) were calculated. It was seen that it is more advantageous for the system to work with more modules using lower input currents. By the exergy analysis, the exergy destruction, the exergy destruction efficiency, the cooling/heating exergies and the exergy cooling efficiency were calculated. It was noted that cooling using thermoelectric modules has low exergy demand and a solution to improve efficiency would be to feed the system with a low exergy source such as, for example, photovoltaic panels. By the exergoeconomic analysis, the cost per cooling/heating unit (c_q) and the cooling cost ($\dot{C}q_c$) was calculated. It was seen the importance of a previous exergoeconomic study before designing this type of air conditioner, in order to avoid that the system works under conditions that cause peak points in c_q . In addition, a test was carried out simulating an environment to be refrigerated. With a current of 3A, the prototype was able to lower the temperature by 10.4 °C in just 5 minutes of operation. With this study, it is concluded that the proposed thermoelectric refrigeration system, in the characteristics and conditions of the tests, had satisfactory results and that the energetic, exergetic and exergoeconomic analyzes were effective to show under which conditions the system has better performance and lower cost.

Keywords: Thermoelectric modules. Refrigeration. Exergy. Exergoeconomics. SPECO.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	19
1.2. MOTIVAÇÃO	21
1.3. OBJETIVOS	22
1.3.1. Objetivo Geral	22
1.3.2. Objetivos Específicos	22
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3. REFERENCIAL TEÓRICO	29
3.1. TERMOELETRICIDADE	29
3.1.1. Efeitos termoelétricos	29
3.1.1.1. Efeito Seebeck	29
3.1.1.2. Efeito Peltier	31
3.1.1.3. Efeito Thomson	32
3.1.2. Módulos Termoelétricos	33
3.1.2.1. Figura de Mérito	35
3.1.2.2. Principais aplicações dos módulos termoelétricos.	36
3.2. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	40
3.2.1. Condução	40
2.2.2. Convecção	43
2.2.3. Radiação	45
3.3. EXERGIA	48
3.3.1. Exergoeconomia	50
3.3.1.1. Método Speco	52

3.4. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	53
3.4.1. Cálculos Energéticos	54
3.4.2. Cálculos Exergéticos	56
3.4.2. Cálculos Exergoeconômicos	57
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
4.1 PRIMEIRO ENSAIO: VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA NO MÓDULO	69
4.2 SEGUNDO ENSAIO: VARIANDO A TEMPERATURA DA ÁGUA.....	69
4.3 TERCEIRO ENSAIO: VARIANDO A CORRENTE DE ENTRADA DO SISTEMA.	70
4.4 QUARTO ENSAIO: SIMULAÇÃO DE UM AMBIENTE A SER REFRIGERADO	71
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.1 PRIMEIRO ENSAIO: VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA NO MÓDULO	74
5.2. SEGUNDO ENSAIO: VARIANDO A TEMPERATURA DA ÁGUA.....	75
5.3 TERCEIRO ENSAIO: VARIANDO A CORRENTE DE ENTRADA DO SISTEMA.	81
5.4 QUARTO ENSAIO: SIMULAÇÃO DE UM AMBIENTE A SER REFRIGERADO	88
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	90
6.1 CONCLUSÕES	90
6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	91
REFERÊNCIAS	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Experimento de Seebeck.....	30
Figura 3.2 – Efeito termoelétrico (a) Seebeck e (b) circuito termoelétrico simplificado por um par de pellets semicondutores.....	31
Figura 3.3 – Constituição de um módulo termoelétrico.....	33
Figura 3.4 – a)Esquema de uma bomba de calor termoelétrica, b) Módulo termoelétrico..	34
Figura 3.5 – Influência da figura de mérito no desempenho de um sistema.....	35
Figura 3.6 – Figura de mérito dos principais materiais utilizados nos módulos.....	36
Figura 3.7 – Esquema de um sistema de conversão de calor residual em energia elétrica..	39
Figura 3.8 – Mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.....	40
Figura 3.9 – Associação da transferência de calor à difusão de energia devido à atividade molecular.....	41
Figura 3.10 – Mecanismos de transferência de calor.....	42
Figura 3.11 – Transferência de calor unidimensional por condução.....	42
Figura 3.12 – Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção	43
Figura 3.13 – a) Convecção forçada, b) Convecção natural.....	44
Figura 3.14 – Transferência por radiação em (a) superfície e (b) vizinhança.....	45
Figura 3.15 – Radiação incidente, refletida, transmitida e absorvida.....	46
Figura 3.16 – Emissão de radiação de um corpo negro e um corpo real.....	47
Figura 3.17 – Energia disponível.....	48
Figura 3.18 – Parcelas da exergia.....	49
Figura 3.19 – Custos das unidades produtivas.....	51
Figura 3.20 – Circuito para refrigeração termoelétrica.....	54
Figura 3.21 – Componentes de um módulo termoelétrico.....	58
Figura 4.1 – Módulos termoelétricos utilizados no protótipo.....	60

Figura 4.2 – a) Dissipadores utilizados no protótipo, b) Montagem do dissipador do lado quente utilizando pasta térmica e c) Sistema termoelétrico acoplado com os dissipadores.	61
Figura 4.3 – Bomba utilizada no protótipo.....	62
Figura 4.4 – Unidade evaporativa utilizada no protótipo.....	63
Figura 4.5 – Instrumentos de medição de temperatura.....	63
Figura 4.6 – Pequenos canais feitos no dissipador.....	64
Figura 4.7 – Fontes e multímetros.....	65
Figura 4.8 – Esquema do protótipo de ar-condicionado termoelétrico.....	66
Figura 4.9 – Protótipo de ar-condicionado termoelétrico.....	66
Figura 4.10 – Protótipo de ar-condicionado termoelétrico acoplado com a caixa.....	67
Figura 4.11 – Protótipo de ar-condicionado termoelétrico acoplado com a caixa com a tampa.....	67
Figura 4.12 – Sistema termoelétrico sem o dissipador no lado frio.....	69
Figura 4.13 – Bancada experimental para o ensaio variando a corrente.....	71
Figura 4.14 – Ensaio com a caixa de isopor.....	72
Figura 4.15 - Bancada experimental para o ensaio com a caixa de isopor.....	72
Figura 5.1 – Comportamento do T_c em função do tempo.....	74
Figura 5.2 – Efeito da temperatura da água em T_c e T_h	75
Figura 5.3 - Efeito da temperatura da água em ΔT	75
Figura 5.4 - Efeito da temperatura da água em Q_c	76
Figura 5.5 - Efeito da temperatura da água no COP.....	76
Figura 5.6 – Efeito da temperatura da água na potência.....	77
Figura 5.7 – Efeito da temperatura da água na destruição de exergia.....	78
Figura 5.8 – Efeito da temperatura da água na eficiência exérgica.....	78
Figura 5.9 – Efeito da temperatura da água na exergia de refrigeração.....	79
Figura 5.10 – Efeito da temperatura da água na eficiência exérgica de refrigeração.....	79
Figura 5.11 - Efeito da temperatura da água no c_q	80
Figura 5.12 - Efeito da temperatura da água em Eq_c e Eq_h	80
Figura 5.13 – Efeito da temperatura da água em $\dot{C}q_c$	81
Figura 5.14 – Efeito da corrente em T_c e T_h	82
Figura 5.15 – Efeito da corrente em ΔT	82
Figura 5.16 – Efeito da corrente em Q_c	83
Figura 5.17 - Efeito da corrente na potência do sistema.....	83

Figura 5.18 - Efeito da corrente no COP.....	83
Figura 5.19 – Efeito da corrente na destruição de exergia.....	84
Figura 5.20 – Efeito da corrente na eficiência exérgica.....	84
Figura 5.21 - Efeito da corrente na exergia de refrigeração.....	85
Figura 5.22 - Efeito da corrente na exergia de aquecimento.....	85
Figura 5.23 – Efeito da corrente na eficiência exérgica de refrigeração.....	86
Figura 5.24 - Efeito da corrente no custo por unidade de refrigeração/aquecimento.....	86
Figura 5.25 - Efeito da corrente em E_{q_c} e E_{q_h}	86
Figura 5.26 - Efeito da corrente em \dot{C}_{q_c}	88
Figura 5.27 – Temperatura interna para 20 minutos de funcionamento do sistema.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparação entre o refrigerador termoelétrico e o convencional.....	37
Tabela 3.2 – Comparação entre o resfriador termoelétrico e o convencional.....	38
Tabela 3.3 – Combustível e produto de cada componente.....	58
Tabela 4.1 – Especificações do módulo termoelétrico TEC1-12706.....	60
Tabela 4.2 – Características dos instrumentos de medida utilizados.....	65

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Símbolos

A	Área (m ²)
C	Custo (\$)
\dot{C}	Taxa de custo (\$/s)
\dot{C}_q	Custo de aquecimento/refrigeração (\$/s)
\dot{C}_p	Custo de energia elétrica (\$/s)
c	Custo médio por unidade de exergia (\$/s)
e	Emissividade
E	Exergia (W)
\dot{E}	Fluxo exergético (W/s)
E_b	Poder emissivo (W)
E_q	Exergia de aquecimento/refrigeração (W)
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção. (W/m ² .K)
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação. (W/m ² .K)
i	Taxa de juros anuais (%)
I	Corrente elétrica (A)
k	Condutividade térmica. (W/(m.K))
K	Condutividade térmica total (W/m.K)
L	Largura da parede (m)
\dot{m}	Fluxo de massa (kg/s)
n	Vida útil (anos)
nh	Horas de operação por ano (horas)

P	Potência (W)
Q	Calor transferido (W)
q	Taxa de calor transferido (W/A)
\dot{Q}	Taxa de calor transferido (W/s)
Q_c	Capacidade de refrigeração (W)
Q_h	Capacidade de aquecimento (W)
R	Resistência (Ω)
T	Temperatura (°C)
V	Tensão (V)
\dot{Z}	Taxa de despesas (\$/s)
Z	Custo de aquisição (\$)
Z_t	Figura de Mérito (1/K)
W	Trabalho (W)
\dot{W}	Fluxo de trabalho (W/s)

Letras gregas

α	Coeficiente de Seebeck (V/K)
β	Coeficiente de Thomson (V/K)
σ	Constante de Stefan–Boltzmann ($W/m^2.K^4$)
ε	Eficiência exergética de refrigeração
φ	Fator de manutenção
η_{II}	Eficiência pela destruição de energia
γ	Razão entre área e comprimento (m)
ρ	Resistência elétrica ($\Omega.m$)
π	Coeficiente de Peltier (V)
ΔT	Diferença de temperatura (°C)
ΔV	Diferença de tensão (V)

Siglas

C	COMBUSTÍVEL
CFC	Clorofluorcarboneto
COP	Coefficiente de desempenho
CRF	Fator de recuperação de capital
P	PRODUTO
SPECO	Custeio Específico de Exergia
STTEC	Resfriador Termoelétrico De Dois Estágios Eletricamente Separados

Subscritos

AB	Entre os materiais A e B
c	Refrigeração
calor	Calor
cer	Cerâmica
cond	Condução
conv	Convecção
destruída	Destruída
e	Entrada
f	Fourier
h	Aquecimento
j	Joule
K	K-ésimo termo
max	Máximo
me	Massa de entrada
ms	Massa de saída
n	Braço n
o	Ambiente

q	Calor
p	Braço p
pe	Peltier
rad	Radiação
s	Saída
s1	Superfície
termopar	Termopar
T	Thomson
viz	Vizinhança
w	Trabalho

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Esta introdução está dividida em quatro seções, a primeira seção apresenta a contextualização da pesquisa, seguida por uma seção que apresenta a motivação do estudo, na terceira seção são apresentados os objetivos e a quarta seção encerra o capítulo com uma breve apresentação da estrutura da dissertação.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Nos últimos anos, a temperatura da terra tem aumentado devido ao aquecimento global. Com isso, o uso de aparelhos de ar-condicionado aumentou consideravelmente. O aumento da demanda de energia, o alto custo de vida e o aumento do uso dos CFCs motivaram os fabricantes a buscarem tecnologias de resfriamento alternativas (SALAH; ABUHELWA, 2020).

Nesse contexto, os sistemas de refrigeração ecológicos são vistos como alternativas para a crescente demanda de energia (VENKATESAN; VENKATARAMANAN, 2020), tendo em vista a limitação dos recursos vinculados aos combustíveis fósseis e que esses novos sistemas são de conversão direta de energia com baixo consumo de combustível (NEMATÍ *et al.*, 2016). Dito isso, a refrigeração utilizando módulos termoelétricos, ou refrigeração termoelétrica, esteve no centro de interesse das pesquisas nas últimas décadas devido principalmente por ser uma tecnologia que possui longa vida útil dos módulos, ausência de ruídos durante o funcionamento, não utiliza fluidos refrigerantes danosos ao meio ambiente, oferece ótimo controle de temperatura e possui alta flexibilidade de

utilização (DANIEL *et al.*, 2022). Essa tecnologia atualmente tem sido proposta para vários fins, como, por exemplo: resfriar componentes eletrônicos, como ar-condicionado automotivo e também como ar-condicionado para uso residencial (TIAN *et al.*, 2021).

Um módulo termoelétrico é um dispositivo eletrônico feito de dois materiais semicondutores que utiliza o efeito Peltier para converter energia em um gradiente de temperatura (SULAIMAN *et al.*, 2018). Os principais materiais semicondutores utilizados na fabricação desses dispositivos são o Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3), Telureto de Chumbo (PbTe), Silício-Germânio (SiGe) e ligas de Bismuto-Antimônio (DANIEL *et al.*, 2022).

O maior obstáculo quanto ao uso de módulos termoelétricos, para fins de refrigeração, está relacionado ao baixo coeficiente de desempenho (COP), quando comparado aos sistemas tradicionais de compressão de vapor (GUCLU; CUCE, 2019).

Atualmente, o COP de sistemas de refrigeração termoelétricos tem valores entre 0.35 e 0.5. Por esse motivo, a refrigeração termoelétrica é limitada a aplicações que demandem pouca capacidade de refrigeração ou aplicações que requerem específicas condições, como, por exemplo, alta confiabilidade e tamanho reduzido (SALAH; ABUHELWA, 2020).

Há duas formas de melhorar o desempenho desses dispositivos. A primeira é melhorar a qualidade intrínseca dos materiais utilizados nos módulos através da figura de mérito. A segunda é analisar e otimizar configurações do projeto, como, por exemplo, procurar melhores formas de dissipar calor e operar o sistema com correntes consideradas ótimas (ZHAO; TAN, 2014).

Estudos voltados para melhoria de sistemas termodinâmicos, especialmente para os processos de conversão de energia, têm buscado mensurar a eficiência de equipamentos e processos, minimizando os desperdícios energéticos dos sistemas (CAVALCANTI, 2018; NÓBREGA *et al.*, 2022). Nesse contexto, a exergia apresenta-se como um importante parâmetro com o intuito de garantir que os processos se tornem cada vez mais eficientes (NÓBREGA *et al.*, 2022).

Exergia, ou energia disponível, representa o máximo de trabalho que pode ser obtido por um sistema até atingir o estado de equilíbrio. Como todos os processos de transferência de calor reais são irreversíveis, então a energia perde qualidade, ou seja, exergia é destruída. Assim, a exergia é também um indicador de qualidade da energia. (SOYLEMEZ *et al.*, 2019).

A análise exergética é uma ferramenta amplamente utilizada para se verificar quão próximo um processo real está do processo ideal. Esse tipo de análise não só identifica os componentes menos eficientes do sistema, mas também mostra as perdas de energia devido as irreversibilidades que não são contabilizados nas análises térmicas convencionais (TIPSAENPORM *et al.*, 2014).

Além da análise exergética de sistemas térmicos, os princípios econômicos também passaram a ser considerados nas pesquisas, pois consideram os diversos aspectos ligados às melhorias dos sistemas de conversão de energia (BEJAN *et al.*, 1996). A exergoeconomia é a combinação de uma análise exergética com uma análise de custos que objetiva mostrar tanto os custos dos componentes do sistema, quanto os custos dos produtos (NEMATI *et al.*, 2016). Essa é uma importante ferramenta que utiliza o conceito de exergia para mostrar sob quais configurações um sistema tem menor custo e melhor desempenho (TIAN *et al.*, 2021).

1.2. MOTIVAÇÃO

Considerando que os sistemas de refrigeração desempenham um papel vital nas questões de aquecimento global e que a tendência mundial é buscar novas formas de converter energia de forma limpa, é importante considerar que os sistemas termoelétricos se apresentam como alternativas viáveis em relação aos sistemas térmicos convencionais.

As principais vantagens estão relacionadas ao fato de não utilizar gases nocivos ao meio ambiente (como os CFCs), não emitir poluição durante a operação, ter uma vida útil mais longa (pois não possuem partes móveis e não precisam de manutenção), utilizar fontes de energia térmica de baixo grau, e o objetivo (produzir calor ou eletricidade) pode ser alterado facilmente.

Entretanto, o baixo coeficiente de desempenho dos sistemas termoelétricos é uma limitação para aplicações que necessitam maior capacidade de refrigeração. Assim, encontrar meios capazes de aumentar o desempenho é o grande desafio para produção da tecnologia termoelétrica em larga escala.

Diante disso, pesquisas relacionadas à utilização da tecnologia termoelétrica para fins de refrigeração são pesquisas com grande potencial, uma vez que ainda existe a necessidade de investigações neste campo do conhecimento pela sua imaturidade (TWAHA *et al.*, 2016).

De modo combinado, considerações exergéticas e econômicas também são necessárias para se obter a melhor tomada de decisão em relação ao processo da aplicação da refrigeração termoelétrica para produção comercial, investigando sob quais características o sistema vai ter melhor desempenho e menor custo, e assim tornar os sistemas termoelétricos mais competitivos em relação aos sistemas de refrigeração tradicionais.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Fazer uma análise energética, exergética e exergoeconômica de um protótipo de ar-condicionado, utilizando módulos termoelétricos.

1.3.2. Objetivos Específicos

Para obtenção do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar e fundamentar a teoria sobre termoeletricidade;
- Projetar um protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos;
- Testar a capacidade de refrigeração dos módulos termoelétricos;
- Avaliar os parâmetros de desempenho do sistema variando a corrente de entrada e a temperatura da água;
- Avaliar os parâmetros exergéticos do sistema;
- Aplicar o método SPECO para a análise exergoeconômica do sistema;
- Simular um ambiente a ser refrigerado com o protótipo.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por seis capítulos, considerando este primeiro capítulo de introdução, que apresenta uma breve contextualização, a motivação da pesquisa, bem como os seus objetivos e esta seção que descreve a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, é realizada uma breve revisão bibliográfica sobre os trabalhos publicados no campo da refrigeração termoelétrica.

No terceiro capítulo, é apresentado o referencial teórico que aborda os conceitos de termoeletricidade, os principais mecanismos de transferência de calor, exergia, exergoeconomia e a modelagem matemática considerada nos cálculos energéticos, exergéticos e exergoeconômicos.

No quarto capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados neste estudo, considerando os ensaios que foram desenvolvidos no quinto capítulo.

No sexto e último capítulo, são apresentadas as principais conclusões da pesquisa, bem como as sugestões para novas pesquisas.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos sobre a utilização de módulos termoelétricos para fins de refrigeração. Buscou-se também pesquisas que tenham aplicado a metodologia de análise exérgica e exergoeconômica para avaliar o desempenho de sistemas termoelétricos.

Heikes e Ure Jr. (1961) apresentaram um livro que mostra de modo completo os fenômenos termoelétricos, os principais materiais termoelétricos e as principais equações que regem um refrigerador termoelétrico.

Sofrata (1996) apresentou um estudo cujo objetivo foi melhorar o desempenho de um refrigerador termoelétrico através do desenvolvimento de um método mais eficaz de dissipar o calor do lado quente dos módulos. O sistema foi testado com um ventilador, com dois ventiladores e com ventilação natural. Os resultados mostraram que a temperatura mínima do lado frio atingida foi de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a diferença de temperatura entre os lados do módulo foi de $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ para ventilação natural, de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a configuração de um único ventilador e de $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a configuração utilizando dois ventiladores.

Dai *et al* (2003) projetaram um refrigerador termoelétrico alimentado por energia solar. Durante o dia, o sistema é alimentado através dos painéis fotovoltaicos. Para o uso noturno e em dias nublados, foram utilizadas baterias de armazenamento. Os resultados mostraram que o refrigerador termoelétrico conseguiu manter a temperatura interior entre 5 e $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e ter um COP de 0.3. Através desse estudo foi concluído que esse dispositivo tem potencial para ser aplicado para conservar comida, vacinas e bebidas em regiões remotas, onde não há eletricidade.

Lazaretto e Tsatsaronis (2006) definiram a metodologia denominada de SPECO (Specific Exergy Costing), que se propõe a definir e calcular eficiências e custos exergéticos em sistemas térmicos. Nesse trabalho, os autores mostraram como identificar os fluxos de entrada e de saída de uma unidade produtiva, como determinar os fluxos relacionados aos combustíveis e produtos e assim estruturar as equações de balanço de custo e as equações auxiliares através de uma matriz geral. Além disso, no trabalho foi demonstrado a aplicação desse método em vários componentes termodinâmicos.

Camargo e Oliveira (2010) buscaram testar experimentalmente a viabilidade de um ar-condicionado automotivo utilizando módulos termoelétricos que têm como fonte de energia o calor dos gases de exaustão do motor. Os módulos termoelétricos são utilizados para refrigerar o interior do veículo e para fornecer a energia necessária para esse arrefecimento. Para fornecer essa energia, um gerador termoelétrico que aproveita o calor residual dos gases de escape do motor é utilizado. Os resultados mostraram que o COP da refrigeração termoelétrica pode ser aumentado pela diminuição da diferença de temperatura entre os lados frio e quente. Concluiu-se que o desempenho do sistema, para cada faixa de diferença de temperatura, pode ser maximizado através do ajuste da tensão aplicada.

