

Análise energética, exérgica e exergoeconômica de um protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos

Thiago Rodrigues Alexandria Leite^{[1]*}, Carlos Antônio Cabral dos Santos^[2]

^[1]thiagoralexandria@gmail.com, ^[2]carloscabraldosantos@yahoo.com.br. Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil.

* autor correspondente

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar os resultados das análises energética, exérgica e exergoeconômica de um protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos. 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, foram calculados o coeficiente de desempenho do sistema (COP) e a capacidade de refrigeração (Q_c). Através da análise exérgica, foram calculadas a destruição de exergia, a exergia de refrigeração, e a eficiência exérgica de refrigeração. Por fim, pela análise exergoeconômica, que utilizou o método SPECOC, foi calculado o custo por unidade de refrigeração (c_q). Os resultados indicaram, através da análise energética, que o COP é maximizado para correntes de entradas menores e para temperaturas da água menores, obtendo seu melhor resultado (2,79) na corrente elétrica de entrada de 0,5 A. Através da análise exérgica viu-se que a refrigeração utilizando módulos termoelétricos apresentou valores de eficiência exérgica de refrigeração muito baixos em relação ao COP (0,043 para o ensaio variando a temperatura da água e 0,051 para o ensaio variando a corrente). Por fim, através da análise exergoeconômica, os resultados mostraram que o custo por unidade de refrigeração diminuiu com o aumento da temperatura da água e com o aumento da corrente de entrada. Ademais, foi feito um ensaio simulando um ambiente a ser refrigerado. Com uma corrente elétrica de 3 A, o protótipo conseguiu baixar a temperatura em 10,4 °C com 5 minutos de funcionamento. Com este estudo, conclui-se que o sistema de refrigeração termoelétrico experimental proposto, nas características e condições dos ensaios, teve resultados satisfatórios e que as análises energética, exérgica e exergoeconômica se mostraram eficazes para evidenciar sob quais condições o sistema tem melhor desempenho e menor custo.

Palavras-chave: exergia; exergoeconomia; módulos termoelétricos; refrigeração.

Energetic, exergetic and exergoeconomic analysis of an air conditioner prototype using thermoelectric modules

Abstract

This work aims to present the results of the energy, exergetic and exergoeconomic analysis of an air conditioning prototype using thermoelectric modules. Two main tests were carried out: the first one varying the water temperature and the second one varying the input current of the system. Through energy analysis, the system's coefficient of performance (COP) and cooling capacity (Q_c) were calculated. Through exergy analysis, exergy destruction, cooling exergy and cooling exergy efficiency were calculated. Finally, through the exergoeconomic analysis, which used the SPECOC method, the cost per refrigeration unit (c_q) was calculated. The results showed through the energy analysis that the COP is maximized for lower input currents and for lower water temperatures, obtaining its best result (2.79) at the input current of 0.5A. Through the exergy analysis it was seen that the cooling using thermoelectric modules presented values of exergy efficiency of cooling very low in relation to the COP (0.043 for the test varying the water temperature and 0.051 for the test varying the current). Finally, through the exergoeconomic analysis, the results showed that the cost per refrigeration unit decreased with increasing water temperature and increasing inlet current. In addition, a test was carried out simulating an environment to be refrigerated. With a current of 3A, the prototype managed to lower the temperature by 10.4 °C in 5 minutes of operation. With this study, it is concluded that the proposed experimental thermoelectric refrigeration system, in the characteristics and conditions of the

tests, had satisfactory results and that the energy, exergy and exergoeconomic analyzes were effective to show under which conditions the system has better performance and less cost.

Keywords: exergoeconomics; exergy; thermoelectric modules; refrigeration.

1 Introdução

Nos últimos anos, a temperatura do planeta tem aumentado devido ao aquecimento global. Com isso, o uso de aparelhos de ar-condicionado aumentou consideravelmente. Assim, o aumento da demanda de energia, o alto custo de vida e o aumento do uso dos clorofluorcarbonetos (CFCs) motivaram os fabricantes a buscarem tecnologias de resfriamento alternativas (Salah; Abuhelwa, 2020). Dito isso, a refrigeração utilizando módulos termoeletrônicos, ou refrigeração termoeletrônica, 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 termoeletrônico é um dispositivo eletrônico desenvolvido de dois materiais semicondutores que utiliza o efeito Peltier para converter energia em um gradiente de temperatura (Sulaiman *et al.*, 2018).

O maior obstáculo quanto ao uso de módulos termoeletrônicos, para aplicações 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 termoeletrônicos tem valores entre 0,35 e 0,5. Por esse motivo, a refrigeração termoeletrônica 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).

Para melhorar a eficiência dos sistemas termoeletrônicos, os estudos mais recentes têm buscado mensurar a eficiência de equipamentos e processos através da análise da exergia, buscando-se assim, minimizar os desperdícios energéticos do sistema (Cavalcanti, 2018). Esse tipo de análise é uma ferramenta amplamente utilizada para se verificar quão próximo um processo real está do processo ideal, mostrando as perdas de energia devido às irreversibilidades que não são contabilizados nas análises térmicas convencionais (Tipsaenborm; Rungsiyopas; Lertsatitthanakorn, 2014).

Além da análise exérgica, 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; Tsatsaronis; Moran, 1995). A exergoeconomia é a combinação de uma análise exérgica 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).

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

Liu e Su (2018) demonstraram a eficácia do uso de um sistema termoeletrônico para refrigeração através de cinco configurações experimentais montadas com diferentes métodos de resfriamento para o lado quente. Esses métodos incluem três métodos ativos: i) ventilador conectado a um dissipador de calor; ii) convecção forçada da água; iii) convecção forçada do ar. E dois métodos passivos: i) convecção livre da água; ii) 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. Também foi visto 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, mostrando assim que esse tipo de sistema é mais apropriado para ser aplicado em regiões com climas mais quentes.

Tian *et al.* (2021) buscaram esclarecer o real custo de resfriamento de um único módulo termoelétrico comercial, sob diferentes condições de trabalho. Um ar-condicionado termoelétrico à base de água e ar foi projetado em escala laboratorial e testado sob diferentes vazões de ar, temperaturas do ambiente (entrada de ar), e potências de entrada. Os resultados mostraram que o número de módulos termoelétricos empregados em um ar-condicionado de tamanho real é um parâmetro chave para alocar a potência de entrada ideal para qualquer módulo termoelétrico individual. Também foi visto que o custo de refrigeração é reduzido para temperaturas do ar mais quentes, mostrando a adequação do ar-condicionado termoelétrico para regiões quentes.

