

doi <https://doi.org/10.18265/2447-9187a2022id7758>
ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 29/05/2023

APROVADO 06/08/2023

PUBLICADO ON-LINE 23/08/2023

VERSÃO FINAL DIAGRAMADA 14/01/2025

EDITOR ASSOCIADO

Prof. Dr. Ademar Gonçalves da Costa Junior

Análise energética, exergética 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] carloscabralsantos@yahoo.com.br

Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil

* Autor para correspondência.

RESUMO: Este trabalho apresenta os resultados das análises energética, exergética e exergoeconômica de um protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos. Foram realizados dois ensaios principais: o primeiro variando a temperatura da água e o segundo variando a corrente de entrada do sistema. Na análise energética, foram calculados o coeficiente de desempenho do sistema (COP) e a capacidade de refrigeração (Q_c). Na análise exergética, foram calculadas a destruição de exergia, a exergia de refrigeração e a eficiência exergética de refrigeração. Por fim, na análise exergoeconômica, utilizando o método SPECO, foi calculado o custo por unidade de refrigeração (c_q). Os resultados da análise energética indicaram que o COP é maximizado para correntes de entrada menores e para temperaturas da água mais baixas, atingindo seu melhor resultado (2,79) na corrente elétrica de entrada de 0,5 A. A análise exergética revelou que a eficiência exergética de refrigeração utilizando módulos termoelétricos é muito baixa em relação ao COP , com valores de 0,043 para o ensaio variando a temperatura da água e 0,051 para o ensaio variando a corrente. A análise exergoeconômica mostrou que o custo por unidade de refrigeração diminuiu com o aumento da temperatura da água e da corrente de entrada. Além disso, um ensaio simulando um ambiente a ser refrigerado demonstrou que, com uma corrente elétrica de 3 A, o protótipo conseguiu reduzir a temperatura em 10,4 °C após 5 minutos de funcionamento. Conclui-se que o sistema de refrigeração termoelétrico experimental proposto apresentou resultados satisfatórios nas condições e características dos ensaios realizados. As análises energética, exergética e exergoeconômica mostraram-se eficazes para identificar as condições sob as quais o sistema apresenta melhor desempenho e menor custo.

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

Energy, exergy, and exergoeconomic analysis of an air-conditioning prototype using thermoelectric modules

ABSTRACT: This study presents the results of the energy, exergy, and exergoeconomic analyses of an air-conditioning prototype using thermoelectric



modules. Two main tests were conducted: the first varying the water temperature and the second varying the system input current. In the energy analysis, the system's coefficient of performance (COP) and cooling capacity (Q_c) were calculated. In the exergy analysis, exergy destruction, refrigeration exergy, and exergy efficiency of refrigeration were calculated. Finally, in the exergoeconomic analysis, using the SPECO method, the cost per unit of refrigeration (c_q) was calculated. The results of the energy analysis indicated that the COP is maximized for lower input currents and for lower water temperatures, reaching its best result (2.79) at an input current of 0.5A. The exergy analysis revealed that the exergy efficiency of refrigeration using thermoelectric modules is very low compared to the COP, with values of 0.043 for the test varying the water temperature and 0.051 for the test varying the current. The exergoeconomic analysis showed that the cost per unit of refrigeration decreases with increasing water temperature and increasing inlet current. Additionally, a test simulating current room to be cooled demonstrated that, with an electric current of 3 A, the prototype was able to reduce the temperature by 10.4 °C after 5 minutes of operation. It is concluded that the proposed experimental thermoelectric cooling system showed satisfactory results under the conditions and characteristics of the tests performed. The energy, exergy, and exergoeconomic analyses were effective in identifying the conditions under which the system performs best and incurs the lowest cost.

Keywords: exergoeconomics; exergy; refrigeration; thermoelectric modules.

1 Introdução

Nos últimos anos, a temperatura do planeta tem aumentado devido ao aquecimento global. Em consequência, o uso de aparelhos de ar-condicionado aumentou consideravelmente. Esse aumento na demanda de energia, aliado ao alto custo de vida e ao uso intensivo de clorofluorcarbonetos (CFCs), motivou fabricantes a buscarem tecnologias de resfriamento alternativas (Salah; Abuhelwa, 2020). Dito isso, a refrigeração utilizando módulos termoelétricos tem atraído o interesse das pesquisas nas últimas décadas. Essa tecnologia destaca-se por possuir longa vida útil dos módulos, operar sem ruídos, não utilizar fluidos refrigerantes danosos ao meio ambiente, oferecer ótimo controle de temperatura e apresentar alta flexibilidade de utilização (Daniel *et al.*, 2022). Atualmente, essa tecnologia é proposta para vários fins, como, por exemplo, resfriamento de componentes eletrônicos, ar-condicionado automotivo e residencial (Tian *et al.*, 2021).