Sharma e Pandit (2014) buscaram fazer uma comparação do desempenho de refrigeradores termoelétricos de simples estágio e de multiestágio para um mesmo número de termoelementos. Os parâmetros de desempenho utilizados foram: taxa de refrigeração, coeficiente de desempenho, eficiência pela segunda lei e destruição de exergia.

Os resultados de Sharma e Pandit (2014) mostraram que, para o mesmo número de termoelementos, a taxa de refrigeração do refrigerador termoelétrico de simples estágio é muito maior do que a do refrigerador termoelétrico multiestágio. O COP permaneceu o mesmo para ambos os casos, mas o valor de pico do COP é obtido em um valor muito menor de corrente no refrigerador termoelétrico multiestágio. Também foi visto que a destruição de exergia tem valores constantes para os refrigeradores de simples e duplo estágio com um mesmo número de termoelementos.

Kaushik *et al* (2015) investigaram uma bomba de calor termoelétrica através de uma análise exérgica. Quatro modelos termodinâmicos da bomba de calor termoelétrica foram propostos: o modelo ideal sem irreversibilidades, o modelo endoreversível (internamente reversível e externamente irreversível), o modelo exoreversível (internamente irreversível e externamente reversível) e o modelo irreversível (real), e

foram simulados no MATLAB com condições definidas. Os resultados mostraram que a eficiência exérgica da bomba de calor termoelétrica aumenta com o aumento de ΔT_h . Também foi mostrado que os valores de energia perdidos devido às irreversibilidades internas são bem maiores que os valores perdidos devido às irreversibilidades externas.

Dizaji *et al.* (2016) investigaram a viabilidade de um ar-condicionado termoelétrico com o lado quente dos módulos sendo resfriado a água. Os efeitos da tensão, fluxo de ar, fluxo de água e temperatura da água foram investigados nos parâmetros de desempenho do sistema. Os resultados mostraram que existe um ponto de pico na relação $COP/COP_{m\acute{a}x}$ do sistema para todos os parâmetros variados. Tal ponto pode ser considerado como as condições ideais de trabalho de um ar-condicionado termoelétrico. Concluiu-se que de fato os sistemas termoelétricos podem ser utilizados como ar-condicionado de forma viável, especialmente quando o lado quente é resfriado por um líquido como a água.

Ibañez-Puy *et al.* (2017) estudaram uma configuração de 16 módulos termoelétricos para um potencial aplicação como sistema de refrigeração para edifícios residenciais, considerando não apenas o modo de resfriamento, mas também o modo de aquecimento, mediante operação em diferentes valores de tensão.

Os experimentos mostraram que o sistema pode ser instalado com sucesso como sistema de aquecimento ou resfriamento em edifícios, mostrando uma diferença de temperatura significativa entre os dois lados dos módulos, tendo especial relevância no modo de refrigeração. Além disso, análises teóricas foram feitas para encontrar a configuração mais adequada para obter um melhor COP, tanto para refrigeração quanto para aquecimento. Concluiu-se que um sistema termoelétrico apresenta melhor desempenho quando se trabalha com valores de tensão menores. (IBAÑEZ-PUY *et al.*, 2017).

Liu e Su (2018) demonstraram a eficácia do uso de um sistema termoelétrico para refrigeração através de cinco configurações experimentais montadas com diferentes métodos de resfriamento para o lado quente. Estes métodos incluem três métodos ativos: ventilador conectado a um dissipador de calor, convecção forçada da água e convecção forçada do ar. E dois métodos passivos: convecção livre da água e convecção livre do ar. Os resultados constataram que o COP médio do módulo nos métodos de resfriamento ativo é relativamente mais alto quando comparado com os métodos de resfriamento passivo. Concluiu-se que a água, como fluido de resfriamento, é mais eficiente que o ar para as aplicações termoelétricas.

Dizaji *et al.* (2019) buscaram analisar os efeitos da tensão, fluxo de ar/água, temperatura do ar/água na destruição de exergia e na eficiência da segunda lei de um ar-condicionado termoelétrico.

Os resultados mostraram que o comportamento da curva de desempenho exergético é descendente-ascendente e que o incremento da vazão de ar melhorou o desempenho exergético do ar-condicionado termoelétrico. Também foi visto que a temperatura mais alta de entrada de ar reduziu a destruição de exergia do sistema. Concluiu-se, assim, que esse tipo de sistema é mais apropriado para ser aplicado em regiões com climas mais quentes (DIZAJI *et al.*, 2019).

Jiang *et al.* (2020) desenvolveram um método de análise mais geral para o desempenho da refrigeração utilizando módulos termoelétricos, projetando uma estrutura modular de alta eficiência refrigerada a água. Para isso, foi proposto um novo método de análise, nomeadamente análise de densidade de corrente e taxa de refrigeração. Os resultados experimentais coincidiram com os cálculos teóricos, mostrando que o valor máximo da corrente de entrada e COP é 4A e 0.95, respectivamente.

Moria *et al.* (2021) desenvolveram um estudo experimental para avaliar os parâmetros econômicos de um sistema de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos. Os parâmetros variáveis foram a vazão mássica de ar/água, a temperatura de entrada de ar/água e a potência de entrada. Os resultados mostraram que, para qualquer vazão de ar, o custo de resfriamento é maximizado e depois diminuído e tem uma potência de entrada crítica. Também é visto que a temperatura da água do sistema não precisa ser menor que a temperatura do ar de entrada, pois nessa condição o custo aumenta mais rapidamente.

Tian *et al.* (2021) buscaram esclarecer o custo real de resfriamento de um único módulo termoelétrico comercial, sob diferentes condições de trabalho, identificando como os parâmetros efetivos podem impactar o custo de resfriamento e o desempenho do ar-condicionado. Um ar-condicionado termoelétrico à base de água e ar foi projetado em escala laboratorial e é testado sob diferentes vazões de ar, temperaturas do ambiente (entrada de ar), e potências de entrada.

Os resultados mostram que o número de módulos termoelétricos empregados em um refrigerador de tamanho real é um parâmetro chave para alocar uma potência de entrada ideal para qualquer módulo termoelétrico individual, além do custo do

resfriamento ser reduzido para temperaturas do ar mais quentes, mostrando a adequação dos refrigeradores termoelétricos para regiões quentes (TIAN *et al.*, 2021).

Daniel *et al.* (2022), projetaram e fabricaram um ar-condicionado termoelétrico, utilizando 12 módulos e um arduino para controlar a temperatura do ambiente. Para retirar calor dos módulos foi utilizado água. Os resultados mostraram que o ar-condicionado levou 300 segundos para diminuir a temperatura de 30 °C para 25 °C e 700 segundos para reduzir a temperatura para 15 °C. Com um aprimorado ajuste dos parâmetros elétricos do sistema, o COP alcançado pelo ar-condicionado foi de 1.13 para uma capacidade de refrigeração de 648 W.

CAPÍTULO III

REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo está dividido em quatro seções. Na primeira seção, são apresentados os conceitos relacionados à termoeletricidade. Na segunda seção, são apresentados conceitos ligados aos mecanismos de transferência de calor e suas propriedades correlatas. Na terceira seção, são abordados os conceitos de exergia, exergoeconomia, método SPECOS e abordagens conceituais correlacionadas. Por fim, na quarta seção será mostrado o modelo matemático utilizado neste trabalho.

3.1. TERMOELETRICIDADE

3.1.1. Efeitos termoelétricos

Efeitos termoelétricos são aqueles que podem converter energia térmica em energia elétrica e vice-versa. Os principais fenômenos relacionados a esses efeitos foram descobertos no século XIX. Veremos a seguir cada um deles com mais detalhes.

3.1.1.1. Efeito Seebeck

Em 1823, Thomas Seebeck fez a primeira grande descoberta dentro do campo da termoeletricidade. Acidentalmente, Seebeck descobriu que ao se aquecer uma das junções de dois materiais condutores de propriedades diferentes, a ponta de uma agulha se

movimentava. Esse movimento se dava pelo aparecimento de uma tensão elétrica no circuito (ROWE, 1995).

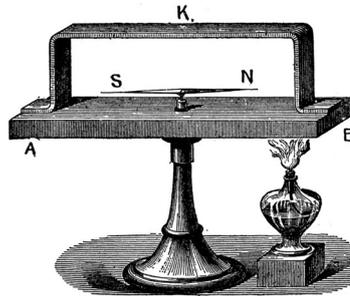


Figura 3.1 – Experimento de Seebeck. Fonte: NORTHWESTERN (2020).

Este princípio fundamental foi chamado de efeito Seebeck e enuncia que, na ocorrência de um gradiente de temperatura estabelecido no interior de um material, é induzido um gradiente de tensão correspondente (BERGMAN, 2019).

A quantificação desse fenômeno é apresentada na equação (3.1), no qual a relação entre as grandezas envolvidas de tensão nos terminais do dispositivo (V) e a diferença de temperatura entre a junção e a extremidade (ΔT) pode ser representada por:

$$\Delta V = \alpha \Delta T \quad (3.1)$$

O coeficiente de Seebeck (α) é uma propriedade do material, representando a proporcionalidade entre os gradientes de tensão e temperatura e, portanto, tem unidades de V/K.

A Figura 3.2 mostra como esse fenômeno acontece através da movimentação dos elétrons de uma junção constituída por dois condutores distintos de um circuito termoelétrico simplificado por um par de pellets semicondutores.

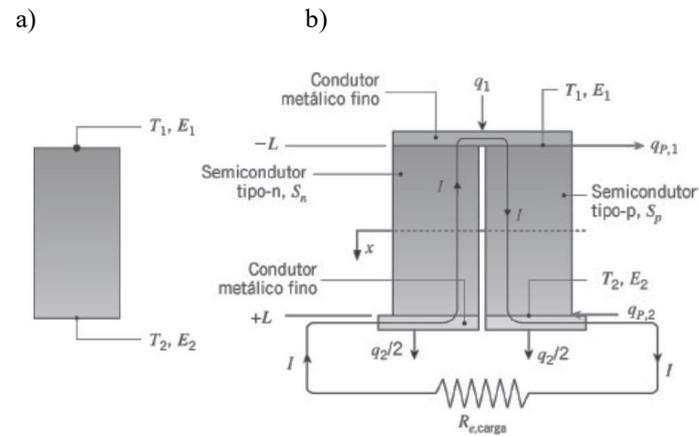


Figura 3.2 – Efeito termoelétrico (a) Seebeck e (b) circuito termoelétrico simplificado por um par de pellets semicondutores. Fonte: Bergman (2019).

Nesse efeito, os elétrons do material que possui menor energia migram para o material que possui maior energia, dando origem, assim, à força eletromotriz, de modo que o coeficiente de Seebeck é positivo quando essa força eletromotriz flui da união quente para a união fria através do elemento condutor (COELHO, 2018). O coeficiente de Seebeck é muito pequeno em metais, mas pode ser considerado relativamente grande em alguns materiais semicondutores (BERGMAN, 2019).

O efeito Peltier apresentado na próxima seção é considerado o inverso do efeito Seebeck, pois ele consiste na condução de elétrons de um material condutor para outro material condutor, levando ao aquecimento dos materiais.

3.1.1.2. Efeito Peltier

Em 1834, Jean Charles Athanase Peltier verificou que quando uma corrente elétrica contínua fluía na junção de dois metais de propriedades diferentes, havia a produção de um gradiente de temperatura e calor era absorvido ou dissipado na junção, dependendo do sentido da corrente (ROWE, 1995).

Idealmente, a quantidade de calor absorvida na extremidade fria devido ao efeito Peltier depende do produto do coeficiente de Peltier e a corrente que flui no sistema. Na prática, o valor líquido de calor absorvido na extremidade fria é reduzido por duas fontes: o calor conduzido, ou efeito Fourier, e o calor resultante da passagem de corrente elétrica através de algum meio, ou efeito Joule (REN *et al.*, 2017). A equação (3.2) mostra o efeito

Peltier que ocorre entre os dois materiais. Onde π é o coeficiente de Peltier dos materiais e I é a corrente elétrica.

$$Q_{pe} = -(\pi_{AB}) \cdot I \quad (3.2)$$

Conforme veremos na próxima seção, existe um terceiro efeito, o efeito Thomson, que relaciona os coeficientes de Seebeck e Peltier através da equação (3.3), pois o coeficiente Peltier é igual ao coeficiente Seebeck multiplicado pela temperatura absoluta. A única exceção se dá no caso de um supercondutor, pois esse apresenta resistência zero à passagem da corrente elétrica (BERGMAN, 2019).

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB} \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

3.1.1.3. Efeito Thomson

Em 1885, William Thomson descobriu que os efeitos de Seebeck e de Peltier estão relacionados e previu um terceiro efeito, o efeito Thomson.

Thomson constatou que a transferência de calor é diretamente proporcional à corrente elétrica e à diferença de temperatura num material termoelétrico. Para isso, ele relaciona a quantidade de calor gerado num condutor, no qual se faz passar uma corrente elétrica, em uma diferença de temperatura ΔT (REN *et al.*, 2017).

Sintetizando, a quantidade de calor devido ao efeito Thomson é mostrada na equação (3.4). Sabe-se que β é o coeficiente de Thomson e é medido em V/K.

$$Q_T = \beta \cdot I \cdot \Delta T \quad (3.4)$$

O efeito Thomson é muito menor do que o efeito Joule e o coeficiente de Thomson é muito difícil de obter experimentalmente. Por esse motivo, ele é muitas vezes negligenciado pela literatura.

Por fim, após a breve apresentação conceitual dos efeitos de Seebeck, Peltier e Thomson, além da relação entre esses efeitos, a próxima seção abordará a temática dos módulos termoelétricos, bem como as suas vantagens e aplicações.

3.1.2. Módulos Termoelétricos

Os módulos termoelétricos, também conhecidos como pastilhas Peltier, consistem em um arranjo de pequenos blocos de dois materiais semicondutores, do tipo n e p, montados termicamente em paralelo e eletricamente em série. Esses blocos ficam entre duas cerâmicas de boa condutividade térmica (GUCLU;CUCE, 2019). A constituição de um módulo termoelétrico é mostrada na figura 3.3.

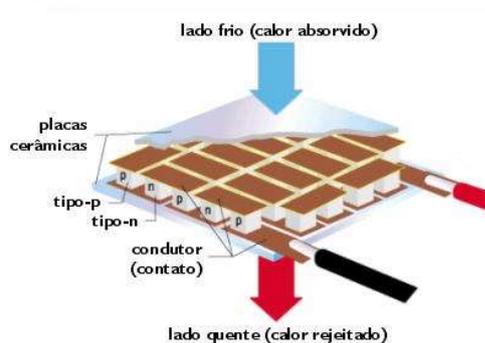


Figura 3.3 – Constituição de um módulo termoelétrico.

Fonte: Camargo e Oliveira (2010).

O princípio de funcionamento dos módulos se dá através do efeito Peltier. Quando uma tensão é aplicada ao módulo, em uma das cerâmicas, calor será absorvido, enquanto na outra, o calor será dissipado. Esse calor transferido é proporcional à corrente e ao número de pares dos semicondutores (ENESCU; VIRJOGHE, 2014).

Os módulos termoelétricos funcionam como pequenos refrigeradores/bombas de calor. Então, as leis da termodinâmica usadas para compressores de vapor e bombas de calor podem ser aplicadas aos módulos. Vale salientar também que os módulos não podem ser utilizados sozinhos, eles devem ser utilizados com dissipadores, para que o calor seja transferido da superfície cerâmica para o meio (SALAH; ABUHELWA, 2020).

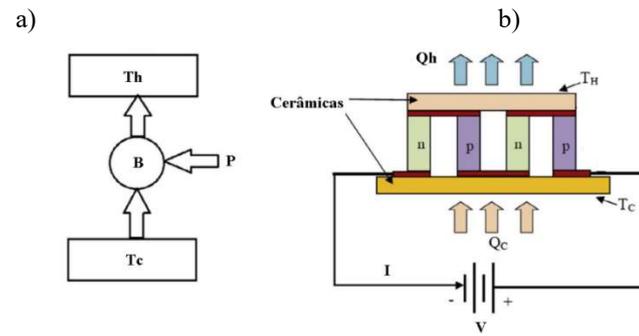


Figura 3.4 – a) Esquema de uma bomba de calor termoelétrica, b) Módulo termoelétrico. Fonte: Kaushik *et al.*, 2015.

De acordo com Salah e Abuhelwa (2020), as principais vantagens da utilização de módulos termoelétricos são:

- Os módulos não possuem partes móveis, portanto, precisam de menos manutenção, quando comparados com os sistemas convencionais;
- Os módulos possuem vida útil de aproximadamente 20 anos;
- Os módulos não contêm nenhum material químico que requer renovação periódica;
- Os módulos não dependem da posição, podendo ser utilizados em qualquer local;
- Os módulos possuem tamanhos reduzidos;
- Os módulos podem ser utilizados também para aquecer, bastando para isto inverter a polaridade do sistema;
- Os módulos podem ser utilizados para controle de temperatura.

Apesar do grande número de vantagens, a utilização dos módulos termoelétricos também possui desvantagens, como:

- Alto custo dos melhores semicondutores cuja fabricação exige tecnologia altamente especializada;
- Baixa eficiência energética;
- A aplicação ainda se restringe a casos onde o custo do sistema e eficiência energética são menos importantes que disponibilidade de energia e a confiabilidade do sistema.

3.1.2.1. Figura de Mérito

A figura de mérito indica a qualidade do material utilizado no módulo termoeétrico, medindo a capacidade dos materiais de transformar energia elétrica em energia térmica e vice-versa. Ela depende de três parâmetros: Coeficiente de Seebeck (α), resistência elétrica (ρ) e a condutividade térmica entre os lados cerâmicos (k) (ENESCU; VIRJOGHE, 2014). Portanto, a figura de mérito é representada pela equação (3.5):

$$Z_t = \frac{\alpha^2}{\rho k} \quad (3.5)$$

Para correta aplicação, os materiais devem ser selecionados corretamente, tanto os do tipo-p quanto os do tipo-n. Para seleção dos materiais, tem que se levar em conta o tipo de aplicação pretendido, temperatura de operação, estabilidade química, compatibilidade e a expansão/contração térmica dos elementos (NORTHWESTERN, 2020).

Um bom material termoeétrico deve ter alto coeficiente de Seebeck, baixa condutividade térmica para minimizar as perdas de calor e baixa resistência elétrica para minimizar o aquecimento devido ao efeito Joule (ZHAO; TAN, 2014). A figura 3.5 mostra a influência da figura de mérito no desempenho de um sistema.

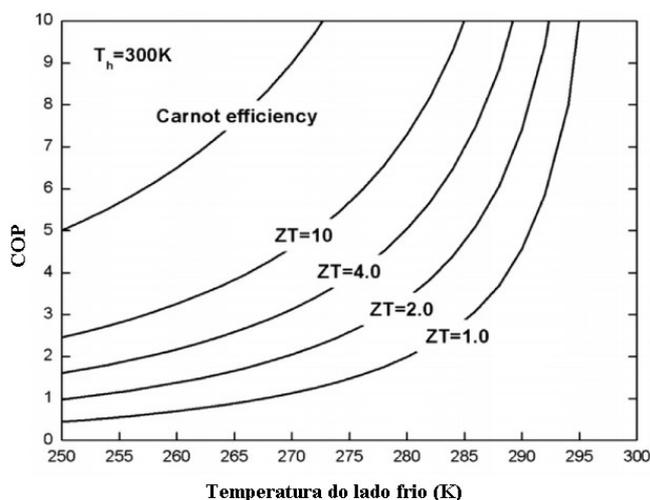


Figura 3.5 – Influência da figura de mérito no desempenho de um sistema. Fonte Zhao e Tan (2014).

Os principais materiais semicondutores utilizados atualmente na fabricação dos módulos termoelétricos são o Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3), Telureto de Chumbo (PbTe), Silício-Germânio (SiGe) e ligas de Bismuto-Antimônio. Todos esses materiais possuem uma figura de mérito com valores abaixo de 1.

De 1960 a 1990 não houve avanços significativos nas pesquisas para encontrar materiais com maiores figuras de mérito. Nos anos 90, pesquisas indicaram que a eficiência dos materiais poderia ser muito melhorada através da engenharia nanoestrutural. Atualmente, devido às técnicas modernas de análise e caracterização de materiais, se consegue utilizar dados nanoestruturais para melhorar a eficiência desses materiais (ZHAO; TAN, 2014).

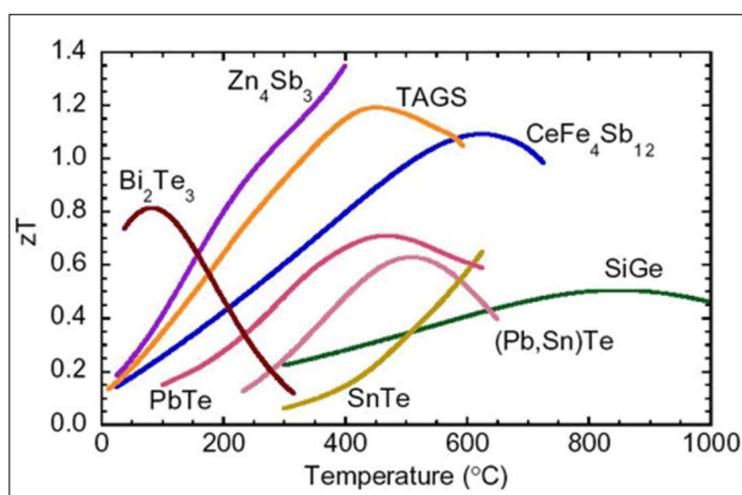


Figura 3.6 – Figura de mérito dos principais materiais utilizados nos módulos.