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.

Diante disso, o presente trabalho propõe um estudo experimental de um ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos através das análises energética, exergética e exergoeconômica, utilizando o método SPECO, a fim de avaliar sob quais condições os módulos trabalham com maior desempenho e menor custo.

No restante do artigo, na seção 2 apresenta-se a modelagem matemática utilizada nos cálculos. Na seção 3 está a descrição da metodologia usada no trabalho. Na seção 4, são apresentados os principais resultados e discussões. Por fim, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros estão discutidas na seção 5.

2 Modelagem matemática

Todo o desenvolvimento matemático contido nas subseções a seguir estão conforme Heikes e Ure Jr (1961), Bergman e Lavine (2019) e Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), respectivamente.

2.1 Cálculos energéticos

A capacidade de refrigeração (Q_c) de um módulo termoelétrico se dá pela soma de três parcelas: i) o efeito Peltier (Q_{pe}); ii) o efeito Joule (Q_j); iii) o efeito Fourier (Q_f). Esses três efeitos podem ser calculados através das Equações 1-3, respectivamente. O efeito Peltier ocorre quando uma corrente elétrica contínua flui na junção de dois metais de propriedades diferentes. O efeito Joule ocorre quando uma corrente elétrica passa por uma resistência elétrica. O efeito Fourier ocorre quando calor é transferido de uma superfície quente para uma superfície fria através da condução.

$$Q_{pe} = \alpha \cdot T_c \cdot I \quad (1)$$

$$Q_j = -0,5 \cdot I^2 \cdot R \quad (2)$$

$$Q_f = -K \cdot \Delta T \quad (3)$$

onde: α é o coeficiente de Seebeck (em V/K); T_c é a temperatura no lado frio do módulo (em K); I é a corrente elétrica de entrada (em A); R é a resistência elétrica (em Ω); K é a condutividade térmica (em W/m.K); e ΔT é a diferença de temperatura entre os dois lados do módulo (em K).

Então, juntando os três efeitos anteriores, tem-se a equação da capacidade de refrigeração do módulo termoelétrico, dado em W:

$$Q_c = \alpha \cdot T_c \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - K \cdot \Delta T \quad (4)$$

Na Equação 4, tanto o calor de Joule, quanto o calor de Fourier são irreversibilidades internas do sistema.

A capacidade de aquecimento do módulo (Q_h) será dada, também, pela soma dos mesmos três efeitos anteriores. A diferença é que o efeito Peltier será calculado com base na temperatura de lado quente e o efeito Joule terá sinal positivo, pois é assumido que metade do calor devido ao efeito Joule vai para o lado quente e a outra metade para o lado frio. Tem-se então:

$$Q_h = \alpha \cdot T_h \cdot I + 0,5 \cdot I^2 \cdot R - K \cdot \Delta T \quad (5)$$

onde: T_h é a temperatura no lado quente do módulo (em K).

A potência elétrica (em W) de um módulo termoelétrico é calculada por meio da Equação 6:

$$P = \alpha \cdot \Delta T \cdot I + I^2 \cdot R \quad (6)$$

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

$$COP = \frac{Q_c}{P} \quad (7)$$

2.2 Cálculos exergéticos

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

$$\left(1 - \frac{T_o}{T_c}\right) \cdot Q_c + W - \left(1 - \frac{T_o}{T_h}\right) \cdot Q_h - E_{destruída} = 0 \quad (8)$$

onde: T_o é a temperatura ambiente (em K); W é a energia elétrica de entrada (em W); $E_{destruída}$ é a exergia destruída do sistema (em W).

O primeiro termo da Equação 8 é a exergia de refrigeração (Eq_c) e o terceiro termo é a exergia de aquecimento (Eq_h), ambos dados em W. Tem-se, então:

$$Eq_c = \left(1 - \frac{T_o}{T_c}\right) \cdot Q_c \quad (9)$$

$$Eq_h = \left(1 - \frac{T_o}{T_h}\right) \cdot Q_h \quad (10)$$

A eficiência exergética de refrigeração é dada pelo quociente da exergia de refrigeração dividido pela potência de entrada, P , estimada como:

$$\varepsilon = \frac{|Eq_c|}{P} \quad (11)$$

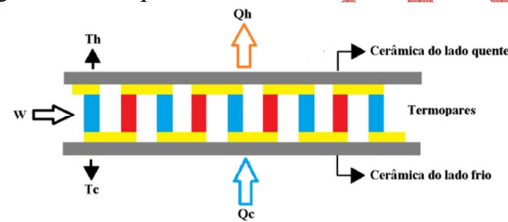
Isolando o termo de destruição de exergia na Equação 8 e sabendo que $W = Q_h - Q_c$, a equação da destruição de exergia pode ser escrita da seguinte forma:

$$E_{destruída} = T_o \left(\frac{Q_h}{T_h} - \frac{Q_c}{T_c} \right) \quad (12)$$

2.3 Cálculos Exergoeconômicos

Para aplicar o método SPECO, devem-se seguir três passos. O primeiro é identificar os componentes e todos os fluxos (massa, calor e trabalho) de saída e 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.

Figura 1 – Componentes de um módulo termoeletrico



Fonte: elaborado pelos autores

A exergia divide-se em três: exergia de refrigeração (Eq_c); exergia de aquecimento (Eq_h); e exergia relacionada à energia de entrada (E_w).

O segundo passo é definir o que é produto e o que é combustível de cada componente. A definição de combustível e produto de cada componente é mostrada no Quadro 1.

Quadro 1 – Combustível e produto de cada componente

Componente	Combustível	Produto
Cerâmica do lado quente	Eq_h	P_1
Termopares	$P_1 + E_w$	P_2
Cerâmica do lado frio	P_2	Eq_c

Fonte: elaborado pelos autores

O terceiro passo é aplicar a equação de balanço de custo para cada componente do sistema. A equação do balanço de custo para o k -ésimo componente do sistema é dada por:

$$\sum_s (\dot{C}_s)_k + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum_e (\dot{C}_e)_k + \dot{Z}_k \quad (13)$$

onde: \dot{C}_s e \dot{C}_e , são os custos associados aos fluxos exergéticos de saída e entrada, respectivamente (em \$/s); \dot{C}_w e \dot{C}_q são os custos associados à transferência de trabalho e calor, respectivamente (em \$/s); \dot{Z}_k é a taxa de despesas (em \$/s).