Fonte: Sulaiman *et al* (2018).

3.1.2.2. Principais aplicações dos módulos termoelétricos.

Os módulos termoelétricos podem ser utilizados em dois modos. O primeiro é utilizando o efeito Peltier, para obter resfriamento ou aquecimento. O segundo é utilizando o efeito Seebeck, para gerar eletricidade. No primeiro modo, o módulo converte energia elétrica em um gradiente de temperatura entre os lados cerâmicos. Já para gerar eletricidade, o módulo é colocado sob um gradiente de temperatura (Sulaiman *et al*, 2018).

As principais aplicações dos módulos termoelétricos são mostradas a seguir.

3.1.2.2.1. Refrigeração termoelétrica.

A refrigeração termoelétrica vem sendo cada vez mais utilizada para as mais variadas aplicações, devido ao custo baixo quando comparado com outros sistemas, não possuir partes móveis, possuir tamanho reduzido, ter excelente controle de temperatura e ser uma tecnologia limpa que não agride o meio ambiente (SALAH; ABUHELWA, 2020).

A refrigeração termoelétrica é baseada no efeito Peltier. Assim, ocorre através de uma tensão contínua aplicada através de um ou mais pares de materiais semicondutores, do tipo n e do tipo p, no qual o fluxo de elétrons passa por esses materiais, onde ocorrerá uma absorção de calor do ambiente e a temperatura da placa fria diminuirá.

Apesar das vantagens, os valores do coeficiente de desempenho (COP) dos refrigeradores termoelétricos ainda são baixos em comparação com as tecnologias convencionais de refrigeração. Os refrigeradores termoelétricos atuais têm COPs menores que 0.5 para uma diferença 20 °C entre os lados cerâmicos (ENESCU; VIRJOGHE, 2014).

Para melhorar o coeficiente de desempenho, os pesquisadores tentam em alguns casos usar blocos refrigerados a água com o objetivo de remover mais calor do lado quente dos módulos. Um sistema termoelétrico que tem o lado quente resfriado termicamente por materiais de mudança de fase ou pela integração com uma unidade de resfriamento a água pode ter o COP aumentado em até 55% (GUCLU; CUCE, 2019).

A tabela 3.1 mostra as principais diferenças entre um refrigerador termoelétrico e um refrigerador convencional.

	Refrigerador termoelétrico	Refrigerador convencional
Princípio de funcionamento	Efeito Peltier	Compressão de vapor
Tamanho	Muito pequeno	Muito grande
Custo	Baixo custo	Alto custo
Eficiência	Baixa eficiência	Alta eficiência
Vida útil (estimada)	20 anos	10 anos

Tabela 3.1 – Comparação entre o refrigerador termoelétrico e o convencional.

Fonte: Salah e Abuhelwa, 2020.

3.1.2.2.2. Resfriador para CHIPS.

Outra importante aplicação dos módulos termoelétricos é para resfriar CHIPS e componentes eletrônicos, dado que os coolers tradicionais são inadequados para componentes tão pequenos.

Nessas aplicações, os componentes eletrônicos são colocados diretamente em contato com o lado frio dos módulos. Assim, mais calor é transferido do componente para o módulo.

O principal objetivo de usar módulos termoelétricos para resfriar componentes eletrônicos é remover calor para mantê-los em valores de temperatura operacionais. O objetivo secundário é reduzir a corrente de fuga desses dispositivos eletrônicos.

Os principais produtos que utilizam módulos termoelétricos para resfriar seus componentes são CPUs, diodos a laser, tubos fotomultiplicadores, placas frias utilizadas em laboratórios e dispositivos que precisam de uma grande quantidade de resfriamento como, por exemplo, dispositivos de carga induzida (SALAH; ABUHELWA, 2020).

A tabela 3.2 mostra a comparação entre os dois modos de resfriar componentes eletrônicos.

	Resfriador termoelétrico	Resfriador convencional
Impacto no meio ambiente	Energia limpa	Produz CFC
Tamanho	Pequeno	Grande
Custo	Baixo custo	Alto custo
Eficiência	Baixa eficiência	Alta eficiência
Fonte de energia	DC, off-grid	AC, on-grid

Tabela 3.2– Comparação entre o resfriador termoelétrico e o convencional.

Fonte: SALAH; ABUHELWA, 2020.

3.1.2.2.3. Como sensor.

Módulos termoeletricos também podem ser utilizados como sensor de energia utilizando o efeito Peltier (SALAH; ABUHELWA, 2020). Muitos produtos são utilizados atualmente utilizando essa tecnologia, a maioria são aplicados no campo industrial como sensor para controlar temperatura.

O exemplo mais famoso do uso de módulos termoeletricos como sensor é o do gabinete NEMA, um microprocessador e simulador numérico que é utilizado no campo de computação e robótica. Esse dispositivo fornece a estabilidade da temperatura da tinta para impressoras e copiadoras (SALAH; ABUHELWA, 2020).

Os sensores de energia termoeletricos mais utilizados em aplicações industriais são os ultrassônicos, infravermelhos e sensores de fluxo de fluido.

3.1.2.2.4. Como gerador de energia.

Assim como a refrigeração termoeletrica, a geração de energia elétrica a partir de módulos termoeletricos é muito utilizada em todo o mundo.

Ao contrário das aplicações mencionadas nas seções anteriores, o gerador termoeletrico produz uma diferença de tensão quando é colocado sob um gradiente de temperatura (GUCLU; CUCE, 2019).

Devido a sua alta confiabilidade, baixo custo e ser uma tecnologia que não agride o meio ambiente, os geradores termoeletricos são bastante utilizados em usinas para converter o calor residual em energia elétrica.

Também podem ser utilizados em aplicações automotivas, aproveitando o calor residual proveniente do motor de combustão interna para gerar energia, fazendo assim a cogeração em automóveis (SANTOS, 2020).

A figura 3.7 mostra um esquema de conversão de calor residual em energia elétrica.

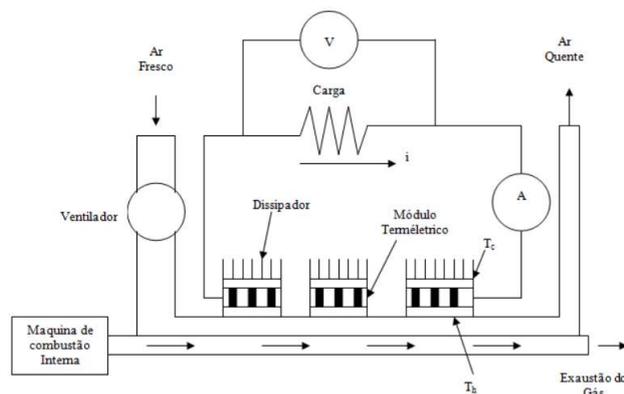


Figura 3.7 - Esquema de um sistema de conversão de calor residual em energia elétrica. Fonte: Camargo e Oliveira (2010).

3.2. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Transferência de calor é energia térmica em movimento em razão de uma diferença de temperatura no espaço (BERGMAN, 2019). Buscando apresentar de forma sintética, os mecanismos de transferência de calor, apresentados na Figura 3.8, podem ocorrer através da condução, convecção e radiação.

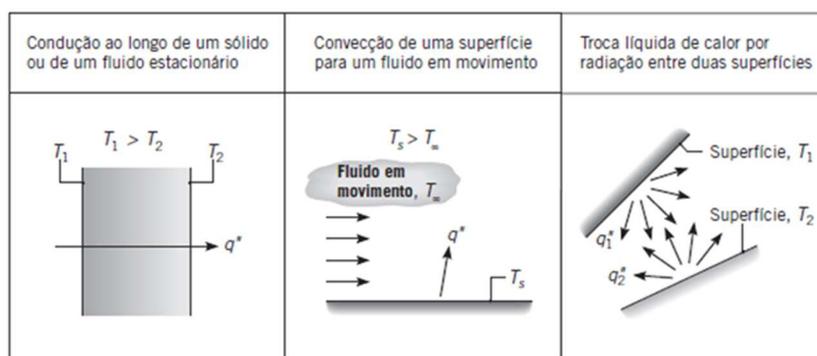


Figura 3.8 – Mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

Fonte: Bergman (2019).

Os mecanismos de transferência de calor mudam ao se moverem de um meio para outro. A condução ocorre ao longo de um meio até sua superfície, a convecção ocorrerá entre a superfície e um fluido em movimento e na radiação ocorre troca líquida de calor para uma superfície vizinha. (BERGMAN, 2019).

Cada um desses mecanismos será visto com mais detalhes a seguir.

3.2.1. Condução

Caracteriza-se como fenômeno de condução à transferência de calor que ocorrerá em um gradiente de temperatura em um meio estacionário que pode ser um sólido ou um fluido (BERGMAN, 2019).

O processo de transferência de energia por condução ocorre através da transferência de energia de um meio entre suas partículas, onde moléculas com nível mais alto de energia transmitem energia para moléculas adjacentes a níveis inferiores. (BERGMAN, 2019; WELTY, 2017).

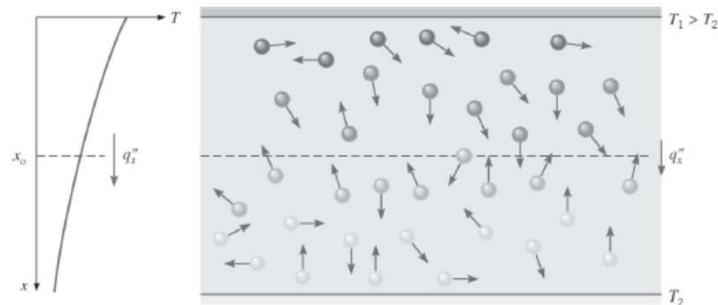


Figura 3.9 – Associação da transferência de calor à difusão de energia devido à atividade molecular. Fonte: Bergman (2019).

A relação de fluxo de calor apresenta-se como proporcional ao gradiente de temperatura, onde a constante de proporcionalidade é a condutividade térmica, conforme a equação de Fourier. Para a fase sólida, a condutividade térmica é atribuída tanto à atividade atômica na forma de vibrações dos retículos quanto à translação de elétrons livres. Em líquidos e gasosos se dá através das colisões e interações moleculares. (BERGMAN, 2019; WELTY, 2017).

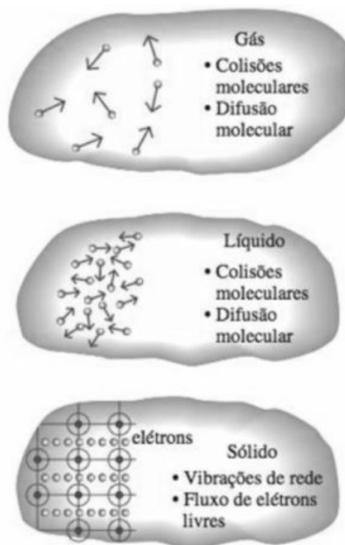


Figura 3.10 – Mecanismos de transferência de calor. Fonte: Çengel (2013).

Deste modo, a taxa de transferência de calor por área para a parede plana apresentada na figura 3.11 nas condições de estado estacionário é apresentada na equação (3.6). Onde q_{cond} é a taxa de transferência de calor (W/A), ΔT é a diferença de temperatura entre as superfícies, L é a largura da parede e k é a condutividade térmica (W/m.K).

$$q_{cond} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (3.6)$$

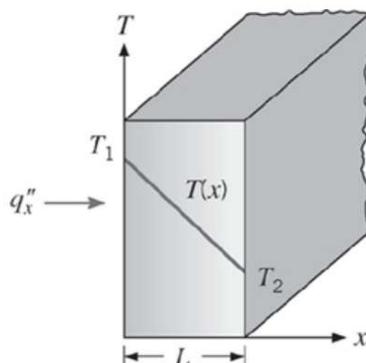


Figura 3.11 – Transferência de calor unidimensional por condução. Fonte: Bergman (2019).

Quanto à condutividade térmica, esta varia com a temperatura (WELTY, 2017), e sintetiza a capacidade de transferência de calor dos materiais. Devido ao espaçamento molecular, a condutividade térmica é geralmente maior em materiais sólidos do que em materiais líquidos e gasosos (BERGMAN, 2019).

Existe também uma relação entre condutividade térmica e condutividade elétrica, onde bons condutores de eletricidade geralmente são igualmente bons condutores de calor (WELTY, 2017).

Na próxima seção, a convecção é o mecanismo de transferência de calor abordado, onde são analisadas as propriedades necessárias para sua ocorrência.

2.2.2. Convecção

A convecção se refere ao processo de transferência de calor que ocorrerá entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles estiverem a diferentes temperaturas (BERGMAN, 2019).

A convecção abrange dois mecanismos: o primeiro é a transferência de energia entre os materiais devido ao movimento molecular aleatório. O segundo é através do movimento global do fluido. O termo convecção é costumeiramente usado para fazer referência a esse transporte cumulativo dos dois mecanismos e o termo advecção se refere ao transporte decorrente apenas do movimento global do fluido (BERGMAN, 2019).

Com a interação entre o fluido e a superfície, ocorre o desenvolvimento de uma região no fluido por meio da qual a sua velocidade varia entre zero, no contato com a superfície, e um valor finito ∞ , associado ao escoamento. Esta região é denominada de camada-limite hidrodinâmica (BERGMAN, 2019).

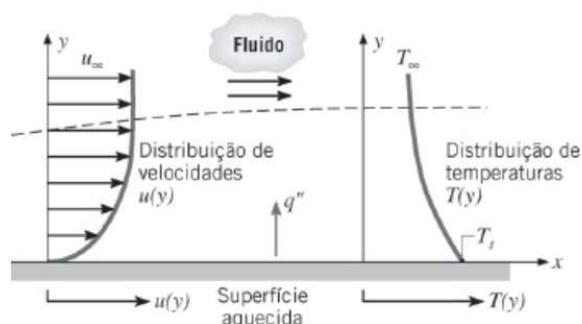


Figura 3.12 – Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção. Fonte: Bergman (2019).

Quanto às temperaturas da superfície e do fluido, se estas forem diferentes, existirá uma região no fluido na qual a temperatura variará de T_s , em $y = 0$, até T_∞ , associada à região do escoamento afastada da superfície, conhecida por camada-limite térmica (BERGMAN, 2019).

A transferência de calor em razão da convecção pode ocorrer de modo livre por meio de uma troca energética natural, ou forçada, quando um fluido escoar por uma superfície sólida impulsionado por um agente externo. No primeiro caso o escoamento é induzido por forças de empuxo, que são originadas a partir de diferenças de massas específicas causadas por variações de temperatura no fluido. Já no segundo caso, o escoamento é induzido por meios externos como, por exemplo, ventiladores e bombas (BERGMAN, 2019; WELTY, 2017).

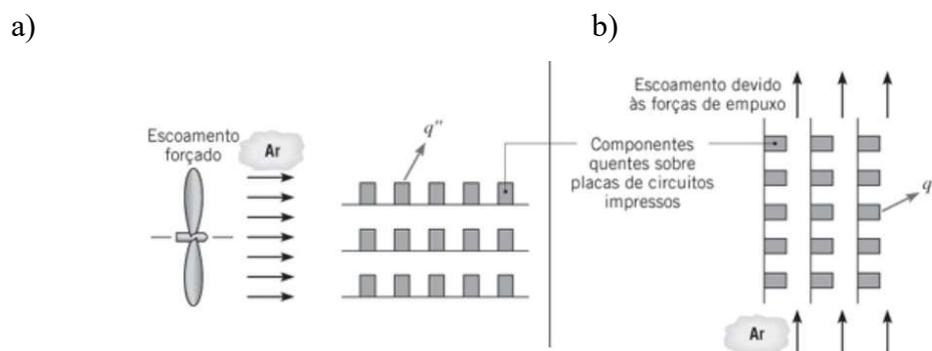


Figura 3.13 – a) Convecção forçada, b) Convecção natural. Fonte: Bergman (2019).

Para troca de energia entre uma superfície e um fluido adjacente muitas variáveis fazem com que este processo se torne bastante complexo, entretanto, a adoção da equação da lei de resfriamento de Newton é um método bastante simples (COELHO, 2018).

Conforme mostrado na equação (3.7), q_{conv} é a taxa de transferência convectiva de calor (W/A), T_{s1} é a temperatura na superfície do sólido, T_∞ é a temperatura do fluido e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2.K$).

$$q_{conv} = h(T_{s1} - T_\infty) \quad (3.7)$$

O coeficiente (h) depende de muitas variáveis, levando ao uso de correlações desenvolvidas a partir de trabalho experimental e estudos disponíveis na literatura (COELHO, 2018). Em alguns processos convectivos há também troca de calor latente associada a uma mudança de fase entre os estados líquido e vapor. Esses estados são conhecidos com ebulição e condensação (BERGMAN, 2019).

Na ebulição e condensação, os coeficientes associados à transferência de calor com esses dois tipos de fenômenos são bem altos devido aos processos de mudança de fase (WELTY, 2017).

Por fim, a próxima seção aborda a transferência de calor por radiação, apresentando os conceitos e suas aplicações.

2.2.3. Radiação

Na radiação térmica, todas as superfícies com temperatura não nula emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Desta forma, na ausência de um meio interposto participante, há transferência de calor líquida, por radiação, entre duas superfícies a diferentes temperaturas (BERGMAN, 2019).

A transferência de calor por radiação entre superfícies difere da condução e da convecção, pois nenhum meio é requerido para sua propagação (WELTY, 2017). Trata-se de um processo em que a matéria com temperatura não nula emite energia que ora pode ser tratado como emissão de ondas eletromagnéticas, ora como a emissão de fótons, a qual é absorvida pela sua vizinhança (COELHO, 2018).

A Figura 3.14 mostra a transferência de calor por radiação em uma superfície, conforme mostrado no caso (a) e uma superfície com a vizinhança, caso (b).

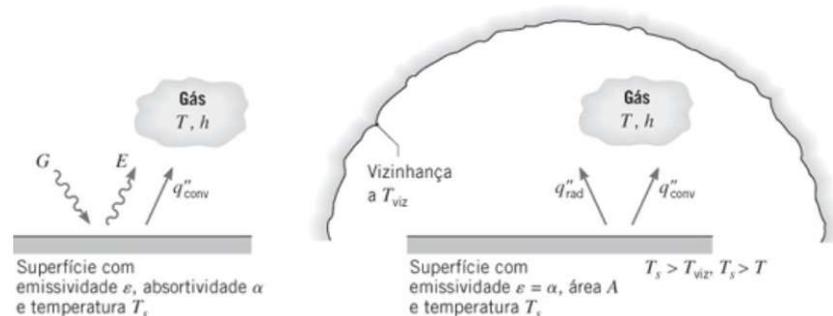


Figura 3.14— Transferência por radiação em (a) superfície e (b) vizinhança.

Fonte: Bergman (2019).

Dependendo das características da superfície e da radiação incidente, a irradiação pode ser absorvida, refletida ou transmitida pela superfície (COELHO, 2018). A Figura 3.15, mostra que a fração da radiação incidente, parte é refletida, parte é transmitida e parte é absorvida.

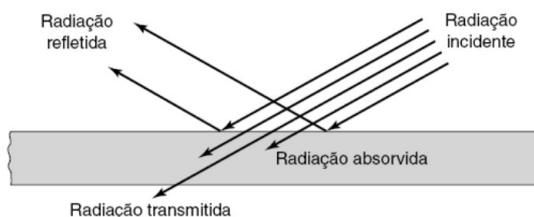


Figura 3.15 – Radiação incidente, refletida, transmitida e absorvida. Fonte: Welty (2017).

Considerando a lei de Stefan–Boltzmann, que deduziu teoricamente em 1884 a relação da radiação térmica, para energia emitida a partir de uma superfície negra, a transferência de energia torna-se máxima quando estas superfícies estão separadas por um vácuo perfeito (WELTY, 2017).

A radiação que é emitida da figura 3.14 a) é conhecida como poder emissivo, E_b , e é determinada pela lei de Stefan-Boltzmann, conforme mostrado na equação (3.8). Onde T_{s1} é a temperatura absoluta da superfície (K) e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$). Tal superfície é conhecida como corpo negro.

$$E_b = \sigma T_{s1}^4 \quad (3.8)$$

Um corpo negro absorve toda a radiação incidente, independentemente do comprimento de onda e da direção. Além disso, o corpo negro emite energia de radiação uniformemente em todas as direções por unidade de área normal da direção de emissão, o que pode ser caracterizado como um emissor difuso (ÇENGEL, 2013). Um corpo real à mesma condição por sua vez irá emitir ou absorver uma quantidade menor de radiação (COELHO, 2018), como mostrado na Figura 3.16.

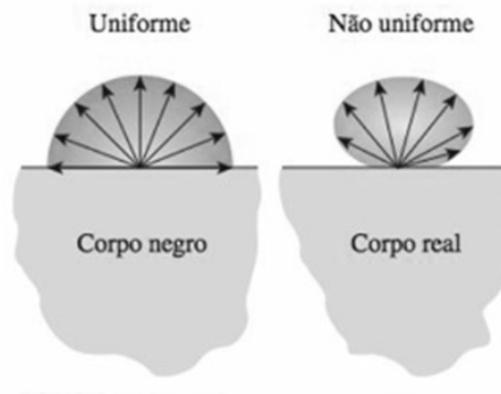


Figura 3.16 – Emissão de radiação de um corpo negro e um corpo real.

Fonte: Çengel (2013).

O fluxo térmico real emitido por uma superfície é dado pela equação (3.9).

$$E_b = e\sigma T_{s1}^4 \quad (3.9)$$

O termo, e , é denominado emissividade ou emitância, e depende das características do material e não é necessariamente a mesma para todos os comprimentos de onda emitidos (ÇENGEL, 2013).