Aplicando a Equação 13 para cada componente, são obtidas as equações: para a cerâmica do lado quente, a Equação 14; para os termopares, a Equação 15; e para a cerâmica do lado frio, a Equação 16.

$$\dot{C}q_h + \dot{Z}_{cer} = \dot{C}_1 \quad (14)$$

$$\dot{C}_1 + \dot{C}_w + \dot{Z}_{termopar} = \dot{C}_2 \quad (15)$$

$$\dot{C}_2 + \dot{Z}_{cer} = \dot{C}q_c \quad (16)$$

onde: $\dot{C}q_h$ é o custo de aquecimento (em \$/s); $\dot{C}q_c$ o custo de refrigeração (em \$/s); \dot{Z}_{cer} e $\dot{Z}_{termopar}$ os custos com material cerâmico e termopares, respectivamente (em \$/s).

Resolvendo simultaneamente as Equações 14-16 para $\dot{C}q_c$, obtém-se a Equação 17. Os custos de aquecimento, refrigeração e de energia (trabalho) são dados pelas Equações 18-20, respectivamente.

$$\dot{C}q_c = \dot{C}q_h + \dot{C}_w + 2\dot{Z}_{cer} + \dot{Z}_{termopar} \quad (17)$$

$$\dot{C}q_h = c_q \cdot Eq_h \quad (18)$$

$$\dot{C}q_c = c_q \cdot Eq_c \quad (19)$$

$$\dot{C}_w = c_p \cdot P \quad (20)$$

onde: c_q e c_p são os custos médios por unidade de exergia em relação à transferência de calor e trabalho, respectivamente (em \$/Ws).

Substituindo as Equações 18-20, na Equação 17, e resolvendo para c_q , obtém-se a equação para o custo por unidade de refrigeração:

$$c_q = \frac{\dot{C}_w + 2\dot{Z}_{cer} + \dot{Z}_{termopar}}{|Eq_c - Eq_h|} \quad (21)$$

A taxa de despesas (\dot{Z}_k) é calculada com as Equações 22 e 23:

$$\dot{Z}_k = Z_k \cdot CRF \cdot \varphi \quad (22)$$

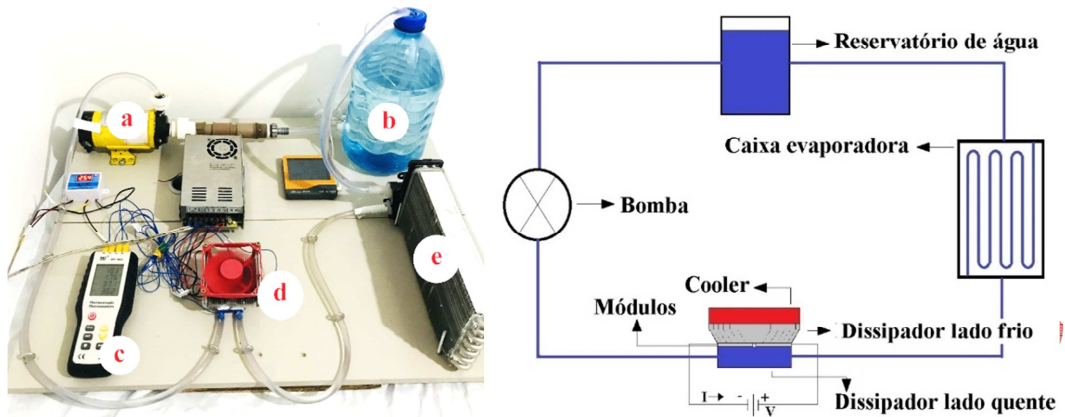
$$CRF = i \left[\frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \cdot \frac{1}{n \cdot nh \cdot 3600} \quad (23)$$

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.

3 Metodologia

Uma vista geral do protótipo de ar-condicionado termoelétrico e seu esquema são mostrados na Figura 2.

Figura 2 – Protótipo de ar-condicionado termoelétrico. (a) Bomba. (b) Reservatório. (c) Termopar. (d) Sistema termoelétrico. (e) Unidade evaporativa



Fonte: elaborado pelos autores

O sistema proposto funciona baseado no efeito Peltier, em que um lado do módulo termoeétrico vai gerar frio e o outro lado vai gerar calor.

Os lados dos módulos que vão gerar frio estão em contato com um dissipador de alumínio acoplado com um *cooler*, conseguindo assim transferir o frio gerado pelo módulo para o ar ambiente. Como em um módulo termoeétrico a quantidade de frio gerado em um lado é proporcional à quantidade de calor gerado no outro lado do módulo, esse calor gerado precisa ser dissipado. Para isso, empregou-se um dissipador de calor aletado resfriado a água nos lados quentes dos módulos.

Após a água receber esse calor proveniente dos módulos, ela prossegue no sistema para passar por uma unidade evaporativa comum, constituída de centenas de aletas, e assim diminuir sua temperatura. Um reservatório com capacidade de 5 litros desempenhou o papel de abastecer a água que circula no sistema; para impulsionar essa circulação, usou-se uma bomba com a vazão ajustada para 2,45 litros por minuto.

O sistema proposto utilizou dois módulos termoeétricos modelo TEC1-12706 da fabricante Hebei I.T (Shangai) Co Ltd. As especificações dos módulos do experimento estão disponíveis no catálogo do fabricante e mostradas no Quadro 2.

Quadro 2 – Especificações do módulo termoeétrico TEC1-12706

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
$I_{m\acute{a}x}$ (A)	6,4	6,4
$U_{m\acute{a}x}$ (V)	14,4	16,4
Resist\ancia (Ω)	1,98	2,3

Fonte: dados da pesquisa

A medição das temperaturas das superfícies dos módulos utilizou um termômetro termopar digital modelo HT-9815, fabricado pela Dongguan Xintai Instrument. Para as medições da temperatura ambiente e da temperatura da água empregou-se um termostato modelo DM-W3001 e um termo-higrômetro modelo HT-20, respectivamente.

Para se obter as temperaturas do lado frio dos módulos foram criados pequenos canais no dissipador de alumínio. Esses canais serviram como locais de instalação para os termopares. Para obter as temperaturas do lado quente colocaram-se 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.

Para o fornecimento de energia elétrica ao sistema termoeletrico (módulos), usou-se um par de fontes de alimentação da fabricante Minipa modelo MPL-3303M e uma fonte chaveada padrão 12V/25A. A aplicação de cada tipo de fonte dependeu das características do ensaio em questão. Para dar maior precisão aos resultados, utilizaram-se dois multímetros Agilent U1252B, para verificar as tensões em cada módulo, e dois multímetros Agilent modelo U1242B, para verificar as correntes em cada módulo.