A troca líquida de calor transferido por radiação é dada pela equação (3.10). Onde T_{s1} é a temperatura da superfície, T_{viz} a temperatura na vizinhança, A é a área e h_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação ($W/m^2.K$).

$$q_{rad} = h_r \cdot A \cdot (T_{s1} - T_{viz}) \quad (3.10)$$

O coeficiente de transferência de calor por radiação, h_r , por sua vez é obtido através da equação (3.11).

$$h_r \equiv e\sigma(T_{s1} + T_{viz})(T_{s1}^2 + T_{viz}^2) \quad (3.11)$$

Assim, sintetizamos os mecanismos de transferência de calor, onde foram apresentados a condução, a convecção e a radiação, que podem ser aplicáveis de acordo o material e superfície do objeto de estudo ou da sua vizinhança. Na próxima seção são apresentados os conceitos de exergia, exergoeconomia e o método SPECO.

3.3. EXERGIA

A energia está disponível na natureza em diferentes formas, cada uma com sua característica e qualidade, podendo também ser convertida de uma forma para outra. A qualidade da energia representa sua capacidade de causar mudança. Com a primeira lei da termodinâmica é possível quantificar a energia, mas apenas com a segunda lei que se é possível qualificar essa energia (SOUZA, 2019).

O conceito de exergia pode ser definido como sendo o trabalho máximo que pode ser extraído de um sistema, quando o mesmo percorre um processo inteiramente reversível, até atingir o estado morto (ou estado de equilíbrio) com as condições ambientais (KOTAS, 1985).

O estado morto ou estado de equilíbrio pode ser definido como o estado em que o sistema está em total equilíbrio com a vizinhança. Ou seja, a temperatura, a pressão, concentração química, velocidade e altura do sistema é igual à temperatura, pressão, concentração química, velocidade e altura da vizinhança. Nesse estado não há mais interação entre o sistema e a vizinhança, logo não há potencial para extrair trabalho. (NETO, 2018).

A exergia, porém, não representa a quantidade máxima de trabalho que determinado sistema irá produzir, mas sim a quantidade máxima de trabalho que o sistema conseguiria produzir caso o sistema fosse livre de todas as irreversibilidades (SOUZA, 2019). Sintetizando, a irreversibilidade significa o trabalho útil que é jogado fora ou a exergia destruída durante o processo.

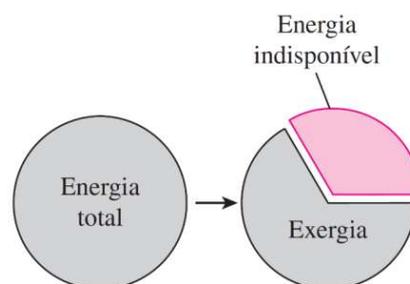


Figura 3.17 – Energia disponível. Fonte: Çengel 2013.

A exergia, assim como a energia, pode ser transferida para outros sistemas sob a forma de trabalho, calor ou fluxo de massa. O trabalho, por ser uma forma organizada de energia, possui 100% de exergia. Já o calor, por ser uma forma desorganizada de energia, apenas uma parcela dele tem potencial para realização de trabalho útil. A transferência de exergia pelo fluxo de massa depende do estado termodinâmico e é diretamente proporcional a massa de entrada e saída do sistema (SOUZA, 2019).

A exergia de um sistema pode ser dividida em exergia cinética, exergia potencial, exergia física e exergia química, conforme mostrado na Figura 3.18.

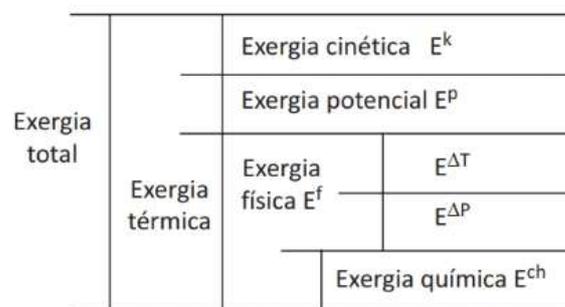


Figura 3.18 – Parcelas da exergia. Fonte: Cavalcanti (2018).

As propriedades exergéticas são compostas por entalpia, entropia e temperatura (HARTMANN; DIAS, 2021). A definição matemática de exergia é obtida a partir da aplicação de balanços de energia e de entropia a um sistema interagindo com o meio ambiente.

Em síntese, a equação (3.12) traz o fluxo exergético através de calor, do trabalho e do fluxo de massa.

$$\dot{E}_{calor} - \dot{E}_w + \dot{E}_{me} - \dot{E}_{ms} - \dot{E}_{destruída} = \frac{dE}{dt} \quad (3.12)$$

Considerando a situação mais comum encontrada na prática, onde o escoamento se dá sob regime permanente, sem variação de exergia no volume de controle e sem variações no volume, a equação (3.12) pode ser reescrita na forma da equação (3.13).

$$\Sigma \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \cdot \dot{Q}_k - \dot{W} - \Sigma_e \dot{m}_e - \Sigma_s \dot{m}_s - \dot{E}_{destruída} = 0 \quad (3.13)$$

Baseado no conceito de exergia, as aplicações voltadas para avaliação dos processos industriais sob o ponto de vista de eficiência exergetica, buscam identificar os maiores destruidores de exergia do sistema (CAVALCANTI, 2018). A partir, daí surge o conceito complementar de exergoeconomia que será apresentado na próxima seção.

3.3.1. Exergoeconomia

Segundo Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), a análise exergoeconômica combina a análise exergetica com os princípios da economia. Este segmento vem ganhando importância no campo científico, pois traz contribuições relacionadas a melhorias dos sistemas de conversão de energia.

Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) definiram quatro objetivos a serem alcançados em uma análise exergoeconômica: (i) Calcular de forma independente os custos de cada produto fabricado por um sistema que produz mais de um produto; (ii) Compreender a formação de custos e o fluxo de custos em um sistema; (iii) Otimizar variáveis específicas em um componente singular; e (iv) otimizar todo o sistema.

O balanço exergoeconômico consiste em atribuir custos às cargas exergeticas de um portador de energia e assim obter o valor monetário de cada um dos fluxos (CAVALCANTI, 2018). Para isso, a taxa de custo deverá estar atrelada aos fluxos de exergia, nas correntes de entrada (\dot{C}_e), saída (\dot{C}_s), potência (\dot{C}_w) e transferência de calor (\dot{C}_q), conforme mostrado matematicamente nas equações (3.14) a (3.17):

$$\dot{C}_e = c_e \cdot E_e \quad (3.14)$$

$$\dot{C}_s = c_s \cdot E_s \quad (3.15)$$

$$\dot{C}_w = c_w \cdot \dot{W} \quad (3.16)$$

$$\dot{C}_q = c_q \cdot E_q = c_q \cdot q \cdot \left[1 - \frac{T_K}{T_0} \right] \quad (3.17)$$

Onde: c_e , c_s , c_w e c_q são os custos médios por unidade de exergia, E_q é a exergia relacionada ao resfriamento/aquecimento, T_k é a temperatura do lado cerâmico e T_o é a temperatura ambiente.

A soma da taxa de custo para todas as saídas de exergia (trabalho + saída) é igual à soma das taxas de custo de entrada de exergia (calor + entrada) mais as taxas de despesas com operação, manutenção e aquisição, \dot{Z}_k (CAVALCANTI, 2018). O balanço de custo é dado por:

$$\sum_s (C_s \cdot E_s)_k + c_w \cdot \dot{W} = c_q \cdot E_q + \sum_e (C_e \cdot E_e)_k + \dot{Z}_k \quad (3.18)$$

Para análise exergoeconômica é importante identificar nas unidades produtivas tanto o custo dos produtos quanto o custo dos combustíveis. A Figura 3.19 demonstra os custos envolvidos na análise exergoeconômica de uma unidade produtiva, onde Z é o custo de despesas.

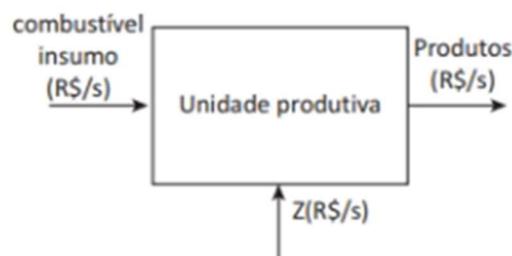


Figura 3.19 – Custos das unidades produtivas. Fonte: Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) adaptado.

A partir da mensuração do valor do custo de cada equipamento, é possível considerar a taxa de custo nivelado considerando fatores de amortização, as despesas fixa e variável com a operação e a manutenção, e o fator de recuperação de capital (CRF). Logo, o CRF é utilizado em análise de retorno de investimentos e em amortização de capital por meio de parcelas de valor uniforme (CAVALCANTI, 2018), a partir daí, também é possível calcular o custo de aquisição como mostrado nas equações. (3.19) e (3.20).

$$\dot{Z}_k = Z_k \cdot CRF \cdot \varphi \quad (3.19)$$

$$CRF = i \cdot \left[\frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \frac{1}{n \cdot nh \cdot 3600} \quad (3.20)$$

Onde: i é taxa anual de juros; n é vida útil em anos; nh é o número de horas de operação por ano; Z é o custo de aquisição do material, CRF é o fator de recuperação de capital e ϕ é o fator de manutenção.

Para avaliação da eficiência em relação a exergia, utiliza-se a eficiência exergetica, determinada pelo quociente da exergia do produto pela exergia do combustível. Para o caso de eficiência exergetica de refrigeração, temos:

$$\varepsilon = \frac{Eqc}{P} \quad (3.21)$$

Após breve apresentação dos conceitos ligados a exergoeconomia, a próxima seção aborda um dos métodos exergoeconômicos adotados na literatura.

3.3.1.1. Método Speco

O método SPECO (*Specific Exergy Costing*) foi desenvolvido por Tsatsaronis e Lin (1990) e Lazaretto e Tsatsaronis (1999), e compõe a Teoria de Custo Exergetico. Baseado na exergia específica, custo do produto e do combustível por unidade de exergia, eficiência exergetica e equações auxiliares (CAVALCANTI, 2018), consiste em três passos: (i) Identificar os componentes e os fluxos de exergia; (ii) Definir produto e combustível do sistema; e (iii) Aplicar as equações de custo (LAZARETTO; TSATSARONIS, 2006).

No primeiro passo, os componentes são escolhidos para identificação de todos os fluxos de massa, calor e trabalho de saída e de entrada, com suas respectivas exergias. No segundo passo, os produtos e combustíveis são selecionados com base nos componentes escolhidos, onde é feito o mapeamento de todos os fluxos conforme descrito na primeira etapa. Por fim, o terceiro passo associa o custo de um sistema térmico com sua vizinhança e suas fontes de irreversibilidades.

Produto é definido como todas as exergias de saída, inclusive a gerada no próprio componente, mais todo o aumento de exergia entre a entrada e a saída de acordo com a

finalidade de cada componente. Já combustível pode ser definido como todos os valores de exergia de entrada, mais toda diminuição de exergia entre a entrada e a saída, menos todo o aumento de exergia que não esteja de acordo com o propósito do componente (CAVALCANTI, 2018).

Em geral, o número de correntes exergéticas é maior que o número de componentes do sistema. Quando se define a matriz de incidência, percebe-se a necessidade de equações auxiliares para fechar a matriz. Para solucionar isso, a metodologia SPECO utiliza a aplicação do princípio de produto P e combustível F (CAVALCANTI, 2018).

2.3.1.1.1. Princípio F

Este princípio fundamenta-se na remoção de exergia de um fluxo de exergia dentro de um componente, quando a diferença entre a entrada e a saída deste fluxo é considerada na definição de combustível. O custo específico associado a essa remoção de exergia deve ser igual ao custo médio específico do fluxo de entrada e saída, onde o combustível assume as despesas do produto (CAVALCANTI, 2018).

As conclusões que podem ser feitas da aplicação do princípio F é que o combustível paga a conta do produto e que o produto carrega todas as perdas devido às irreversibilidades do componente. Assim, quanto maior a eficiência de um componente, mais barato será o produto (CAVALCANTI, 2018).

2.3.1.1.2. Princípio P

Já o princípio P, refere-se ao fornecimento de fluxo de exergia para o fluxo de exergia dentro de um componente considerado. Este princípio afirma que cada unidade de exergia é fornecida para um fluxo associado ao produto no mesmo custo médio, chamado de c_q . Assim, cada fluxo de exergia deve estar associado, uma única vez, ou ao combustível ou ao produto. Com as equações auxiliares decididas, igualam-se os números de equações de fluxo com o número de incógnitas (CAVALCANTI, 2018).

3.4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Esta seção será dividida em três subseções. Na primeira, faremos o desenvolvimento matemático para os cálculos energéticos de um sistema termoelétrico. Na segunda e terceira, abordaremos os cálculos exergéticos e exergoeconômicos utilizados neste estudo.

3.4.1. Cálculos Energéticos

Todo o desenvolvimento matemático contido nesta seção está conforme Heykes e Ure Jr. (1961). Um circuito termoelétrico é mostrado na Figura 3.20. Para refrigeração termoelétrica, uma fonte de energia produzirá uma corrente I neste circuito e, então, calor será absorvido em T_c devido ao efeito Peltier. Nesta figura, T_h é o lado quente do módulo e T_c o lado frio do módulo. N e p são os ramais. A direção positiva da corrente é no sentido de n para p .

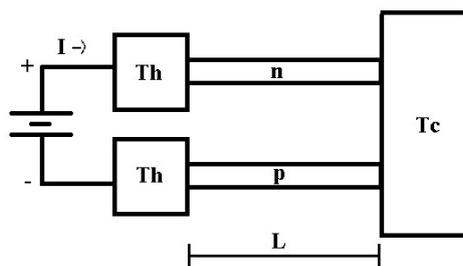


Figura 3.20 – Circuito para refrigeração termoelétrica. Fonte: Heykes e Ure (1961) adaptada.

A energia térmica transferida entre T_h e T_c em uma associação termoelétrica é a soma de três parcelas: o efeito Peltier, o efeito Joule e o efeito Fourier (taxa de transferência de calor entre dois corpos para corrente igual a zero). O efeito Peltier conforme visto na equação (3.2) é dado por $[Q_{pe} = -(\pi_{AB}) \cdot I]$. Utilizando a equação (3.3), podemos escrever a equação (3.2) como:

$$Q_{pe} = \alpha \cdot T_c \cdot I \quad (3.22)$$

O segundo termo, o efeito Joule, é dado por:

$$Q_j = 0.5 I^2 \cdot R \quad (3.23)$$

Onde:

$$R = \left(\frac{\rho_n}{\gamma_n} \right) + \left(\frac{\rho_p}{\gamma_p} \right) \quad (3.24)$$

R é a resistência elétrica dos dois braços em série, ρ_n e ρ_p são as resistividades dos braços n e p, respectivamente; γ_n e γ_p são as razões entre a área e o comprimento dos braços n e p, respectivamente.

O terceiro termo, o efeito Fourier, é dado por:

$$Q_f = K(\Delta T) \quad (3.25)$$

Onde:

$$K = k_n \gamma_n + k_p \gamma_p \quad (3.26)$$

K é condutividade térmica dos dois braços em paralelo; k_n e k_p são as condutividades térmicas dos braços n e p, respectivamente.

Então, juntando os três termos acima, teremos a equação da capacidade de refrigeração do módulo termoeletrico:

$$Q_c = \alpha T_c I - 0.5 I^2 R - K(\Delta T) \quad (3.27)$$

Na Equação (3.27), tanto o calor de Joule, quanto o calor de Fourier são irreversibilidades do sistema.

A tensão do módulo é dada pela soma de duas tensões: a tensão termoeletrica ($V = \alpha \Delta T$) e a tensão de Joule ($V = IR$). Então:

$$V = \alpha \Delta T + IR \quad (3.28)$$

Já para potência, sabendo que:

$$P = VI \quad (3.29)$$

Substituindo (3.28) em (3.29):

$$P = \alpha\Delta TI + I^2R \quad (3.30)$$

Ou

$$P = V \left(\frac{V - \alpha\Delta T}{R} \right) \quad (3.31)$$

O coeficiente de desempenho (COP) é dado pelo quociente da capacidade de refrigeração (Q_c) dividido pela potência de entrada (P):

$$COP = \frac{Q_c}{P} \quad (3.32)$$

Substituindo (3.27) e (3.30) em (3.32), teremos:

$$COP = \frac{\alpha T_c I - 0.5 I^2 R - K(T_h - T_c)}{\alpha\Delta TI + I^2 R} \quad (3.33)$$

O valor máximo do coeficiente de desempenho será o do ciclo de Carnot, ou seja, sem irreversibilidades no sistema. Será dado pela equação (3.34).

$$COP_{max} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (3.34)$$

3.4.2. Cálculos Exergéticos

Para os cálculos exergéticos, aplicando-se a equação de fluxo exergético no volume de controle de um único módulo em estado estacionário, obtemos a equação (3.35):

$$\left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right) \cdot Q_c + W - \left(1 - \frac{T_0}{T_h}\right) \cdot Q_h - E_{destruída} = 0 \quad (3.35)$$

O primeiro termo da equação (3.35) é a exergia associada ao resfriamento e o terceiro termo é a exergia associada ao aquecimento. Tem-se, então:

$$Eq_h = \left(1 - \frac{T_o}{T_h}\right) \cdot Q_h \quad (3.36)$$

$$Eq_c = \left(\frac{T_o}{T_c} - 1\right) \cdot Q_c \quad (3.37)$$

Isolando o termo de destruição de exergia na equação (3.35), obtemos:

$$E_{destruída} = \left(1 - \frac{T_o}{T_c}\right) \cdot Q_c + W - \left(1 - \frac{T_o}{T_h}\right) Q_h \quad (3.38)$$

Sabendo que $W = Q_h - Q_c$, a equação (3.38) fica:

$$E_{destruída} = T_o \left(\frac{Q_h}{T_h} - \frac{Q_c}{T_c}\right) \quad (3.39)$$

Como sabemos a potência de entrada pela equação (3.30), podemos calcular a eficiência do sistema pela destruição de exergia. Então,

$$\eta_{II} = 1 - \frac{E_{destruída}}{P} \quad (3.40)$$

3.4.2. Cálculos Exergoeconômicos

Como visto na seção 3.3.1.1, para aplicar o método SPECO devemos seguir três passos. O primeiro é identificar os componentes e todos os fluxos de massa, calor e trabalho de saída e de entrada, com suas respectivas exergias.

Todo módulo termoeletrico é composto por três principais componentes: a cerâmica do lado frio, os termopares e a cerâmica do lado quente, como mostrado na Figura 3.21.

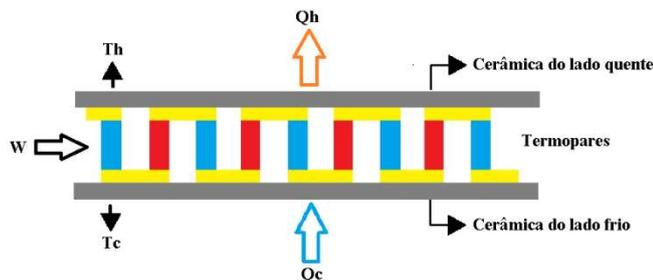


Figura 3.21 – Componentes de um módulo termoelétrico. Fonte: Autor.

A exergia divide-se em três: (i) exergia associada ao resfriamento E_{q_c} ; (ii) exergia associada ao aquecimento E_{q_h} ; e (iii) exergia relacionada à potência de entrada, E_p . O segundo passo é definir o que é produto e o que é combustível de cada componente. Também é feito o mapeamento de todos os fluxos identificados na etapa anterior. A definição de combustível e produto de cada componente é mostrada na tabela 3.3.

Componente	Combustível	Produto
Cerâmica do lado quente	E_{q_h}	P_1
Termopares	$P_1 + E_p$	P_2
Cerâmica do lado frio	P_2	E_{q_c}

Tabela 3.3 – Combustível e produto de cada componente. Fonte: Autor.

O terceiro passo é aplicar a equação de balanço de custo para cada componente do sistema. Aplicando a equação (3.18) para cada componente, obtiveram-se as equações, para a cerâmica do lado quente a equação (3.41), para os termopares a equação (3.42), e para a cerâmica do lado frio a equação (3.43).

$$\dot{C}q_h + \dot{Z}_{cer} = \dot{C}_1 \quad (3.41)$$

$$\dot{C}_1 + \dot{C}_p + \dot{Z}_{termopar} = \dot{C}_2 \quad (3.42)$$

$$\dot{C}_2 + \dot{Z}_{cer} = \dot{C}q_c \quad (3.43)$$

Onde $\dot{C}q_h$ é o custo de aquecimento, $\dot{C}q_c$ o custo de refrigeração, \dot{Z}_{cer} o custo com material cerâmico e $\dot{Z}_{termopar}$ o custo com termopares.

Resolvendo simultaneamente (3.41), (3.42) e (3.43) para $\dot{C}q_c$, obteve-se a equação (3.44). Utilizando a equação (3.17) para o lado quente, obtém-se a equação (3.45), para o lado frio, a equação (3.46). E pela equação (3.16), o custo da energia elétrica é obtido pela equação (3.47).

$$\dot{C}q_c = \dot{C}q_h + \dot{C}p + 2\dot{Z}_{cer} + \dot{Z}_{termopar} \quad (3.44)$$

$$\dot{C}q_h = c_q \cdot Eq_h \quad (3.45)$$

$$\dot{C}q_c = c_q \cdot Eq_c \quad (3.46)$$

$$\dot{C}p = c_p \cdot P \quad (3.47)$$

Substituindo (3.45), (3.46) e (3.47) em (3.44), e resolvendo para c_q , obteve-se a equação (3.48).

$$c_q = \frac{\dot{C}p + 2\dot{Z}_{cer} + \dot{Z}_{termopar}}{|Eq_c - Eq_h|} \quad (3.48)$$

Substituindo os termos Eq_c e Eq_h , obtemos a equação (3.49).

$$c_q = \frac{\dot{C}p + 2\dot{Z}_{cer} + \dot{Z}_{termopar}}{\left| Q_c \cdot \left(\frac{T_0}{T_c} - 1 \right) - Q_h \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_h} \right) \right|} \quad (3.49)$$

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi construído um protótipo de ar-condicionado com o objetivo de testar a viabilidade de utilização de um sistema termoelétrico para fins de refrigeração. Para o sistema proposto, foram utilizados dois módulos termoelétricos modelo TEC1-12706 da fabricante Hebei I.T (Shangai) Co Ltd, com dimensões de 40x40x3.4 mm, com 127 pares de material semicondutor à base de Silício, conforme apresentado na Figura 4.1. As especificações dos módulos utilizados no experimento foram encontradas no catálogo do fabricante e mostradas na Tabela 4.1.

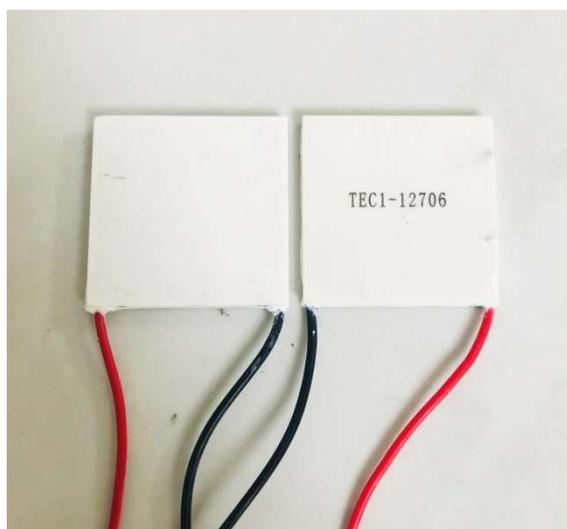


Figura 4.1 – Módulos termoelétricos utilizados no protótipo. Fonte: Autor.

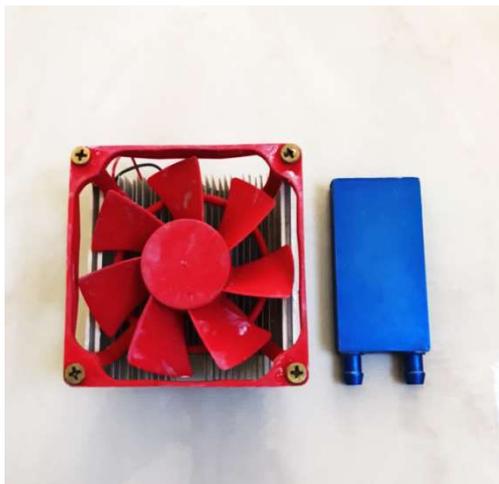
Temperatura de lado quente (T_h)	25 °C	50 °C
$Q_{m\acute{a}x}$ (W)	50	57
$\Delta T_{m\acute{a}x}$ (°C)	66	75

$I_{\text{máx}}(\text{A})$	6.4	6.4
$U_{\text{máx}}(\text{V})$	14.4	16.4
Resistência (Ω)	1.98	2.3

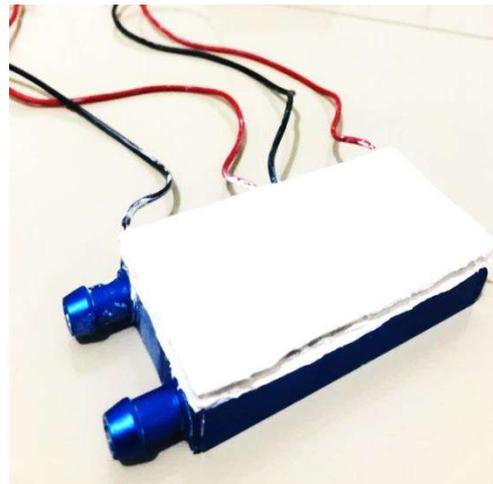
Tabela 4.1 – Especificações do módulo termoeétrico TEC1-12706. Fonte: Catálogo Hebei I.T.

Para a dissipação de calor dos módulos, foi utilizado um dissipador de calor de alumínio acoplado com um cooler no lado frio dos módulos e, para o lado quente, foi utilizado um dissipador de calor aletado resfriado à água. Para melhorar a troca de calor entre as superfícies dos dissipadores e dos módulos, foi utilizada pasta térmica. O cooler possui uma potência de 2.88 W e uma vazão de ar de 1.33 m³/min. Em todos os ensaios, o cooler foi ligado na fonte chaveada de 12V/25A. (Figura 4.2).

a)



b)



c)

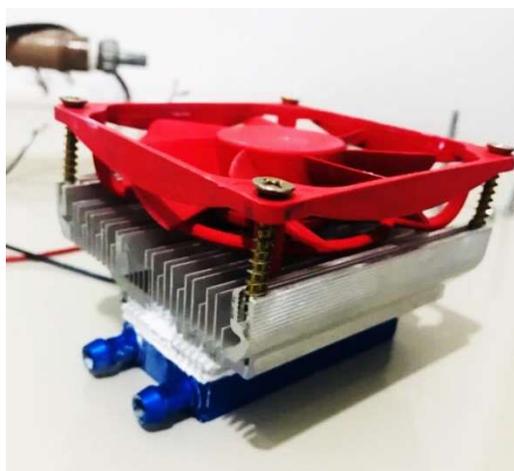


Figura 4.2 – a) Dissipadores utilizados no protótipo, b) Montagem do dissipador do lado quente utilizando pasta térmica e c) Sistema termoelétrico acoplado com os dissipadores.

Fonte: Autor.

É utilizado um reservatório, com capacidade de 5 litros, para fornecer a água que passa no dissipador conectado ao lado quente dos módulos. Para a circulação da água, foi utilizada uma bomba centrífuga BOMAX de acoplamento magnético (Figura 4.3). A vazão dessa bomba, pelo catálogo do fabricante, é de até 85 m³/h. Como essa bomba possuía uma capacidade muito maior do que a necessária para fins de teste do protótipo, foi feito um estrangulamento na saída da bomba com o objetivo de diminuir a vazão.



Figura 4.3 – Bomba utilizada no protótipo. Fonte: Autor.

Com isso, a vazão de água utilizada no protótipo foi de 2.45 L/min. Para todos os ensaios, a bomba permaneceu com a vazão constante e foi ligada diretamente na rede elétrica.

Para ajudar na dissipação de calor da água que sai do dissipador de calor conectado ao lado quente dos módulos, foi utilizada uma unidade evaporativa comum. O modelo consiste basicamente em uma serpentina em contato com várias aletas.



Figura 4.4 – Unidade evaporativa utilizada no protótipo. Fonte: Autor.

Para as medições de temperatura das superfícies dos módulos termoelétricos, foi utilizado um termômetro termopar digital modelo HT-9815 da fabricante Dongguan Xintai Instrument. Para as medições da temperatura ambiente e da temperatura interna da caixa de isopor foi utilizado um termostato modelo DM-W3001. E para medição da temperatura da água, foi utilizado um termo higrômetro da fabricante Icel modelo HT-20. Todos esses instrumentos são mostrados na figura 4.5.



Figura 4.5 – Instrumentos de medição de temperatura. Fonte: Autor

Conforme mostrado na figura 4.6, para conseguir obter as temperaturas do lado frio dos módulos, foram feitos pequenos canais no dissipador de alumínio, onde foram colocados os termopares. Para obter as temperaturas do lado quente do módulo, foram colocados outros dois termopares entre os dois módulos e em contato com o dissipador de calor resfriado à água. Como o poder de absorção de calor da água é bastante alto, a temperatura em toda face do dissipador de calor do lado quente é considerada uniforme.

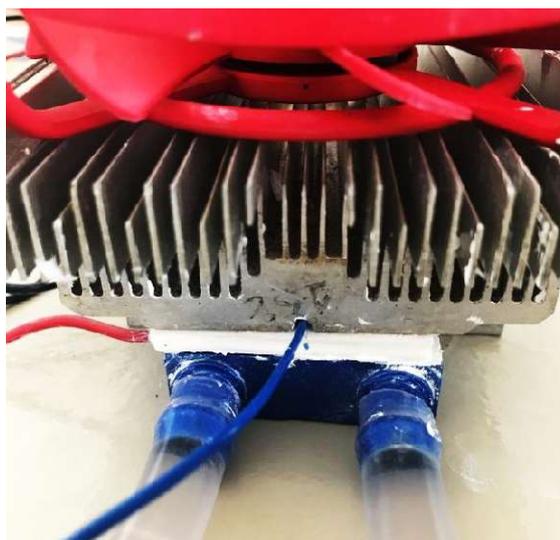


Figura 4.6 – Pequenos canais feitos no dissipador. Fonte: Autor.

Para o fornecimento de energia elétrica ao sistema termoelétrico (módulos), foram utilizadas duas fontes de alimentação da fabricante Minipa modelo MPL-3303M e uma fonte chaveada padrão 12V/25A. Cada fonte foi utilizada de acordo com as características do ensaio, conforme veremos mais adiante. Para dar mais precisão aos resultados, foram utilizados dois multímetros Agilent U1252B, para verificar as tensões em cada módulo, e dois multímetros Agilent modelo U1242B, para verificar as correntes em cada módulo.



Figura 4.7 – Fontes e multímetros. Fonte: Autor.

As características de todos os instrumentos de medidas que foram utilizados nos experimentos são apresentadas na Tabela 4.2.

Instrumentos	Resolução/Precisão
Termo Higrômetro ICCEL HT-20	0.1 °C /1%
Termostato DM-W3001	0.1 °C /±1%
Termopar HT-9815	0.1 °C /±2%
Multímetro Agilent U1252B	0.0001V /0.4 %
Multímetro Agilent U1242B	0.0001A /0.5%
Fonte de alimentação Minipa MPL-3303M	Tensão 100mV /1% Corrente 10mA /1%

Tabela 4.2 – Características dos instrumentos de medida utilizados. Fonte: Autor.

O esquema e o protótipo montado são mostrados nas figuras 4.8 e 4.9.

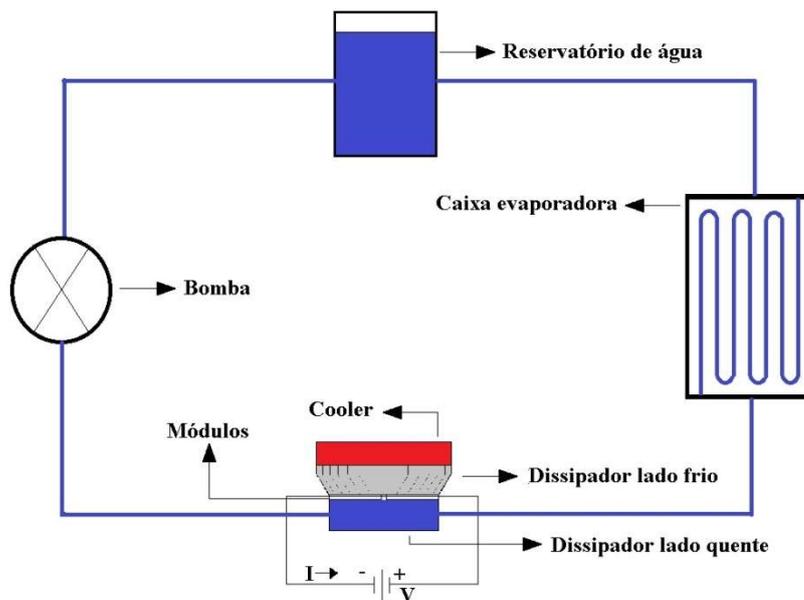


Figura 4.8 – Esquema do protótipo de ar-condicionado termoelétrico. Fonte: Autor.

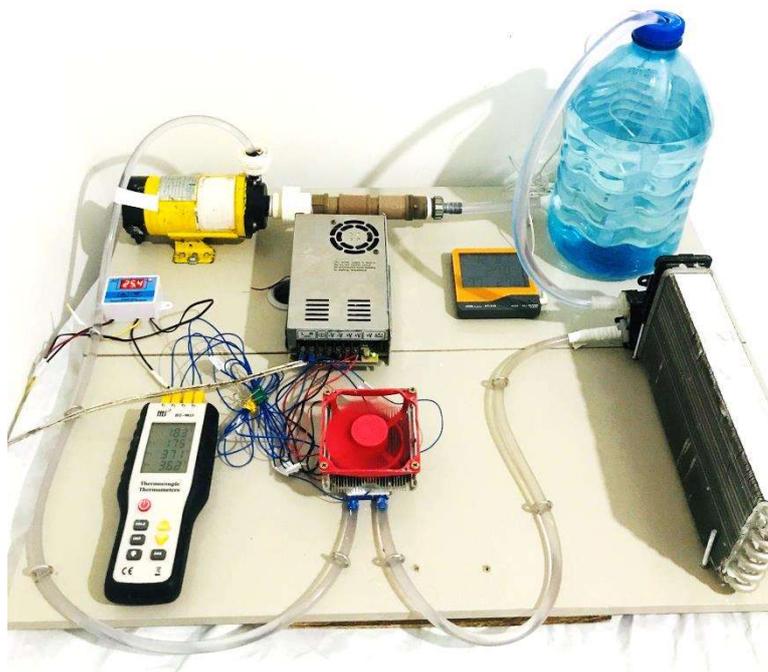


Figura 4.9 – Protótipo de ar-condicionado termoelétrico. Fonte: Autor.

Com o objetivo de simular um ambiente a ser refrigerado pelo protótipo de ar-condicionado, uma caixa de isopor de volume 8 litros foi acoplada ao sistema. Foi feito um

recorte na caixa, de modo que apenas o dissipador do lado frio e o cooler ficassem na parte de dentro.



Figura 4.10 – Protótipo de ar-condicionado termoelétrico acoplado com a caixa. Fonte: autor.



Figura 4.11 – Protótipo de ar-condicionado termoelétrico acoplado com a caixa com a tampa. Fonte: autor.

O volume de controle considerado neste estudo foram os dois módulos termoeletrônicos.

Os custos de investimento com cerâmica e termopares considerados foram $0.1 \text{ \$/cm}^2$ e $0.000889565 \text{ \$/mm}^3$ (NEMATI *et al.*, 2016), respectivamente. O custo total de capital com cerâmica e termopares considerado foi de 6.4 e 5.12 \\$, respectivamente. O preço do dólar considerado foi de 5 reais. O coeficiente de Seebeck (α), a resistência elétrica (R) e a condutividade térmica (K) foram obtidos utilizando o catálogo do fabricante.

Para o cálculo do fator de recuperação de capital foi utilizada uma taxa de juros anual de 10%, uma vida útil de 20 anos, um fator de manutenção $\varphi = 1$ e o número de horas de funcionamento por ano considerado foi de 2190 horas (6 horas diárias).

Os termos T_c e T_h nos resultados são as temperaturas médias dos dois módulos. Os termos Q_c e Q_h nos resultados são as somas das capacidades de refrigeração/aquecimento de cada módulo individual.

Também foram feitas as seguintes considerações:

- O efeito Thomsom não foi considerado no experimento, pois o coeficiente de Thomsom é muito difícil de obter experimentalmente;
- O coeficiente de Seebeck (α), a resistência elétrica (R) e a condutividade térmica (K) foram considerados constantes durante todo o experimento;
- As perdas de calor devido à radiação não foram consideradas;
- As resistências térmicas de contato entre os módulos e os dissipadores foram consideradas muito pequenas devido ao uso da pasta térmica.

Foram feitos quatro tipos de ensaios com o objetivo de se analisar os parâmetros de desempenho e a viabilidade do protótipo de ar-condicionado termoeletrico. Os dois primeiros foram feitos no laboratório da RECOGAS-UFPB. O terceiro e quarto ensaios foram feitos no laboratório de motores e acionamentos elétricos (LMA) da UFPB. Os detalhes de cada ensaio são apresentados nas próximas seções.

4.1 PRIMEIRO ENSAIO: VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA NO MÓDULO

Primeiramente, para verificar a menor temperatura que os módulos conseguem atingir, foi feito um ensaio com o sistema termoelétrico conectado apenas ao dissipador do lado quente, conforme mostrado na Figura 4.12. O sistema foi alimentado com a fonte chaveada. A tensão, corrente e temperatura da água foram mantidas constantes. Foram utilizados quatro multímetros para medir as tensões e as correntes dos dois módulos.

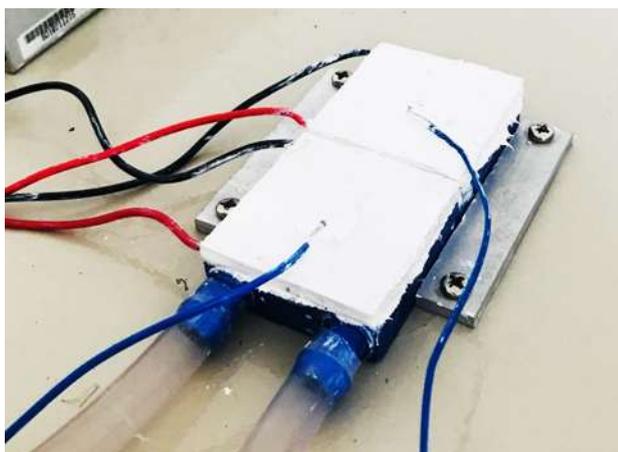


Figura 4.12 – Sistema termoelétrico sem o dissipador no lado frio. Fonte: Autor.

Foram colocados dois termopares nos lados frios de cada módulo. Cada temperatura foi medida dez vezes, uma a cada 10 segundos. Portanto, o sistema ficou ligado durante 100 segundos para esse primeiro teste. Para uma maior confiabilidade dos resultados, o teste foi feito três vezes em iguais condições.

Esse primeiro ensaio foi realizado no laboratório da RECOGAS-UFPB. A temperatura da água medida com o termo higrômetro e a temperatura ambiente medida com o termostato foram de 26.2 °C e 27.1 °C, respectivamente.

4.2 SEGUNDO ENSAIO: VARIANDO A TEMPERATURA DA ÁGUA.

Para este segundo ensaio, o parâmetro variável foi a temperatura da água que é utilizada para resfriar o lado quente do sistema termoelétrico. A temperatura da água foi testada para os seguintes valores: 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C e foram observados os

efeitos nos parâmetros energéticos, exergéticos e exergonômicos do sistema. As medidas da temperatura da água foram obtidas utilizando o termo higrômetro ICEL HT-20.

Os módulos, assim como no primeiro ensaio, foram alimentados pela fonte chaveada 12V/25A. Foram utilizados quatro multímetros para medir os valores das tensões e correntes de cada módulo, que neste ensaio permaneceram constantes. A corrente fornecida pela fonte para cada módulo foi de 3.653 A e a tensão foi de 11.621 V.

As temperaturas dos lados quente e frio dos módulos foram obtidas com o termopar. Foram colocadas duas pontas do termopar nos pequenos canais feitos no dissipador de alumínio do lado frio e duas pontas em contato com o dissipador do lado quente.

Todo o teste foi feito no laboratório da RECOGAS-UFPB. A temperatura ambiente do laboratório medido pelo termostato foi de 25.2 °C. O protótipo foi ligado e, para cada valor de temperatura da água, foram feitas cinco medições, uma a cada 30 segundos, até as temperaturas se estabilizarem. Para uma maior confiabilidade, esse teste foi repetido três vezes. A bancada experimental desse ensaio foi mostrada na Figura 4.9.

4.3 TERCEIRO ENSAIO: VARIANDO A CORRENTE DE ENTRADA DO SISTEMA.

Para o terceiro ensaio, a corrente de alimentação dos módulos foi variada nos valores de 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 e 4A e foram observados os efeitos nos parâmetros energéticos, exergéticos e exergoeconômicos do sistema. Todo o ensaio foi feito no laboratório de motores e acionamentos elétricos (LMA) da UFPB. A temperatura ambiente e a temperatura da água, medidas com o termostato, foram de 27.2 °C e 29.8 °C, respectivamente.

Os dois módulos foram ligados nas fontes Minipa MPL-3303M, um em cada fonte. Como a corrente máxima que cada fonte conseguia suportar era de 3A, as duas fontes foram ligadas em paralelo. Entre as fontes e os módulos, foram colocados quatro multímetros para medir as tensões e correntes utilizadas por cada módulo. Para cada faixa de corrente, foi utilizada a tensão máxima que aquela corrente suportava. As temperaturas dos lados quente e frio dos módulos foram obtidas com o termopar.

O protótipo foi ligado e, para cada valor de corrente, foram feitas duas medições, uma a cada 30 segundos, pois, depois de 30 segundos, as temperaturas ficavam

estabilizadas. Para uma maior confiabilidade dos resultados, esse teste foi repetido três vezes com o sistema sendo desligado por 20 minutos entre cada teste. A bancada experimental desse ensaio é mostrada na figura 4.13.



Figura 4.13 – Bancada experimental para o ensaio variando a corrente. Fonte: Autor.

4.4 QUARTO ENSAIO: SIMULAÇÃO DE UM AMBIENTE A SER REFRIGERADO

No quarto ensaio, para simular um ambiente a ser refrigerado, foi utilizada uma caixa de isopor de volume 8 litros conforme mostrado na Figura 4.14. A temperatura ambiente e a temperatura da água, medidas com o termostato, foram de 27 °C e 28.8 °C, respectivamente. Foram utilizadas as duas fontes da seção anterior para alimentar o sistema termoelétrico. Como o protótipo possuía apenas dois módulos, foi ajustada uma corrente de entrada no valor de 3A para cada módulo. A bancada experimental para esse ensaio é mostrada na figura 4.15.