Todos os instrumentos utilizados no experimento foram devidamente testados e calibrados antes de cada ensaio. As características desses dispositivos estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Características dos instrumentos de medição utilizados

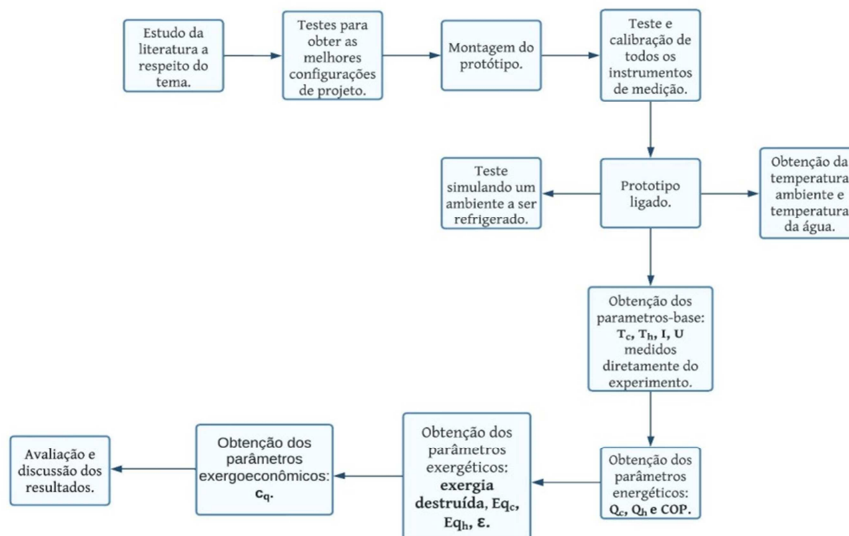
Instrumentos	Resolução/precisão
Termo-higrômetro ICEL HT-20	0,1 °C/1%
Termostato DM-W3001	0,1 °C/1%
Termopar HT-9815	0,1 °C/2%
Multímetro Agilent U1252B	0,0001V /0,4%
Multímetro Agilent U1242B	0,0001A /0,5%
Fonte de alimentação Minipa MPL-3303M	Tensão 100mV/1% Corrente 10mA/1%

Fonte: dados da pesquisa

O estudo considerou como volume de controle os dois módulos termoeletricos. Os custos de investimento com cerâmica e termopares foram estimados em 0,1 \$/cm² e 0,000889565 \$/mm³ (NEMATI *et al.*, 2016), respectivamente. O custo total de capital com cerâmica e termopares totalizou 6,4 e 5,12 \$, respectivamente. Adotou-se como preço do dólar o valor de 5 reais. O coeficiente de Seebeck (α), a resistência elétrica (R) e a condutividade térmica (K) são fornecidos pelo catálogo do fabricante. Para o cálculo do fator de recuperação de capital, considerou-se 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.

Três tipos de ensaios foram realizados: no primeiro, variou-se a temperatura da água que resfria os módulos; no segundo, o parâmetro que varia é a corrente de entrada; e no terceiro, foi realizada uma simulação de um ambiente a ser refrigerado. Para uma maior confiabilidade dos resultados, repetiram-se esses testes três vezes. O fluxograma da Figura 3 mostra todas as etapas seguidas na elaboração desse estudo.

Figura 3 – Etapas seguidas na elaboração do estudo



Fonte: elaborado pelos autores

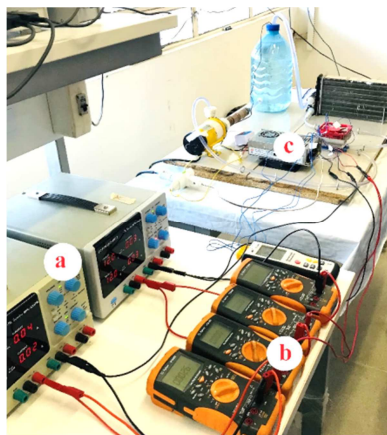
3.1 Primeiro ensaio: variação da temperatura da água

Para o primeiro ensaio, testou-se a temperatura da água que resfria o lado quente dos módulos para os seguintes valores: 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C. A fonte chaveada 12V/25A forneceu a corrente utilizada pelos módulos. O termostato registrou uma temperatura ambiente de 25,2 °C. Quatro multímetros foram empregados para medir os valores das tensões e correntes de cada módulo, que nesse ensaio permaneceram constantes. Para cada valor de temperatura da água realizaram-se cinco medições. Todo o ensaio ocorreu no laboratório da RECOGAS-UFPB. A bancada experimental desse ensaio é mostrada na Figura 2.

3.2 Segundo ensaio: variação da corrente de entrada do sistema

Para o segundo ensaio, testou-se a corrente de alimentação dos módulos para os seguintes valores de: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 e 4 A. As fontes Minipa forneceram as correntes utilizadas pelos módulos. A temperatura ambiente e a temperatura da água registraram 27,2 °C e 29,8 °C, respectivamente. Para cada valor de corrente foram realizadas duas medições. Todo o ensaio ocorreu no Laboratório de Motores e Acionamentos elétricos (LMA-UFPB). A bancada experimental desse ensaio é mostrada na Figura 4.

Figura 4 – Bancada experimental para o ensaio variando a corrente. (a) Fontes de alimentação. (b) Multímetros. (c) Fonte chaveada

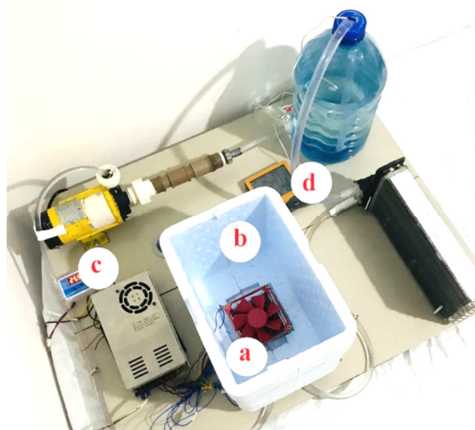


Fonte: arquivo dos autores

3.3 Terceiro ensaio: simulação de um ambiente a ser refrigerado

Com o objetivo de simular um ambiente a ser refrigerado pelo protótipo de ar-condicionado, acoplou-se uma caixa de isopor de volume 8 litros ao sistema, de modo que apenas o dissipador do lado frio e o *cooler* ficassem na parte de dentro, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Protótipo de ar-condicionado termoelétrico acoplado com a caixa. (a) *Cooler*. (b) Isopor. (c) Termostato. (d) Termo-higrômetro