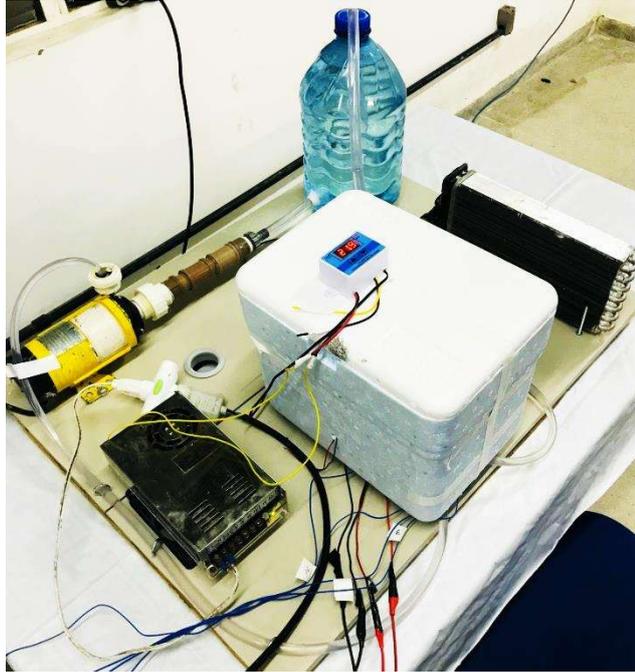


Figura 4.14 – Ensaio com a caixa de isopor. Fonte: autor.

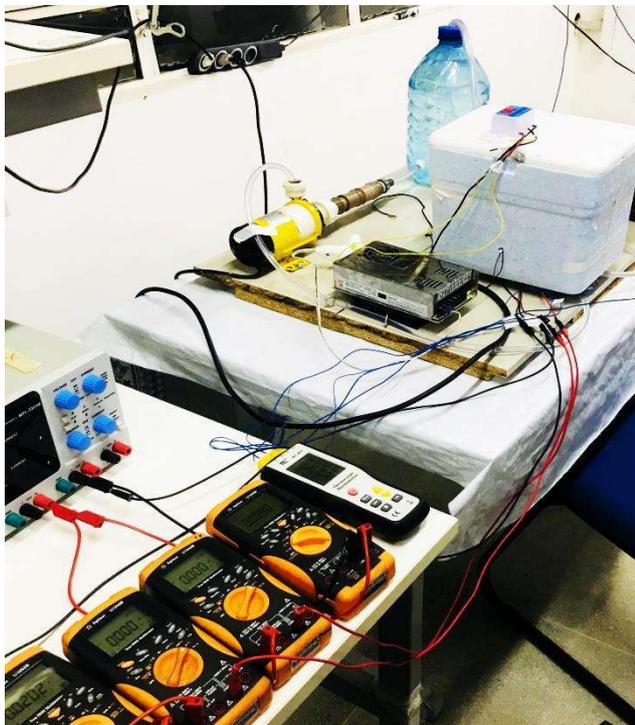


Figura 4.15 – Bancada experimental para o ensaio com a caixa de isopor.

Fonte: Autor.

A ponta do termostato foi colocada dentro da caixa de isopor, para fornecer uma temperatura em tempo real de dentro da caixa. O protótipo foi ligado durante 20 minutos e foram feitas 20 medições da temperatura interna da caixa, uma a cada minuto.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PRIMEIRO ENSAIO: VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA NO MÓDULO

Para o primeiro ensaio, o principal objetivo é analisar o comportamento da temperatura de lado frio (T_c) ao longo do tempo e observar quanto o módulo consegue retirar de calor. O comportamento de T_c ao longo do ensaio é mostrado na Figura 5.1.

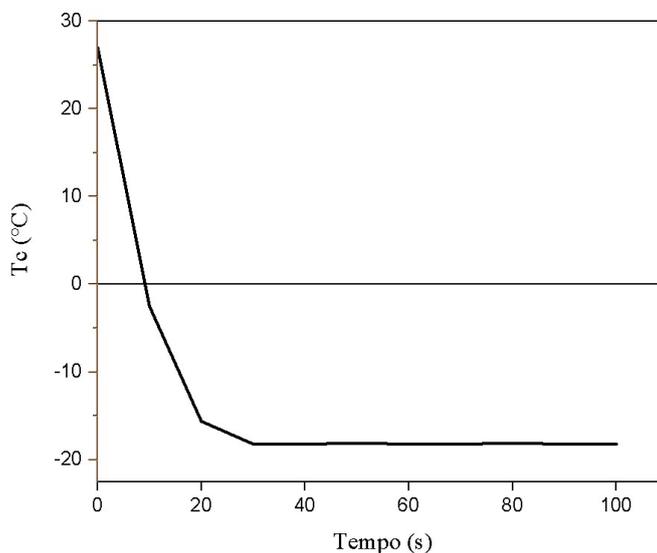


Figura 5.1 – Comportamento de T_c em função do tempo. Fonte: Dados da pesquisa.

Como nenhum dissipador foi utilizado no lado frio, todo o frio gerado foi mantido na superfície do módulo (cerâmica do lado frio). Como observado na figura 5.1, o sistema

em 10 segundos de funcionamento conseguiu deixar T_c abaixo de $0\text{ }^\circ\text{C}$. Após 30 segundos, T_c tende a se estabilizar. O menor valor de T_c alcançado no ensaio foi de $-18.2\text{ }^\circ\text{C}$.

Nesse ensaio, percebeu-se que, de fato, os módulos conseguem baixar a temperatura T_c para valores bem abaixo de zero ($-18.2\text{ }^\circ\text{C}$). E isso se deve em grande parte ao poder de absorção de calor da água, pois, como visto anteriormente, nos módulos termoeletrônicos quanto mais calor se consegue dissipar no lado quente, mais frio é gerado no outro lado do módulo.

Conforme veremos na próxima seção, quando o dissipador do lado frio acoplado com o cooler é conectado à superfície do lado frio, a temperatura T_c atingirá o valor mínimo em torno de $10\text{ }^\circ\text{C}$. Esse comportamento é esperado, pois, com essa configuração, o frio, em vez de se acumular na superfície cerâmica do módulo, vai ser dissipado para o ar.

5.2. SEGUNDO ENSAIO: VARIANDO A TEMPERATURA DA ÁGUA.

Primeiramente, é importante entender o comportamento da temperatura de lado frio (T_c) e da temperatura de lado quente (T_h) ao longo do ensaio. Os comportamentos de T_c e T_h ao longo do ensaio são mostrados na Figura 5.2.

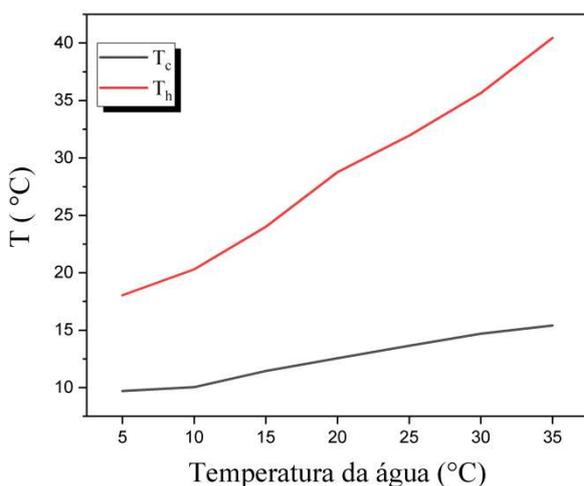


Figura 5.2 – Efeito da temperatura da água em T_c e T_h . Fonte: Dados da pesquisa.

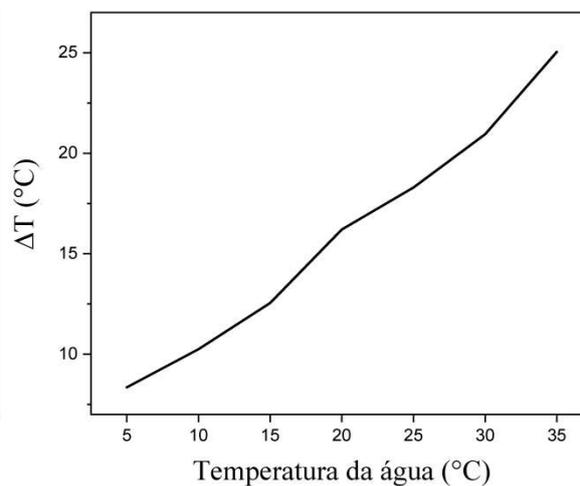


Figura 5.3 - Efeito da temperatura da água em ΔT . Fonte: Dados da pesquisa.

Quanto maior a temperatura da água, menor será o gradiente de temperatura entre o dissipador e a cerâmica do lado quente. Como consequência disso, menor será a dissipação

de calor no lado quente e menos frio será gerado no outro lado do módulo. Nessa situação, T_h e T_c vão aumentar com o aumento da temperatura da água.

Para esse ensaio, T_c teve o menor valor com a água em 5 °C, onde atingiu 9.7 °C. Para uma temperatura da água de 35 °C, T_c obtido foi de 15.4 °C. Já para T_h , o menor valor obtido foi de 18.1°C, quando a água media a temperatura de 5 °C, e o maior valor de T_h foi de 40.5 °C, obtido com a água em 35 °C.

Como a temperatura de lado quente aumenta mais rápido do que a temperatura de lado frio nesse ensaio, o ΔT aumenta com o aumento da temperatura da água, conforme mostrado na Figura 5.3.

O maior ΔT obtido no ensaio foi de 25 °C, para a temperatura da água de 35 °C.

Os parâmetros de desempenho energéticos, Q_c e COP, são mostrados nas Figuras 5.4 e 5.5.

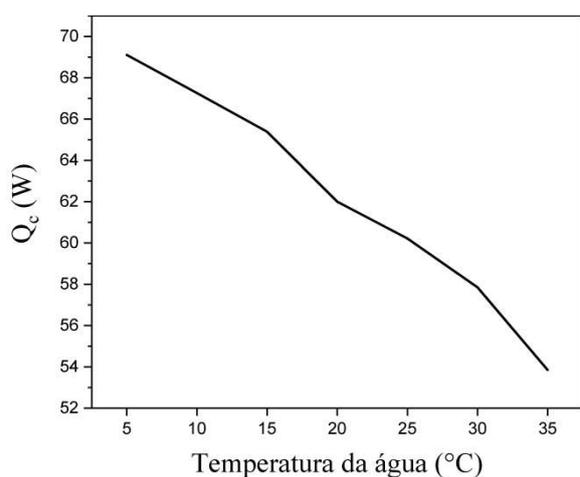


Figura 5.4 - Efeito da temperatura da água em Q_c . Fonte: Dados da pesquisa.

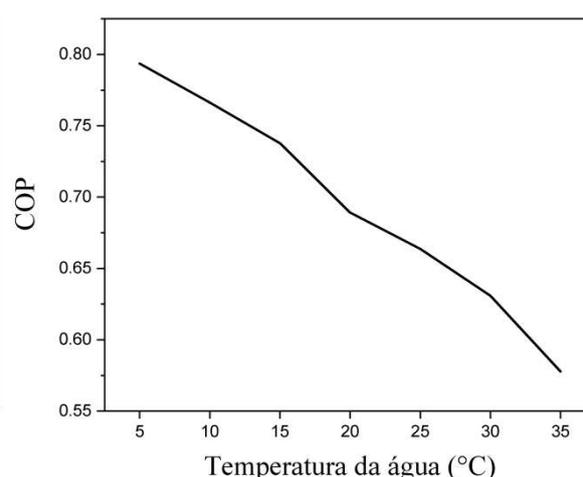


Figura 5.5 - Efeito da temperatura da água no COP. Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme visto na figura 5.4, a capacidade de refrigeração diminuiu com o aumento da temperatura da água. Isso se deve principalmente ao aumento da diferença de temperatura entre os dois lados do módulo. Para esclarecer melhor, observando a equação da capacidade de refrigeração [$Q_c = \alpha IT_c - 0.5RI^2 - K\Delta T$], percebemos que o efeito Peltier [αIT_c] e o efeito Joule [$-0.5RI^2$] praticamente não sofrem alterações durante o ensaio, pois a corrente é constante, o coeficiente de Seebeck é constante e tem valor próximo de 0.05 V/K e R é constante. Então, Q_c será influenciado praticamente apenas

pelo efeito de Fourier $[-K\Delta T]$. Como a condutividade térmica K é constante, ΔT vai ser determinante para o valor de Q_c . Como visto anteriormente, ΔT aumenta com o aumento da temperatura da água, então o termo $[-k\Delta T]$ aumentará linearmente com o aumento da temperatura da água. Como consequência, Q_c diminui com maior temperatura da água.

Aqui, se percebe a importância de se ter uma boa dissipação de calor dos módulos, pois assim a diferença de temperatura será menor e a capacidade de refrigeração do sistema aumentará. O maior valor de Q_c obtido no ensaio foi de 69.11 W, correspondente à temperatura da água de 5 °C. O menor valor de Q_c foi de 53.85 W, na temperatura da água de 35 °C.

É importante frisar que apesar da corrente e da tensão fornecida pela fonte permanecerem constantes nesse ensaio, a potência de entrada é variável. Pois, a tensão nos módulos é composta de duas parcelas, a tensão de Joule e a tensão termoelétrica $[V = \alpha\Delta T + IR]$. Como a tensão termoelétrica varia de acordo com a diferença de temperatura dos lados do módulo, a potência também vai variar. Esse acréscimo da tensão termoelétrica causa um aumento, em média, de 5% da potência fornecida aos módulos. Para esse ensaio, a potência variou entre 87 e 93W.

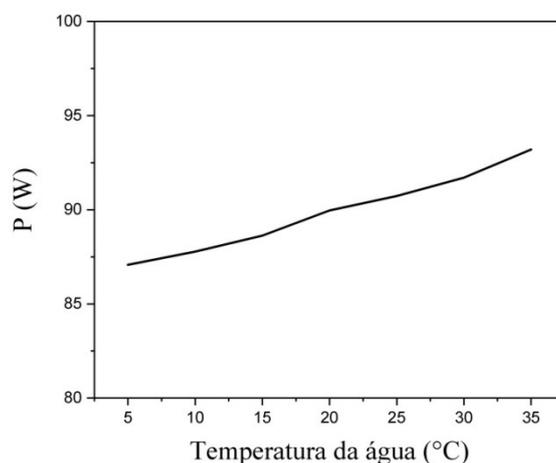


Figura 5.6 – Efeito da temperatura da água na potência. Fonte: Dados da pesquisa.

O coeficiente de desempenho (COP) também diminuiu com o aumento da temperatura da água. Observando a equação do coeficiente de desempenho $[COP = \frac{Q_c}{P}]$, para uma potência de entrada com pouca variação, que é o caso desse ensaio, o COP

dependerá mais de Q_c . Como Q_c diminui, o COP também diminuirá. O COP mais alto foi obtido na temperatura da água de 5 °C, cujo valor foi de 0.79.

Partindo para os parâmetros exergéticos, para uma temperatura ambiente de 25.2 °C, a temperatura da água não teve tanta influência na destruição de exergia. Olhando para a equação da destruição de exergia [$E_{\text{destruída}} = T_o \cdot \left(\frac{Q_h}{T_h} - \frac{Q_c}{T_c} \right)$], o segundo termo do lado direito praticamente permanece constante durante todo o ensaio, e, como a temperatura ambiente é constante, a exergia destruída sofre pouca variação. Para o ensaio dessa seção, a destruição de exergia permaneceu com valores próximos a 54W.

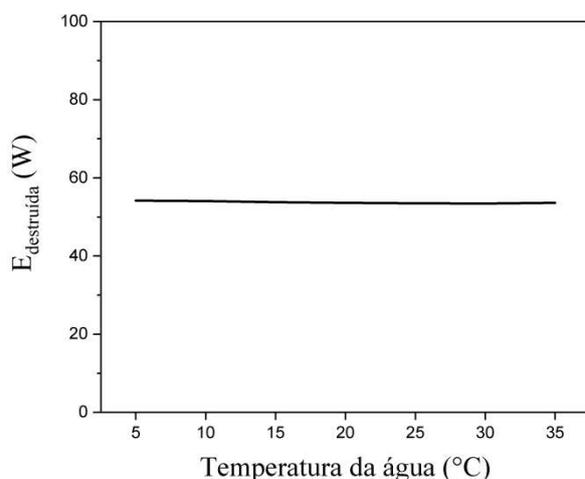


Figura 5.7 - Efeito da temperatura da água na destruição de exergia.
Fonte: Dados da pesquisa.

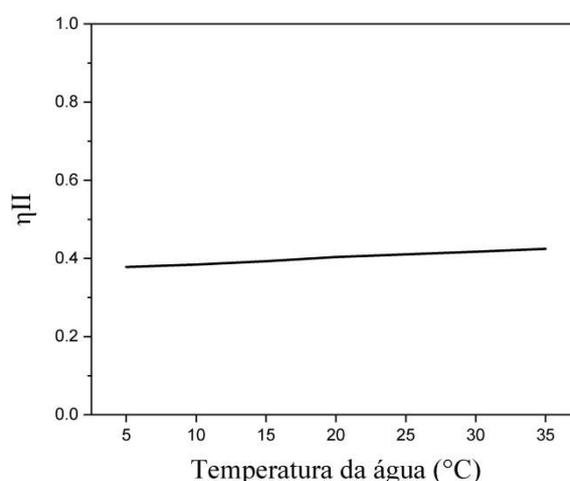


Figura 5.8 - Efeito da temperatura da água na eficiência exergética.
Fonte: Dados da pesquisa.

A eficiência exergética também sofreu pouca alteração devido ao aumento de temperatura da água, pois, como nesse ensaio a potência e a destruição de exergia têm pouca variação na equação da eficiência exergética [$\eta_{II} = 1 - \frac{E_{\text{destruída}}}{P}$], então a eficiência também sofrerá pouca variação. O maior valor de eficiência exergética pela destruição de exergia foi de 0.42 na correspondente temperatura da água de 35 °C.

A Figura 5.9 mostra que a exergia de refrigeração diminuiu durante o ensaio. Observando a equação da exergia de refrigeração [$E_{q_c} = \left(\frac{T_o}{T_c} - 1 \right) \cdot Q_c$], podemos entender esse comportamento. Sabemos que Q_c diminui com o aumento da temperatura da água. Como o termo $\left[\frac{T_o}{T_c} - 1 \right]$ também diminui com o aumento da temperatura da água,

consequentemente Eq_c também diminuirá. A maior exergia de refrigeração obtida foi de 3.78 W, para uma temperatura da água de 5 °C.

Como Eq_c diminui com o aumento da temperatura da água e a potência de entrada tem pouca variação no ensaio, a eficiência exergética de refrigeração diminuirá com o aumento da temperatura da água, conforme mostrado na Figura 5.10. A maior eficiência exergética de refrigeração foi de 0.043, obtido na temperatura da água de 5 °C.

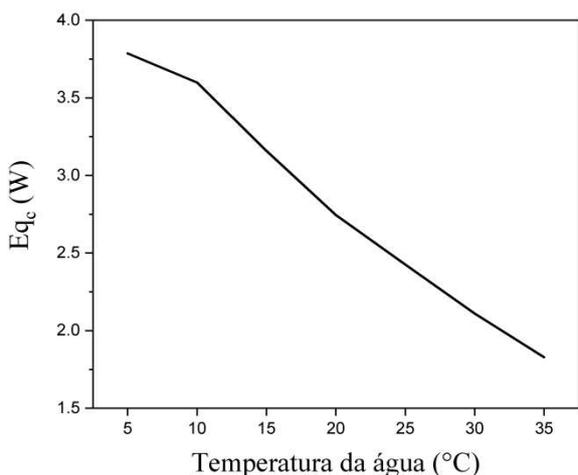


Figura 5.9 - Efeito da temperatura da água na exergia de refrigeração.
Fonte: Dados da pesquisa.

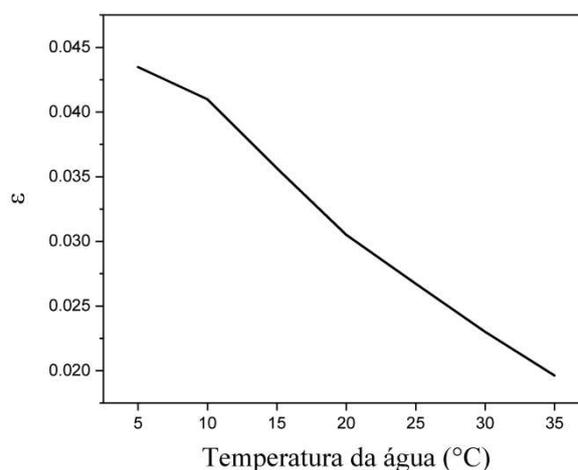


Figura 5.10 - Efeito da temperatura da água na eficiência exergética de refrigeração. Fonte: Dados da pesquisa.

Pode-se notar, que nesse ensaio, a eficiência exergética de refrigeração é bem menor do que o COP. Essa baixa eficiência pode ser explicada pela degradação da energia que acontece dentro dos componentes do módulo na transformação de eletricidade em calor. A energia elétrica é uma forma organizada de energia e possui 100% de exergia. Já o calor é uma forma desorganizada de energia e por isso possui menor exergia. Assim, os sistemas termoelétricos utilizados para refrigeração possuem baixa demanda de exergia.

Uma solução para melhorar a viabilidade econômica da aplicação desse tipo de sistema em um ar-condicionado seria combinar a tecnologia termoelétrica com fontes de baixa exergia como, por exemplo, painéis solares. Assim, teríamos a junção de duas tecnologias limpas que teriam como fonte de alimentação a luz solar.

Entrando no campo da exergoeconomia, um dos parâmetros de maior importância é o custo por unidade de refrigeração, c_q (\$/Ws), pois assim é possível comparar os custos por unidade de energia do sistema em estudo com os custos de outros tipos de sistema.

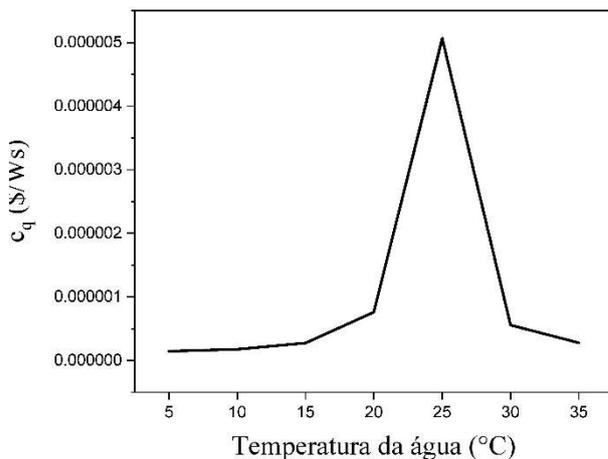


Figura 5.11 - Efeito da temperatura da água no c_q .

Fonte: Dados da pesquisa.

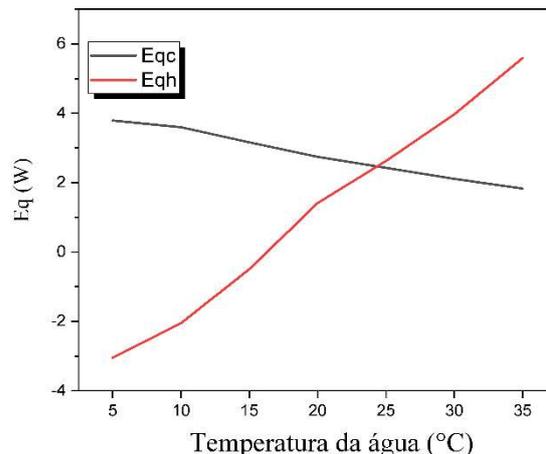


Figura 5.12 - Efeito da temperatura da água em E_{qc} e E_{qh} .

Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme a Figura 5.11, o custo por unidade de refrigeração/aquecimento do sistema, aumenta e depois diminui com o aumento da temperatura da água. Esse comportamento pode ser explicado observando a equação do custo por unidade de refrigeração/aquecimento $[c_q = \frac{\dot{C}_p + 2\dot{Z}_{cer} + \dot{Z}_{termopar}}{|E_{qc} - E_{qh}|}]$. Como o numerador da equação permanece praticamente constante, o valor de c_q dependerá do denominador $|E_{qc} - E_{qh}|$. Observando a Figura 5.12, nota-se que a diferença entre E_{qc} e E_{qh} diminui até próximo de uma temperatura da água de 25 °C. Quando as curvas da Figura 5.12 se interceptam, o termo $|E_{qc} - E_{qh}|$ atingirá o valor mínimo e c_q o valor máximo, o que explica o ponto de pico na Figura 5.11. Após isso, a diferença volta a aumentar e por consequência c_q diminui.

Aqui, é visto a importância de se fazer uma prévia análise exergoeconômica na hora de projetar um ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos, pois, para cada característica de utilização, E_{qc} e E_{qh} podem diminuir ou aumentar. O ideal é projetar o ar-condicionado em que a diferença entre esses dois termos seja maior possível para um maior valor de E_{qc} possível. Assim, teremos um menor custo por unidade de refrigeração para determinada configuração do sistema.

Por último, o segundo parâmetro mais importante no estudo exergoeconômico de um ar-condicionado é o custo de refrigeração \dot{C}_{qc} (\$/s). Esse parâmetro nos mostrará quanto precisará ser pago por tempo de funcionamento do sistema.

O custo de refrigeração depende exclusivamente de c_q e Eq_c e seu comportamento é mostrado na figura 5.13.

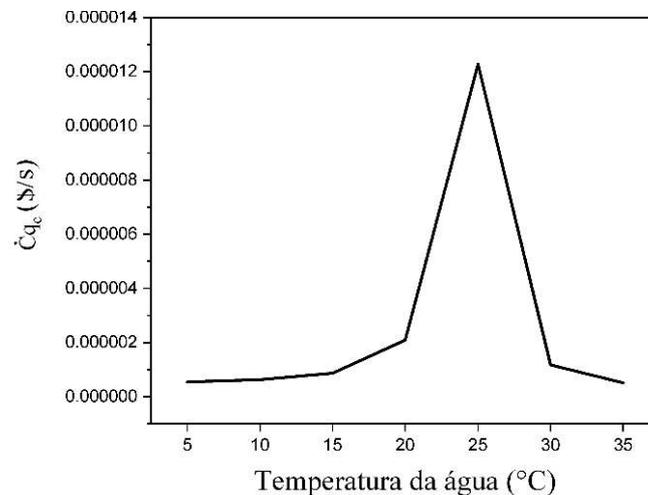


Figura 5.13 – Efeito da temperatura da água em $\hat{C}q_c$. Fonte: Dados da pesquisa.

É possível constatar que o custo de refrigeração no sistema aumenta até a temperatura de 25 °C aproximadamente e depois tende a cair. Esse comportamento se deve principalmente ao comportamento de c_q , pois, como podemos ver na equação do custo de refrigeração [$\hat{C}q_c = c_q \cdot Eq_c$], $\hat{C}q_c$ depende diretamente de c_q .

Vale salientar que o objetivo do sistema é ter o menor custo de refrigeração. Após 25 °C, apesar do $\hat{C}q_c$ diminuir, nossa exergia de refrigeração é menor. Então, olhando pelo lado da economia, é melhor para o nosso sistema trabalhar com temperaturas de entrada da água mais baixas.

5.3 TERCEIRO ENSAIO: VARIANDO A CORRENTE DE ENTRADA DO SISTEMA.

Como feito na seção anterior, primeiramente entenderemos o comportamento da temperatura de lado frio (T_c) e da temperatura de lado quente (T_h) ao longo do ensaio. Conforme mostrado na Figura 5.14, T_c diminui e T_h aumenta com o aumento da corrente. Esse comportamento pode ser explicado pela característica intrínseca dos módulos termoelétricos, que quanto maior a corrente aplicada maior será o gradiente de temperatura entre os lados frio e quente.

A menor temperatura alcançada de T_c foi de $10.36\text{ }^\circ\text{C}$, que ocorreu enquanto a corrente estava em seu valor máximo, 4A. A maior temperatura de T_c foi de $21.78\text{ }^\circ\text{C}$ na correspondente corrente de 0.5A. A maior temperatura de T_h alcançada foi de $44.83\text{ }^\circ\text{C}$, obtida na corrente de 4A. A menor temperatura de T_h foi de $29.62\text{ }^\circ\text{C}$, correspondendo a uma corrente de 0.5A.

Como T_c diminui e T_h aumenta com o aumento da corrente, o ΔT aumentará com o aumento da corrente, conforme mostrado na Figura 5.15. O maior valor de ΔT no ensaio foi de $34.47\text{ }^\circ\text{C}$, obtido com a corrente de 4A.

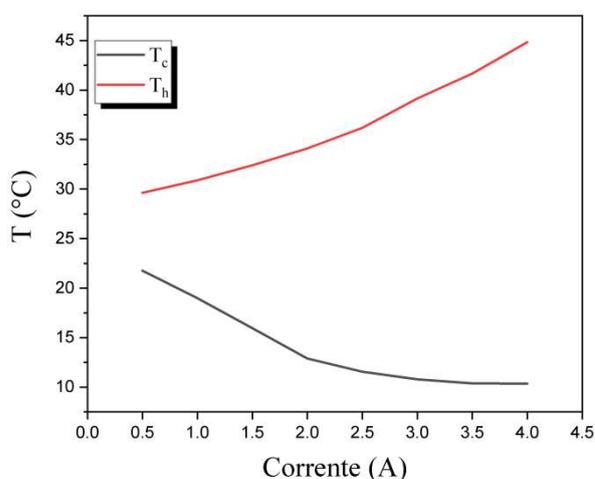


Figura 5.14 – Efeito da corrente em T_c e T_h . Fonte: Dados da pesquisa.

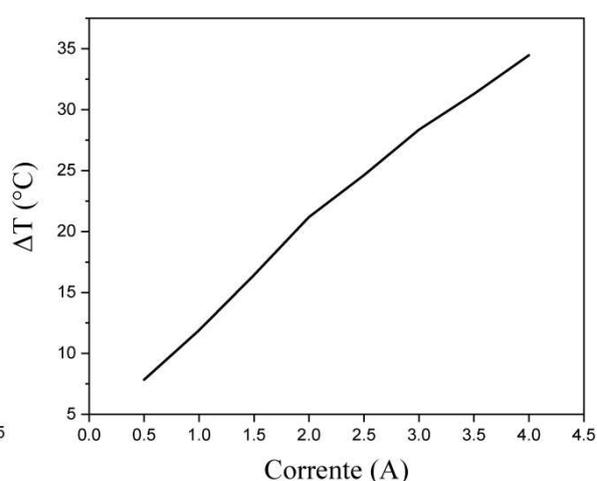


Figura 5.15 – Efeito da corrente em ΔT . Fonte: Dados da pesquisa.

Como pode ser visto na figura 5.16, a capacidade de refrigeração aumenta com o aumento da corrente. Porém, o gráfico de Q_c possui concavidade para baixo, o que nos indica que Q_c terá um ponto de pico e, após isso, diminuirá. Para entendermos esse comportamento, precisamos olhar novamente para a equação da capacidade de refrigeração [$Q_c = \alpha IT_c - 0.5RI^2 - K\Delta T$]. Q_c é a soma de três parcelas: o efeito de peltier [αIT_c], o efeito joule [$-0.5RI^2$] e o efeito Fourier [$-k\Delta T$]. A segunda e terceira parcela de Q_c são as irreversibilidades internas do sistema.

Falando primeiramente do efeito Fourier, [$-k\Delta T$], esse termo tende a aumentar com maiores valores de corrente, pois, como visto anteriormente, o aumento da corrente aumenta ΔT . O efeito Fourier é diretamente influenciado pela dissipação de calor nos módulos, quanto maior a dissipação de calor, menor a diferença de temperatura entre os lados.

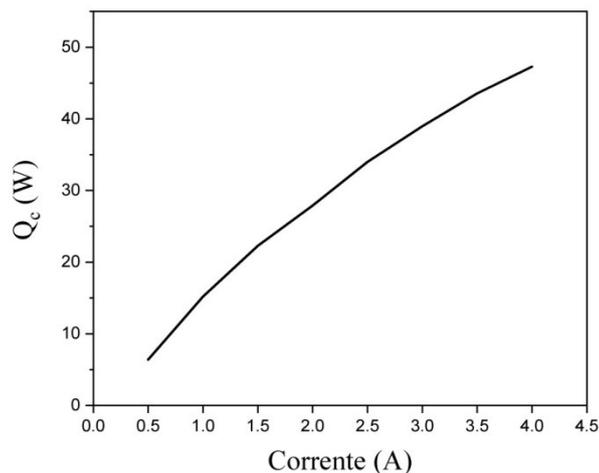


Figura 5.16 – Efeito da corrente em Q_c . Fonte: Dados da pesquisa.

O efeito Joule ($-0,5RI^2$) aumenta potencialmente com o aumento da corrente. Quanto maiores forem os valores de corrente, maiores serão as perdas devido a esse efeito.

O efeito Peltier, para os valores de correntes deste ensaio, se sobressaiu aos demais. O maior valor de Q_c obtido no ensaio foi de 47,29 W, que corresponde à corrente de 4A.

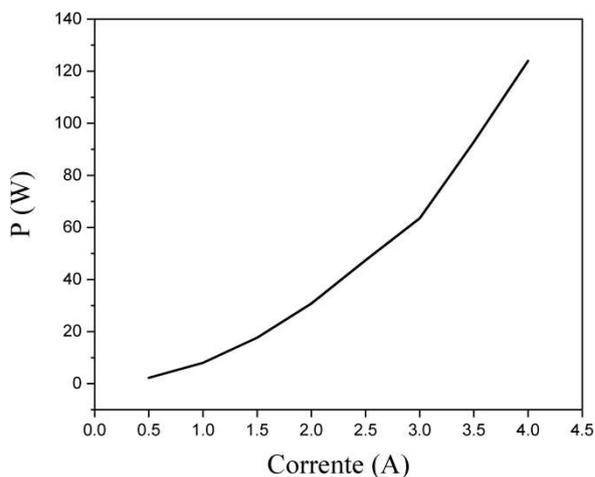


Figura 5.17 – Efeito da corrente na potência do sistema.
Fonte: Dados da pesquisa.

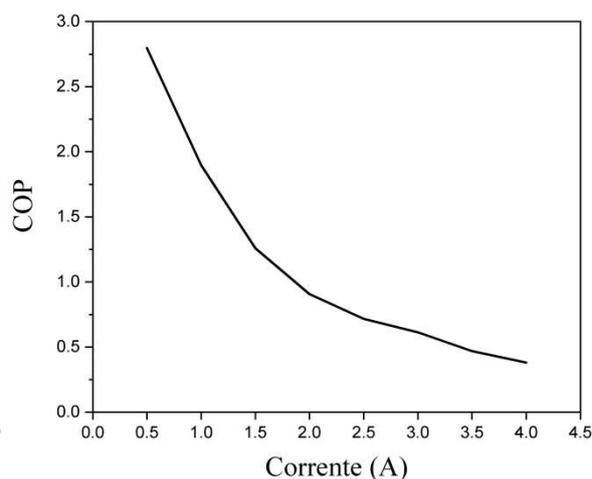


Figura 5.18 – Efeito da corrente no COP.
Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme mostrado na Figura 5.18, O COP do sistema diminuiu com o aumento da corrente. Essa é uma característica intrínseca dos módulos termoelétricos e pode ser

facilmente compreendida observando a equação do coeficiente de desempenho [$COP = \frac{Q_c}{P}$]. Pois, sabe-se que a potência de entrada do sistema, que é o denominador da equação (figura 5.17), aumenta mais rapidamente do que a capacidade de refrigeração, que é o numerador da equação. O maior COP obtido no ensaio foi de 2.79, que corresponde à corrente de 0.5A.

Aqui, é visto que utilizar os módulos com correntes de entradas mais baixas é um ponto chave para melhorar o desempenho geral do sistema. Uma solução então para melhorar o desempenho de um ar-condicionado termoelétrico seria aumentar o número de módulos utilizados, diminuindo assim a corrente utilizada por cada módulo individual. Assim, teríamos um mesmo valor de Q_c , mas um COP geral bem maior.

Partindo para os parâmetros exergeticos, foram obtidos no ensaio a destruição de exergia e a eficiência pela destruição de exergia. Olhando primeiro para a destruição de exergia, nota-se que a exergia destruída aumenta com o aumento da corrente, como mostrado na Figura 5.19.

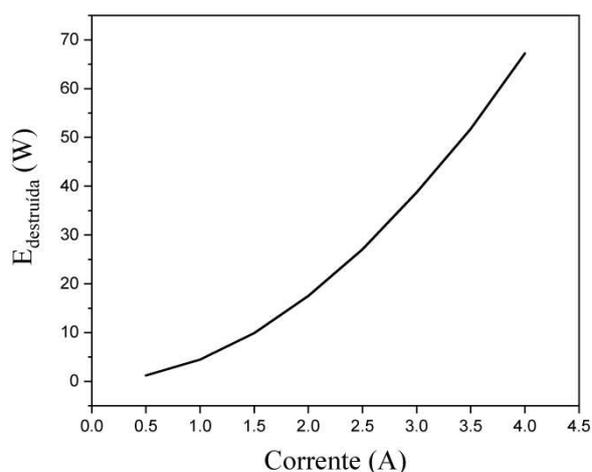


Figura 5.19 – Efeito da corrente na destruição de exergia.

Fonte: Dados da pesquisa.

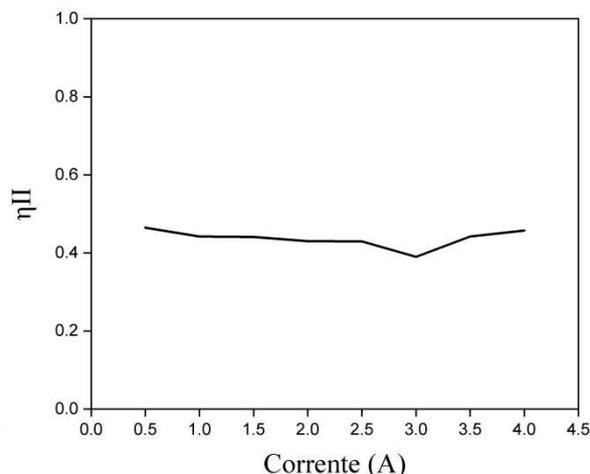


Figura 5.20 – Efeito da corrente na eficiência exergetica.

Fonte: Dados da pesquisa.

Como visto anteriormente, para maiores valores de correntes, maiores serão as perdas devido ao efeito Joule e ao efeito Fourier, que são as irreversibilidades do sistema. O maior valor de destruição de exergia obtido no ensaio foi de 68.24 W, que corresponde à corrente de 4A.

Apesar da destruição de exergia aumentar com a corrente, a eficiência exergética não sofreu alterações significativas. Pois, assim como a destruição de exergia, a potência na equação da eficiência $[\eta_{II} = 1 - \frac{E_{destruída}}{P}]$ também aumenta. O comportamento da eficiência exergética pela destruição de exergia é mostrado na figura 5.19. O maior valor de eficiência exergética obtido no ensaio foi de 0.46, na correspondente corrente de 0.5A.

Para a temperatura ambiente de 27.2 °C, nota-se que tanto a exergia de refrigeração quanto a de aquecimento aumentam com o aumento da corrente. Esses comportamentos são mostrados nas Figuras 5.21 e 5.22.

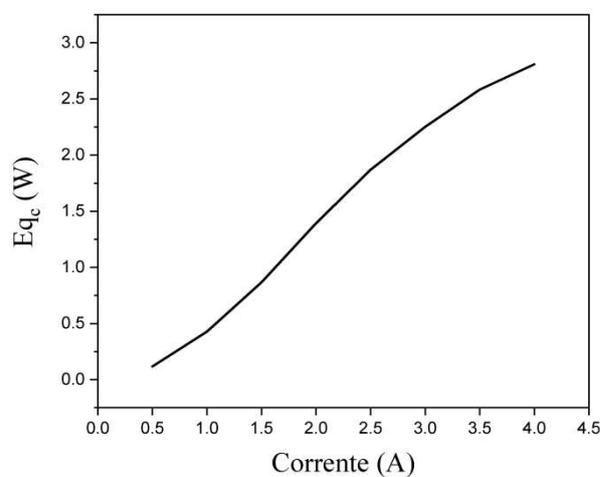


Figura 5.21 - Efeito da corrente na exergia de refrigeração.
Fonte: Dados da pesquisa.

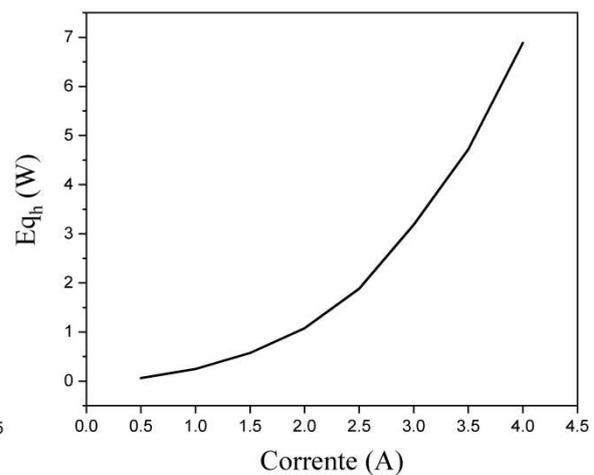


Figura 5.22 - Efeito da corrente na exergia de aquecimento.
Fonte: Dados da pesquisa.

Para entender os comportamentos das curvas das figura 5.21 e 5.22 é preciso observar as equações $[Eq_h = (1 - \frac{T_o}{T_h}) \cdot Q_h]$ e $[Eq_c = (\frac{T_o}{T_c} - 1) \cdot Q_c]$. Primeiramente, para Eq_c , sabemos que Q_c aumenta com o aumento da corrente. Como o segundo termo $[\frac{T_o}{T_c} - 1]$ também aumenta com o aumento da corrente, consequentemente Eq_c também aumentará. O mesmo acontece para o termo Eq_h , já que Q_h e $[1 - \frac{T_o}{T_h}]$ aumentam com o aumento da corrente, consequentemente Eq_h também aumentará. O maior valor de Eq_c obtido no ensaio foi de 2.8 W, que corresponde a uma corrente de 4A. O maior valor de Eq_h foi de 6.8 W, também na corrente de 4A.

Assim como o COP, a eficiência exergética de refrigeração também diminui com o aumento da corrente. Pois, a potência, que é o denominador da equação [$\varepsilon = \frac{E_{qc}}{P}$], cresce mais rapidamente do que a exergia de refrigeração, que é o numerador. O maior valor de eficiência exergética de refrigeração obtido no ensaio foi de 0.051, na correspondente corrente de 1A.

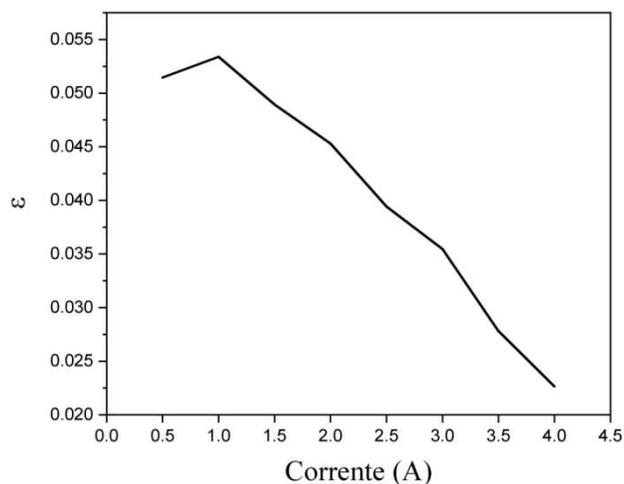


Figura 5.23 – Efeito da corrente na eficiência exergética de refrigeração.
Fonte: Dados da pesquisa.