Fonte: arquivo dos autores

4 Resultados e discussões

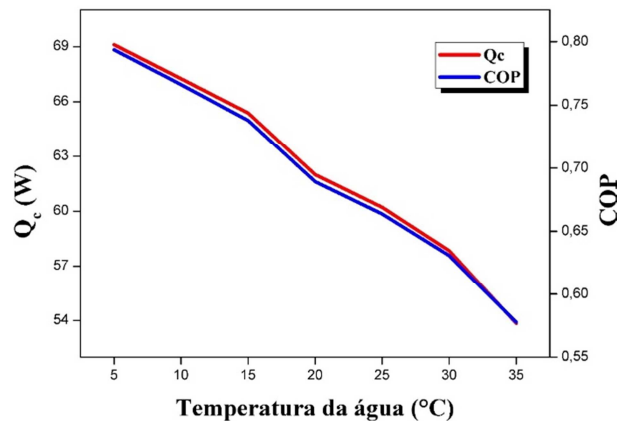
Nesta seção é apresentado como a variação da temperatura da água e da corrente de entrada influenciou os fatores energéticos, exergéticos e exergoeconômicos do sistema.

4.1 Primeiro ensaio: variação da temperatura da água

Primeiramente, é preciso entender o comportamento do termo ΔT . Nos módulos termoelétricos, quanto mais calor se consegue retirar no lado quente, menor vai ser a temperatura no lado frio. Nesse ensaio, com o aumento da temperatura da água, as temperaturas de lado quente (T_h) e de lado frio (T_c) aumentaram. Porém, como o lado quente do módulo está diretamente em contato com a água mais quente, sua temperatura cresceu mais rapidamente. Como consequência disso, a diferença de temperatura entre os dois lados do módulo (ΔT) teve um comportamento crescente no decorrer do ensaio.

Observando a Equação 4, das três parcelas da capacidade de refrigeração, a parcela que mais influenciou Q_c para esse ensaio foi o efeito Fourier. Pois, a corrente, o coeficiente de Seebeck (α), a resistência elétrica (R) e a condutividade térmica (K) são constantes. Como foi visto que (ΔT) aumentou ao longo do ensaio, consequentemente Q_c apresentará um comportamento decrescente, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Efeito da temperatura da água em Q_c e COP



Fonte: dados da pesquisa

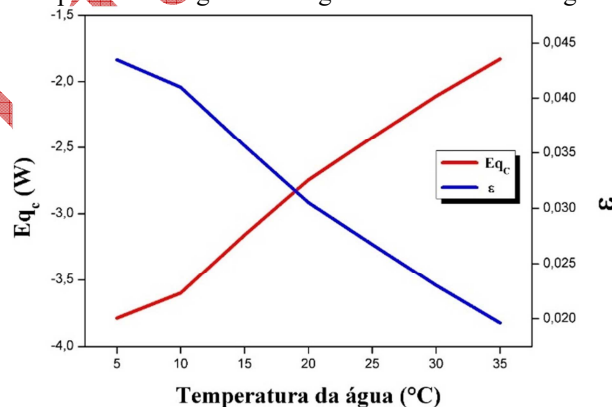
As curvas de Q_c e COP em função da temperatura da água apresentaram o mesmo comportamento, uma vez que nesse ensaio, a corrente elétrica foi mantida aproximadamente constante (3,653A) com o COP dependendo diretamente de Q_c . O maior valor de Q_c obtido no ensaio foi de 69,11 W, correspondente à temperatura da água de 5 °C. O COP mais alto foi obtido na temperatura da água de 5 °C, cujo valor foi de 0,79.

Partindo para os parâmetros exergeticos, em um valor de temperatura ambiente de 25,2 °C, a variação da temperatura da água não teve influência significativa na destruição de exergia. Para esse primeiro ensaio, a destruição de exergia permaneceu com valores próximos a 54 W.

Em seu estudo, Dizaji *et al.*, (2019), ao avaliarem um ar-condicionado termoelétrico que tinha o lado quente do módulo também resfriado a água, chegaram a resultados semelhantes aos obtidos nesse estudo. Em ambos os trabalhos, a variação da destruição de exergia correspondeu a menos de 2% do valor total. Os autores concluíram que a influência da temperatura da água na destruição de exergia é bem inferior quando comparado a outros fatores como, por exemplo, corrente de entrada.

Os comportamentos da exergia de refrigeração (Eq_c) e da eficiência exergetica de refrigeração (ϵ) são mostrados na Figura 7.

Figura 7 – Efeito da temperatura da água na exergia e na eficiência exergetica de refrigeração



Fonte: dados da pesquisa

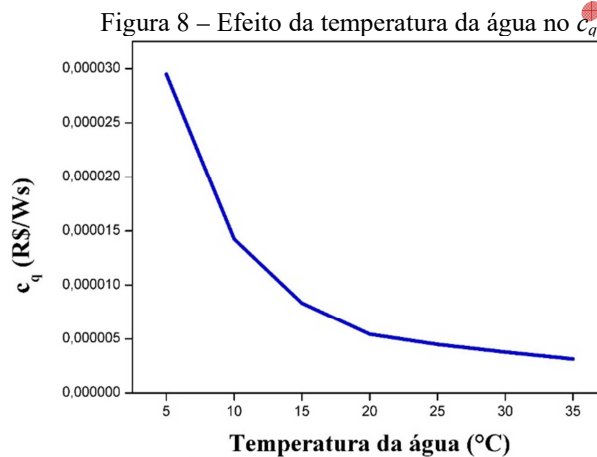
É importante frisar que, como o valor entre parênteses da Equação 9 é menor do que 1, pois durante todo o ensaio, T_c foi menor que T_o , e como consequência, a exergia de refrigeração sendo negativa. Pode-se entender isso por meio da segunda lei da termodinâmica, a qual estabelece que o calor flui naturalmente de uma região de temperatura mais alta para uma região de temperatura mais baixa. Como em um sistema de ar-condicionado o objetivo é justamente o oposto (transferir calor de uma região mais fria para uma mais quente), é necessário que o trabalho seja fornecido para que o processo ocorra. Assim, em resumo, a exergia negativa em sistemas de ar-condicionado reflete que a transferência de calor está ocorrendo na direção contrária à natural e requer entrada de trabalho para

acontecer. A menor exergia de refrigeração obtida foi de $-3,78$ W, na correspondente temperatura da água de 5 °C.

Como o sistema é alimentado por energia elétrica, que é uma forma organizada de energia e possui 100% de exergia, e essa energia é transformada em calor, que é uma forma desorganizada de energia e por isso possui menor exergia, há muita destruição de exergia durante o processo de conversão das formas de energia dentro dos componentes dos módulos. Como consequência disso, a eficiência exérgica de refrigeração (ε) é bem menor do que o *COP*. A maior eficiência exérgica de refrigeração foi de 0,043, obtido na temperatura da água de 5 °C.

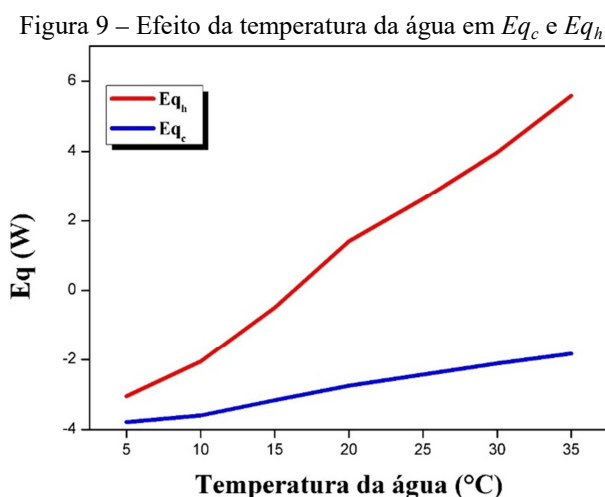
Dessa forma, pode-se dizer que os sistemas termoeletrônicos utilizados para refrigeração possuem baixa demanda de exergia. Uma forma de mitigar esse desperdício e melhorar a viabilidade econômica da aplicação desse tipo de sistema em um ar-condicionado seria combinar a tecnologia termoeletrônica com fontes de baixa exergia como, por exemplo, painéis fotovoltaicos.

Entrando no campo da exergoeconomia, um dos parâmetros de maior importância é o custo por unidade de refrigeração, c_q (R\$/Ws). A variação de c_q ao longo do ensaio é mostrada na Figura 8.



Fonte: dados da pesquisa

O custo por unidade de refrigeração do sistema diminuiu com o aumento da temperatura da água. Esse cenário pode ser compreendido ao examinar a Equação 21. Como o numerador da equação permaneceu praticamente constante, o valor de c_q dependerá do denominador $|Eq_c - Eq_h|$. Observando a Figura 9, nota-se que a diferença entre Eq_c e Eq_h aumentou no decorrer do ensaio, atingindo seu valor máximo em 35 °C. Como quanto maior essa diferença, menor é o custo por unidade de refrigeração, pois são inversamente proporcionais, a curva c_q terá um comportamento decrescente, conforme mostrado na Figura 8.



Fonte: dados da pesquisa

Utilizando uma metodologia experimental semelhante à dessa pesquisa, Tian *et al.* (2020) avaliaram o impacto da variação da temperatura da água em um ar-condicionado termoelétrico. Os resultados obtidos mostraram que o COP variou entre 1 e 0,8, valores próximos aos obtidos neste estudo (0,79 e 0,57). Além disso, em ambos os trabalhos o COP apresentou comportamento decrescente.

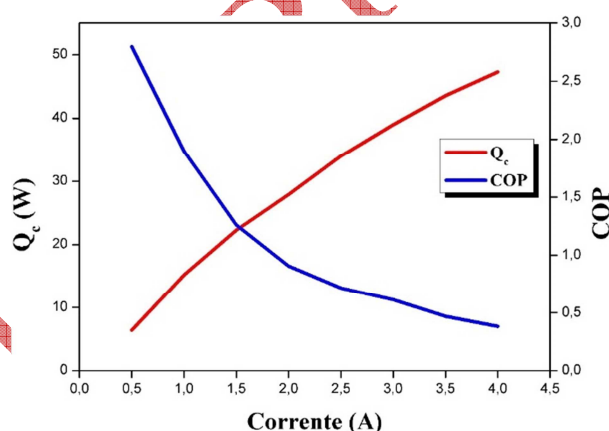
Em relação ao custo por unidade de refrigeração, Tian *et al.* (2020) encontraram um custo que aumenta com a temperatura da água, divergindo dos resultados obtidos nesta pesquisa. Tal apontamento, deu-se pelo fato de os autores adotarem que a exergia de refrigeração (Equação 9) será positiva.

4.2 Segundo ensaio: variação da corrente de entrada do sistema

Os resultados mostraram que a diferença de temperatura entre os dois lados dos módulos (ΔT), teve um comportamento crescente no decorrer do ensaio. Essa é uma característica intrínseca dos módulos termoelétricos, que quanto maior a corrente aplicada, maior será o gradiente de temperatura entre os lados frio e quente.

Como pode ser visto na Figura 10, houve um incremento na capacidade de refrigeração à medida que a corrente foi ampliada. Isso se deve ao fato de que o efeito Peltier, para os valores de correntes desse ensaio, cresceu mais rapidamente do que as irreversibilidades internas do sistema (efeitos Joule e Fourier). O maior valor de Q_c obtido no ensaio foi de 47,29 W, que corresponde à corrente de 4 A.

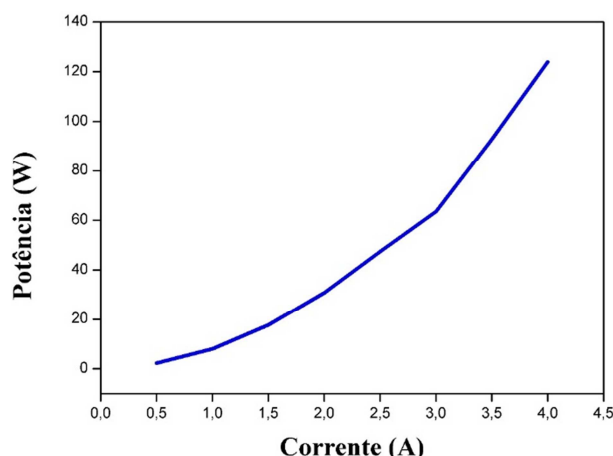
Figura 10 – Efeito da corrente em Q_c e COP



Fonte: dados da pesquisa

O COP do sistema caiu com o aumento da corrente. Esse efeito decorre do fato de que a potência (Figura 11), que é o denominador da Equação 7, aumenta mais rapidamente do que a capacidade de refrigeração, que é o numerador da Equação 7. O maior COP obtido no ensaio foi de 2,79, que corresponde à corrente de 0,5 A.