Como visto na seção anterior, o sistema termoelétrico para refrigeração possui uma eficiência exergética muito baixa em relação ao COP, devido principalmente à degradação da energia que ocorre dentro dos módulos, na transformação de energia elétrica em calor.

O custo por unidade de refrigeração/aquecimento, c_q , é mostrado na Figura 5.24.

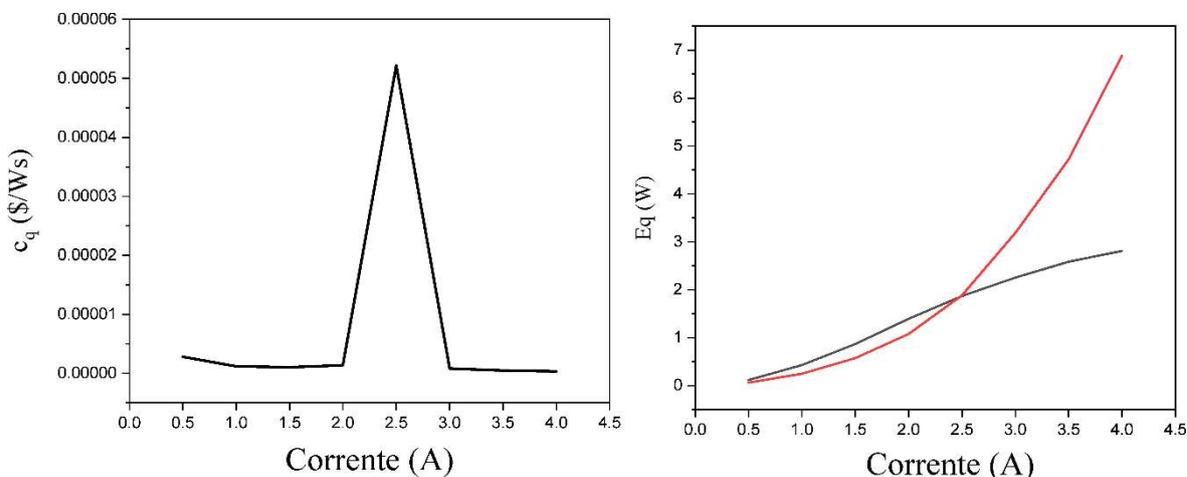


Figura 5.24 – Efeito da corrente no custo por unidade de refrigeração/aquecimento.

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 5.25 - Efeito da corrente em Eq_c e Eq_h . Fonte: Dados da pesquisa.

Assim como no ensaio anterior variando a temperatura da água, o custo por unidade de refrigeração/aquecimento do sistema inicialmente diminui, depois aumenta consideravelmente (cria um ponto de pico) e, por fim, volta a diminuir com o aumento da corrente. Observando a equação $[c_q = \frac{\dot{C}_p + 2\dot{Z}_{cer} + \dot{Z}_{termopar}}{|Eq_c - Eq_h|}]$, sabe-se que o numerador aumenta com a corrente, pois \dot{C}_p aumenta com a corrente. Mas, precisamos olhar com mais atenção ao termo do denominador $|Eq_c - Eq_h|$. Na Figura 5.25, podemos ver o comportamento desse termo ao decorrer do ensaio.

A diferença entre Eq_c e Eq_h diminui levemente até próximo de 2.5A e depois disso aumenta significativamente. Nesse ponto de intersecção das duas curvas, o termo $|Eq_c - Eq_h|$ atinge seu valor mínimo e, conseqüentemente, c_q terá seu valor máximo. Por isso é criado o ponto de pico na Figura 5.24. Após aproximadamente 2.5A, o termo $|Eq_c - Eq_h|$ volta a aumentar, o que faz o c_q diminuir.

O comportamento do custo de refrigeração (\dot{C}_{qc}) ao longo do ensaio é mostrado na Figura 5.26. Como \dot{C}_{qc} depende diretamente de c_q , sua curva também terá um ponto de pico próximo de 2.5A. Constata-se que o custo de refrigeração no sistema aumenta levemente até 2A. Após isso, aumenta consideravelmente até aproximadamente 2.5A. Após esse valor de corrente, o custo de refrigeração diminui.

Novamente, vale salientar que o objetivo do sistema é ter o menor custo de refrigeração. Após 2.5 A, apesar do \dot{C}_{qc} diminuir, nossa exergia de refrigeração é baixa. Então, olhando pelo lado econômico, é melhor para o nosso sistema trabalhar com correntes de entradas mais baixas. Por exemplo, é bem mais barato utilizar 10 módulos com uma corrente de entrada de 1A do que utilizar um único módulo com uma corrente de 10A.

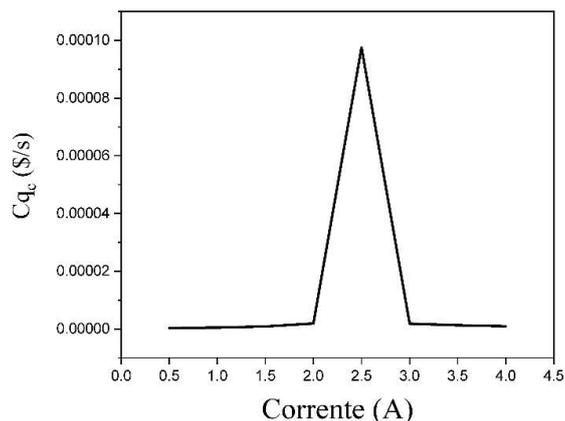


Figura 5.26 - Efeito da corrente em $\dot{C}q_c$.
Fonte: Dados da pesquisa.

5.4 QUARTO ENSAIO: SIMULAÇÃO DE UM AMBIENTE A SER REFRIGERADO

O comportamento da temperatura interna da caixa de isopor é mostrado na Figura 5.27. Como podemos ver, de fato, o protótipo de ar-condicionado termoelétrico proposto teve resultados satisfatórios. Em apenas 5 minutos de funcionamento, a temperatura foi de 26.0 °C para 15.6 °C, uma variação de 10.4 °C. Em 20 minutos de funcionamento, a temperatura interna atingiu 12.2 °C, uma variação de 13.8 °C.

Apesar de nesse ensaio a corrente de entrada ser alta, pode se atingir os mesmos resultados utilizando mais módulos com corrente de entradas menores. Assim, a eficiência aumenta e o custo por unidade de refrigeração diminui, como visto nas seções anteriores.

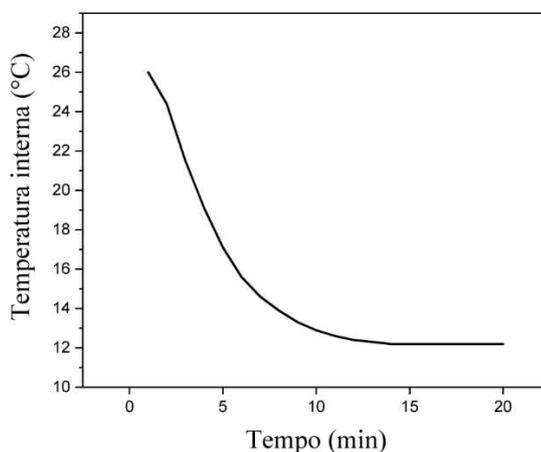


Figura 5.27 – Temperatura interna para 20 minutos de funcionamento do sistema.

Fonte: Dados da pesquisa.

Vale salientar que esse tipo de experimento pode dar resultados ainda mais satisfatórios, pois várias variáveis utilizadas nesse protótipo podem ser melhoradas. Citando as mais importantes, temos: 1) o número de módulos utilizados pode ser aumentado; 2) existem módulos de outros fabricantes de melhor qualidade; 3) pode ser utilizado um dissipador resfriado à água no lado frio do sistema.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo fazer uma análise energética, exergética e exergoeconômica, através do método SPECO, de um protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos. A análise se deu por meio de procedimentos experimentais realizados no laboratório da RECOGAS-UFPB e no Laboratório de Motores e Acionamentos elétricos (LMA-UFPB).

Através das análises realizadas, foi visto que de fato os módulos termoelétricos são eficazes na produção de frio, conseguindo baixar a temperatura do lado frio para $-18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ em poucos segundos.

Para o ensaio experimental variando a corrente, apesar da capacidade de refrigeração do sistema aumentar com o aumento da corrente, todos os outros parâmetros têm melhores resultados com correntes mais baixas. Conclui-se, então, que trabalhar com correntes mais baixas, além de oferecer maior COP, também reduz o custo por unidade de refrigeração do sistema. Então, uma solução encontrada seria aumentar o número de módulos termoelétricos do sistema trabalhando a uma corrente de entrada mais baixa. Assim, teríamos a mesma capacidade de refrigeração, mas com uma melhor eficiência e um custo mais baixo.

Para o ensaio experimental variando a temperatura da água, todos os parâmetros energéticos ofereceram melhores resultados para valores de temperatura da água mais baixos. Isso se deve ao fato de que, com menores valores de temperatura da água, mais

calor é dissipado e menor é a temperatura T_h . Como consequência disso, ΔT é menor e menores serão as perdas devido ao efeito Fourier.

Olhando pela ótica da exergia, ambos os ensaios mostraram eficiências exergeticas de refrigeração muito baixas em relação ao COP. Essa baixa eficiência ocorre por causa da degradação da forma de energia que acontece dentro dos componentes do módulo, na transformação de energia elétrica em calor. Em suma, a refrigeração utilizando módulos termoelétricos demanda baixa exergia. Então, o sistema será mais viável se for combinado com fontes de baixa exergia, como painéis solares. Uma configuração desse tipo pode ser uma boa combinação ao associar a exergia da energia solar à exergia demandada pela utilização dos módulos termoelétricos para refrigeração.

Pela ótica da exergoeconomia, ambos os ensaios mostraram um ponto de pico no custo de refrigeração, que acontece quando as curvas de Eq_c e Eq_h se interceptam. Conclui-se que é de suma importância uma análise exergoeconômica antes se projetar um ar-condicionado termoelétrico e, assim, evitar que o sistema trabalhe em condições nas quais a diferença entre Eq_c e Eq_h sejam baixas, onde o custo é maximizado.

Ademais, foi realizado um ensaio para verificar a capacidade de refrigeração simulando um ambiente real. Verificou-se que para uma corrente de 3A, o protótipo conseguiu baixar a temperatura em 10.4 °C, em apenas 5 minutos de funcionamento.

O protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos, nas características e condições dos ensaios, teve resultados satisfatórios. As análises energética, exergetica e exergoeconômica se mostraram eficazes para evidenciar sob quais condições o sistema tem melhor desempenho e menor custo. Conclui-se que, de fato, a tecnologia termoelétrica, para fins de refrigeração é promissora, e que, com maiores investimentos e estudos na área, será possível viabilizar economicamente esse tipo de tecnologia para aplicações que demandem maiores capacidades de refrigeração.

6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade deste trabalho, sugere-se os seguintes estudos:

- Otimização do sistema proposto neste trabalho;
- Fazer uma análise exergoambiental do sistema;
- Utilizar água para remover calor do lado frio;

- Utilizar módulos com maiores valores de figura de mérito;
- Simular a configuração utilizada no Ansys.

REFERÊNCIAS

BEJAN, A. TSATSARONIS, G.; MORAN, G.; *et al.* **Thermal design and optimization.** John Wiley & Sons, 1995.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A.S. **Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

CAMARGO, J. R.; OLIVEIRA, M. C. C. “Projeto de um condicionador de ar automotivo peltier-seebeck autossustentável”. In: **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Campina Grande, Brasil, 2010.

CAVALCANTI, E.J.C. **Análise exergoeconômica e exergoambiental.** São Paulo, Editora Blucher, 2018.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica.** 7ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

COELHO, J. C. M. **Energia e Fluidos: Transferência de calor.** São Paulo, Editora Blucher, 2018.

CUCE, E.; GUCLU, T.; CUCE, P.M. “Improving thermal performance of thermoelectric coolers (TECs) through a nanofluid driven water to air heat exchanger design: An experimental research”. **Energy Conversion and Management**, v. 214, pp. 112893, 2020.

DAI, Y. J.; WANG, R. Z.; NI, L. “Experimental investigation on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells”. **Renewable Energy**, v. 28, n. 6, pp. 949-959, 2003.

DANIEL, C.; SHUKLA, A.K.; SHARMA, M.; *et al.* “Design and Fabrication of Thermoelectric Air-Cooling System”. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2178, pp. 012004, IOP Publishing, 2022.

DA SILVA NÓBREGA, J.C.; DA SILVA, S.K.B.M.; DA NÓBREGA ALBUQUERQUE, T.; *et al.* “Uma breve revisão bibliográfica sobre a exergia em refrigeradores”. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, pp. e5111224026-e5111224026, 2022.

DIZAJI, H. S.; JAFARMADAR, S.; KHALILARYA, S.; *et al.* “An exhaustive experimental study of a novel air-water based thermoelectric cooling unit”. **Applied Energy**, v. 181, pp. 357-366, 2016.

DIZAJI, H. S.; JAFARMADAR, S.; KHALILARYA, S.; *et al.* “A comprehensive exergy analysis of a prototype Peltier air-cooler; experimental investigation”. **Renewable energy**, v. 131, pp. 308-317, 2019.

ENESCU, D.; VIRJOGHE, E. O. “A review on thermoelectric cooling parameters and performance”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, pp. 903-916, 2014.

FIGUEIREDO, T.D.S. **Análise exergoeconômica de um sistema de trиграção de energia operando sob um Ciclo de Rankine Orgânico, acoplado a um Chiller de Absorção de Simples Efeito**. Dissertação de M.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil. 2019.

GOLDSMID, H. J. **Introduction to thermoelectricity**. Berlin, Springer, 2016.

GUCLU, T.; CUCE, E. “Thermoelectric coolers (TECs): from theory to practice”. **Journal of Electronic Materials**, v. 48, n. 1, pp. 211-230, 2019.

HARTMANN, R. M.; DIAS, A. “Metodologia Termodinâmica Para Cálculo De Eficiência Exergética Em Cidades Contemporâneas/Thermodynamic Approach For Evaluation Of Exergetic Efficiency Of Contemporary Cities”. **International Journal of Environmental Resilience Research and Science**, v. 3, n. 3, 2021.

HEIKES, R.R.; URE JR, R.W. **Thermoelectricity: Science and Engineering**. Lodon, Interscience Publishers, 1961.

IBAÑEZ-PUY, M.; BERMEJO-BUSTO, J.; MARTÍN-GÓMEZ, C.; *et al.* “Thermoelectric cooling heating unit performance under real conditions”. **Applied Energy**, v. 200, pp. 303-314, 2017.

JAHN, W. “Performance assessment of thermoelectric self-cooling systems for electronic devices”. **Applied Thermal Engineering**, v. 193, p. 117020, 2021.

JIANG, F.; MENG, F.; CHEN, L.; *et al.* “Thermodynamic analysis and experimental research of water-cooled small space thermoelectric air-conditioner”. **Journal of Thermal Science**, v. 31, n. 2, pp. 390-406, 2022.

KAUSHIK, S. C.; MANIKANDAN, S.; HANS, R. “Energy and exergy analysis of thermoelectric heat pump system”. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 86, pp. 843-852, 2015.

KOTAS, T. J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. Anchor Brendon Ltd London, 1995.

KUMAR, P. R.; SEKHARAM, A.; MADHAV, P.V.; *et al.* “Modelling And Analysis Of Thermo Electric Cooler Module Using Ansys”. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)**, v. 9, n. 3, pp. 1249-1258, 2019.

LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. “SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems”. **Energy**, v. 31, n. 8-9, pp. 1257-1289, 2006.

LINEYKIN, S.; BEN-YAAKOV, S. “User-friendly and intuitive graphical approach to the design of thermoelectric cooling systems”. **International Journal of Refrigeration**, v. 30, n. 5, pp. 798-804, 2007.

LIU, Y.; SU, Y. “Experimental investigations on COPs of thermoelectric module frosting systems with various hot side cooling methods”. **Applied Thermal Engineering**, v. 144, pp. 747-756, 2018.

MEDEIROS NETO, J. L. **Análise comparativa das metodologias de estudo exergoeconômico para um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito**. Dissertação de M.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil. 2018.

MORIA, H.; POURHEDAYAT, S.; DIZAJI, H.S.; *et al.* “Exergoeconomic analysis of a Peltier effect air cooler using experimental data”. **Applied Thermal Engineering**, v. 186, pp. 116513, 2021.

NEMATI, A.; NAMI, H.; YARI, M. *et al.* “Development of an exergoeconomic model for analysis and multi-objective optimization of a thermoelectric heat pump”. **Energy Conversion and Management**, v. 130, pp. 1-13, 2016.

NEMATI, A.; NAMI, H.; YARI, M. *et al.* “Effect of geometry and applied currents on the exergy and exergoeconomic performance of a two-stage cascaded thermoelectric cooler”. **International Journal of Refrigeration**, v. 85, pp. 1-12, 2018.

NORTHWESTERN MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING. **Thermoelectrics**. Disponível em <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/index.html> Acesso em 14/02/2022.

RAWAT, M. K.; CHATTOPADHYAY, H.; NEOGI, S. “A review on developments of thermoelectric refrigeration and air conditioning systems: a novel potential green refrigeration and air conditioning technology”. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 3, pp. 362-367, 2013.

REN, Z.; LAN, Y.; ZHANG, Q. **Advanced thermoelectrics: materials, contacts, devices, and systems**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.

ROWE, D.M. **CRC Handbook of Thermoelectrics**. CRC Press, 1995.

SALAH, W.A.; ABUHELWA, M. “**Review of thermoelectric cooling devices recent applications**”. *Journal of Engineering Science and Technology*, v. 15, n. 1, pp. 455-476, 2020.

SANTOS, L. P. **Estudo da aplicação e desenvolvimento de um gerador termoelétrico para cogeração em automóveis**. Dissertação de M.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil. 2020.

SHARMA, S.; DWIVEDI, V. K.; PANDIT, S. N. “Exergy analysis of single-stage and multi stage thermoelectric cooler”. **International Journal of Energy Research**, v. 38, n. 2, pp. 213-222, 2014.

SILVA, R. E. **Análise E Otimização De Um Sistema Termoelétrico Para Condicionamento De Ar**. Dissertação de M.Sc., Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, 2010.

SOFRATA, H. “Heat rejection alternatives for thermoelectric refrigerators”. **Energy Conversion and Management**, v. 37, n. 3, pp. 269-280, 1996.

SOUZA, A. M. T.; SOARES, L.N.; CORDEIRO, L.A. **Análise exergética e termoeconomia aplicada a processos**. Belo Horizonte, Editora PUC Minas, 2019.

SÖYLEMEZ, E.; ALPMAN, E.; ONAT, A. “Exergy Analysis Of A Domestic Refrigerator Including A Thermoelectric Cooling System”. In: **22nd Congress on Thermal Science and Technology**. Kocaeli, Turquia. 11-14 September 2019.

SULAIMAN, A.C.; AMIN, N.A.M.; BASHA, M.H.; *et al.* “Cooling performance of thermoelectric cooling (TEC) and applications: a review”. In: **MATEC Web of Conferences**, v. 225, pp. 03021, EDP Sciences, 2018.

SUN, H.; GIL, S.U.; LIU, W.; *et al.* “Structure optimization and exergy analysis of a two-stage TEC with two different connections”. **Energy**, v. 180, pp. 175-191, 2019.

TIAN, M.; ALDAWI, F.; ANQI, A.E.; *et al.* “Cost-effective and performance analysis of thermoelectricity as a building cooling system; experimental case study based on a single TEC-12706 commercial module”. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 27, pp. 101366, 2021.

TIAN, M.; MORIA, Z.; MIHARDJO, L.W.; *et al.* “Experimental thermal/economic/exergetic evaluation of hot/cold water production process by thermoelectricity”. **Journal of Cleaner Production**, v. 271, pp. 122923, 2020.

TIPSAENPORN, W.; RUNGSIYOPAS, M.; LERTSATITTHANAKORN, C. “Thermodynamic analysis of a compact thermoelectric air conditioner”. **Journal of electronic materials**, v. 43, n. 6, pp. 1804-1808, 2014.

TWAHA, S.; ZHU, J.; YAN, Y.; *et al.* “A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement”. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 65, pp. 698-726, 2016.

VARKUTE, N.; CHALKE, A. AILANI, D.; *et al.* “Design and fabrication of a Peltier operated portable air cooling system”. **Int Res J Eng Technol**, v. 3, pp. 1801-1805, 2016.

VENKATESAN, K.; VENKATARAMANAN, M. “Experimental and simulation studies on thermoelectric cooler: A performance study approach”. **International journal of thermophysics**, v. 41, n. 4, pp. 1-23, 2020.

ZHAO, D.; TAN, G. “A review of thermoelectric cooling: materials, modeling and applications”. **Applied thermal engineering**, v. 66, n. 1-2, pp. 15-24, 2014.

ZHOU, Y.; YU, J. “Design optimization of thermoelectric cooling systems for applications in electronic devices”. **International journal of refrigeration**, v. 35, n. 4, pp. 1139-1144, 2012.

WELTY, J. R.; RORRER, G. L.; FOSTER, D. G. **Fundamentos de Transferência de Momento, de Calor e de Massa**, 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2017.