Figura 11 – Efeito da corrente na potência do sistema



Fonte: dados da pesquisa

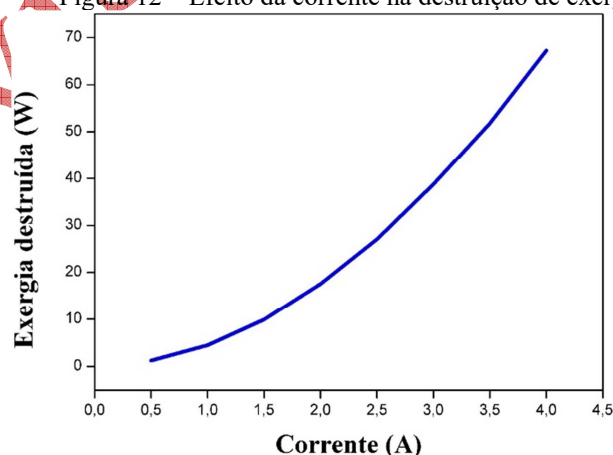
Aqui, analisando pela ótica da energia, é visto que é mais vantajoso utilizar o sistema com correntes de entradas mais baixas. Uma forma então para otimizar o desempenho de um ar-condicionado termoeletrico seria aumentar o número de módulos utilizados, diminuindo assim a corrente utilizada por cada módulo individual. Desse modo, se teria um mesmo valor de Q_c , mas um COP geral bem maior.

Os resultados deste trabalho corroboram as descobertas de Dizaji *et al.* (2016), que também observaram um aumento de Q_c e uma diminuição do COP em seu estudo. Com uma configuração experimental empregando apenas um módulo, os autores encontraram uma capacidade de refrigeração máxima de aproximadamente 16 W e um COP máximo de 2,97, valor próximo ao obtido neste trabalho (2,79). O incremento de Q_c foi atribuído ao aumento da energia fornecida ao sistema, resultando em uma maior absorção de calor.

Vale ressaltar que em seu experimento, Dizaji *et al.* (2016) examinaram o efeito da tensão nos parâmetros energéticos. No presente trabalho, embora a variável avaliada seja a corrente, foi utilizada a tensão máxima que cada faixa de corrente suportava. Consequentemente, a tensão também foi variada em segundo plano.

Partindo para os parâmetros exergéticos, para a temperatura ambiente de 27,2 °C, os resultados mostraram que a exergia destruída apresentou um comportamento crescente no ensaio.

Figura 12 – Efeito da corrente na destruição de exergia



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 internas do sistema. O maior valor de destruição de exergia obtido no ensaio foi de 68,24 W, que corresponde à corrente de 4 A.

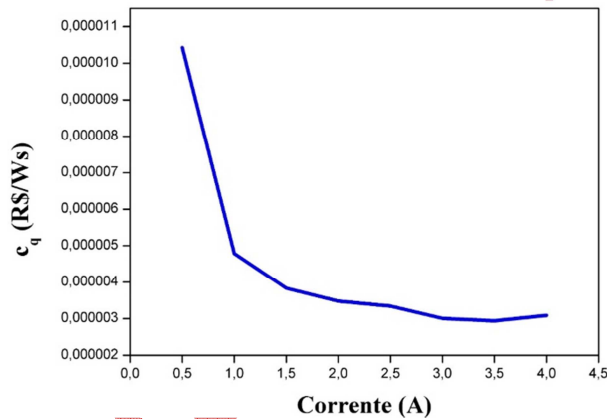
Resultados semelhantes foram obtidos por Dizaji *et al.* (2019), que também observaram um aumento significativo da destruição de exergia quando se aumenta a energia fornecida ao sistema. Esse aumento foi atribuído principalmente à diferença de temperatura entre os dois lados do módulo.

Assim como no ensaio anterior, a exergia de refrigeração apresentou resultados negativos. Novamente, isso se deve ao fato que em um ar-condicionado, a transferência de calor está ocorrendo na direção contrária à natural, sendo necessária a entrada de trabalho para ocorrer o processo. A menor exergia de refrigeração obtida foi de $-2,8$ W, correspondente à corrente de 4 A.

A eficiência exergética de refrigeração nesse ensaio apresentou valores bem menores do que o *COP*. Novamente, isso se deve ao fato que no processo de conversão das formas de energia dentro dos componentes do módulo, há muita destruição de exergia. O maior valor de eficiência exergética de refrigeração obtido no ensaio foi de 0,051, na correspondente corrente de 0,5 A.

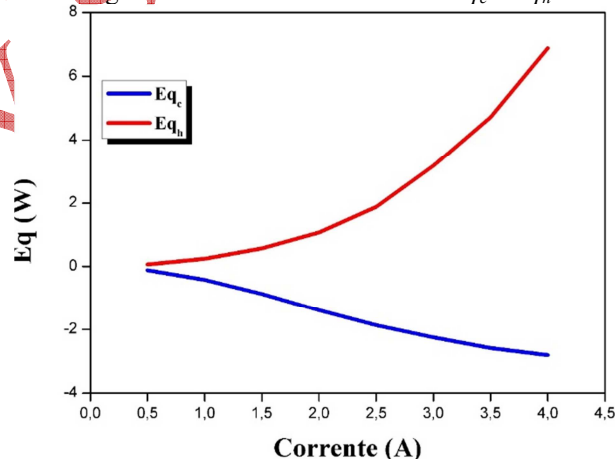
O custo por unidade de refrigeração, c_q , em função da corrente de entrada, diminuiu no decorrer do ensaio, como mostrado na Figura 13. Observando a Equação 21, apesar do numerador sofrer influência da potência de entrada pelo termo \dot{C}_p , os resultados de c_q são influenciados principalmente pelo termo $|Eq_c - Eq_h|$. A Figura 14 mostra o a variação desse termo no decorrer do ensaio.

Figura 13 – Efeito da corrente no custo por unidade de refrigeração



Fonte: dados da pesquisa

Figura 14 – Efeito da corrente em Eq_c e Eq_h



Fonte: dados da pesquisa

Como pode ser visto, a diferença entre Eq_c e Eq_h é mínima na corrente de 0,5A e máxima na corrente de 4 A. Assim, o custo será máximo na corrente de 0,5 A e mínimo na corrente de 4 A.

É importante salientar que apesar do custo ser menor em valores de correntes maiores, o *COP* é bem menor para tais correntes. Nesse caso, o ideal na hora de se projetar um ar-condicionado

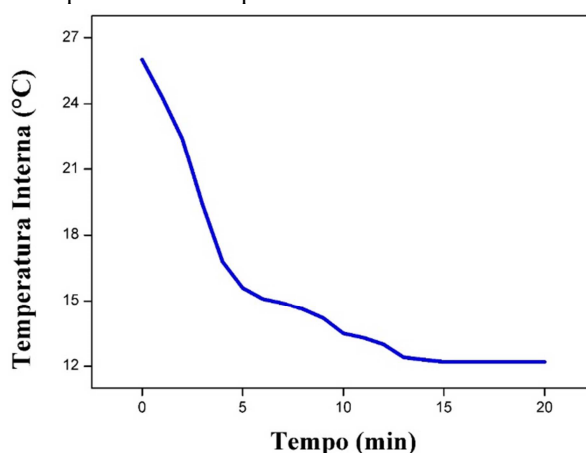
termoelétrico é achar um ponto ótimo na relação entre o *COP* e o custo por unidade de refrigeração que melhor atenda ao objetivo proposto.

De acordo com os resultados de Moria *et al.* (2021), foi identificado um ponto de pico no gráfico do custo por unidade de refrigeração em função da energia elétrica fornecida. Em contraste, os resultados do presente estudo revelaram um comportamento diferente, em que o custo por unidade de refrigeração diminuiu. Esse cenário pode ser atribuído ao fato que os autores consideraram a exergia de refrigeração (Equação 9) positiva.

4.3 Terceiro ensaio: simulação de um ambiente a ser refrigerado.

A variação da temperatura interna da caixa de isopor é mostrada na Figura 15. Em 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.

Figura 15 – Temperatura interna para 20 minutos de funcionamento do sistema



Fonte: dados da pesquisa

Vale salientar que apesar de nesse ensaio a corrente de entrada ser alta, pode se atingir os mesmos resultados utilizando mais módulos com corrente de entradas menores.

6 Conclusões

Esse artigo teve como objetivo fazer uma análise energética, exergética e exergoeconômica, através do método SPECO, de um protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos.

Para o ensaio experimental, variando a corrente, a capacidade de refrigeração e o custo por unidade de refrigeração obtiveram melhores resultados com valores de correntes maiores. O maior valor de Q_c foi de 47,28 W na correspondente corrente elétrica de 4 A. No entanto, o *COP* apresentou resultados melhores para correntes de entrada menores, apresentando seu melhor resultado (2,79) na correspondente corrente de 0,5A.

Para o ensaio experimental, variando a temperatura da água, todos os parâmetros energéticos ofereceram melhores resultados para valores de temperatura da água mais baixos, uma vez que com menores valores de temperatura da água, menores serão as perdas devido ao efeito Fourier. O maior *COP* e maior Q_c obtidos foram de 0,79 e 69,10 W, respectivamente, na temperatura da água de 5 °C.

Pela ótica da exergia, ambos os ensaios mostraram eficiências exergéticas de refrigeração muito baixas em relação ao *COP* (0,043 para o ensaio variando a temperatura da água e 0,051 para o ensaio variando a corrente).

Pela ótica da exergoeconomia, ambos os ensaios mostraram que o custo por unidade de refrigeração diminuiu com o aumento da temperatura da água e com o aumento da corrente de entrada.

Conclui-se que o protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos, nas características e condições dos ensaios, teve resultados satisfatórios. E que as análises energética, exergética e exergoeconômica se mostraram eficazes para evidenciar sob quais condições o sistema tem melhor desempenho e menor custo.

Como sugestão para trabalhos futuros, podem ser citados: otimização do sistema proposto nesse trabalho; realizar 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.

Financiamento (obrigatória; não deve ser numerada)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. J. **Thermal design and optimization**. Wiley, 1995.
- BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Incropera**. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- CAVALCANTI, E. J. C. **Análise exergoeconômica e exergoambiental**. São Paulo: Blucher, 2018.
- DANIEL, C.; SHUKLA, A. K.; SHARMA, M.; PHANDEN, R. K.; OJHA, M. K. Design and fabrication of thermoelectric air-cooling system. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2178, n. 1, 012004, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2178/1/012004>.
- DIZAJI, H. S.; JAFARMADAR, S.; KHALILARYA, S.; MOOSAVI, A. An exhaustive experimental study of a novel air-water based thermoelectric cooling unit. **Applied Energy**, v. 181, p. 357-366, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.074>.
- DIZAJI, H. S.; JAFARMADAR, S.; KHALILARYA, S.; POURHEDAYAT, S. A comprehensive exergy analysis of a prototype Peltier air-cooler; experimental investigation. **Renewable Energy**, v. 131, p. 308-317, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.056>.
- GUCLU, T.; CUCE, E. Thermoelectric coolers (TECs): from theory to practice. **Journal of Electronic Materials**, v. 48, n. 1, p. 211-230, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6753-0>.
- HEIKES, R. R.; URE JUNIOR, R. W. **Thermoelectricity: Science and Engineering**. London: Interscience Publishers, 1961.
- LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. SPECOC: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. **Energy**, v. 31, n. 8-9, p. 1257-1289, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.03.011>.
- LIU, Y.; SU, Y. Experimental investigations on COPs of thermoelectric module frosting systems with various hot side cooling methods. **Applied Thermal Engineering**, v. 144, p. 747-756, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.056>.
- MORIA, H.; POURHEDAYAT, S.; DIZAJI, H. S.; ABUSORRAH, A. M.; ABU-HAMDEH, N. H.; WAE-HAYEE, M. Exergoeconomic analysis of a Peltier effect air cooler using experimental data. **Applied Thermal Engineering**, v. 186, 116513., 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116513>.

NEMATI, A.; NAMI, H.; YARI, M.; RANJBAR, F.; KOLVIR, H. R. Development of an exergoeconomic model for analysis and multi-objective optimization of a thermoelectric heat pump. **Energy Conversion and Management**, v. 130, p. 1-13, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.045>.

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

SULAIMAN, A. C.; AMIN, N. A. M.; BASHA, M. H.; MAJID, M. S. A.; NASIR, N. F. M.; ZAMAN, I. Cooling performance of thermoelectric cooling (TEC) and applications: a review. In: **MATEC Web of Conferences**, v. 225, 03021, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822503021>.

TIAN, M.-W.; ALDAWI, F.; ANQI, A. E.; MORIA, H.; DIZAJI, H. S.; WAE-HAYEE, M. 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, 101366, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101366>.

TIPSAENPORM, W.; RUNGSIYOPAS, M.; LERTSATITTHANAKORN, C. Thermodynamic analysis of a compact thermoelectric air conditioner. **Journal of Electronic Materials**, v. 43, n. 6, p. 1804-1808, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-013-2879-2>.

Revista Principia