Um módulo termoelétrico é um dispositivo eletrônico composto por dois materiais semicondutores que utiliza o efeito Peltier para converter energia em um gradiente de temperatura (Sulaiman *et al.*, 2018). O maior desafio no uso de módulos termoelétricos 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 dos sistemas de refrigeração termoelétricos varia entre 0,35 e 0,5, o que limita sua aplicação a demandas de baixa capacidade de refrigeração ou condições específicas, como alta confiabilidade e tamanho reduzido (Salah; Abuhelwa, 2020).

Para melhorar a eficiência dos sistemas termoelétricos, estudos recentes têm buscado mensurar a eficiência de equipamentos e processos através da análise da exergia, visando minimizar os desperdícios energéticos do sistema (Cavalcanti, 2018). Esse tipo de

análise é amplamente utilizado para verificar quão próximo um processo real está do processo ideal, mostrando as perdas de energia devido às irreversibilidades que não são contabilizadas nas análises térmicas convencionais (Tipsaenporm; Rungsiyopas; Lertsatitthanakorn, 2014).

Além da análise exérgica, os princípios econômicos passaram a ser considerados nas pesquisas, integrando os aspectos ligados às melhorias dos sistemas de conversão de energia (Bejan; Tsatsaronis; Moran, 1995). A exergoeconomia, que combina análise exérgica com análise de custos, visa identificar os custos dos componentes do sistema e dos produtos (Nemati *et al.*, 2016). Essa ferramenta é importante para determinar as configurações de um sistema que oferecem menor custo e melhor desempenho (Tian *et al.*, 2021).

Dizaji *et al.* (2016) investigaram a viabilidade de um ar-condicionado termoelétrico com o lado quente dos módulos sendo resfriado à 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 indicaram a existência de um ponto de pico na relação COP/COP_{máx} do sistema para todos os parâmetros variáveis, sugerindo condições ideais para o ar-condicionado termoelétrico. Foi evidenciado que os sistemas termoelétricos são viáveis para ar-condicionado, especialmente quando o lado quente é resfriado com água.

Liu e Su (2018) demonstraram a eficácia do uso de sistemas termoelétricos para refrigeração através de cinco configurações experimentais, variando métodos de resfriamento para o lado quente. Os métodos incluíram três métodos ativos (ventilador com dissipador de calor, convecção forçada da água, convecção forçada do ar) e dois métodos passivos (convecção livre da água e do ar). Os resultados constataram que o COP médio dos métodos de resfriamento ativo é superior ao dos métodos passivos e que a água é mais eficiente que o ar como fluido de resfriamento em aplicações termoelétricas.

Dizaji *et al.* (2019) analisaram os efeitos da tensão, fluxo de ar/água e temperatura do ar/água na destruição de exergia e na eficiência da segunda lei de um ar-condicionado termoelétrico. Os resultados mostraram que a curva de desempenho exérgico tem comportamento descendente-ascendente e que o aumento da vazão de ar melhorou o desempenho exérgico do ar-condicionado termoelétrico. Também foi observado que temperaturas mais altas de entrada de ar reduzem a destruição de exergia do sistema, tornando o sistema mais apropriado para regiões com climas quentes.

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

Daniel *et al.* (2022) projetaram e fabricaram um ar-condicionado termoelétrico com 12 módulos e controle de temperatura via Arduino, utilizando água para dissipar o calor. Os resultados mostraram que o ar-condicionado reduziu a temperatura de 30 °C para 25 °C em 300 segundos e para 15 °C em 700 segundos. Com ajustes nos parâmetros elétricos do sistema, o COP alcançado 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, exérgica e exergoeconômica, utilizando o método SPECO, a fim de avaliar sob quais

condições os módulos trabalham com maior desempenho e menor custo. As seções subsequentes do artigo estão organizadas da seguinte forma: na seção 2, é apresentada a modelagem matemática utilizada nos cálculos; na seção 3, a metodologia usada no trabalho é descrita; na seção 4, são discutidos os principais resultados; e por fim, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são abordadas na seção 5.

2 Modelagem matemática

O desenvolvimento matemático apresentado nas subseções a seguir está baseado nos trabalhos de Heikes e Ure Jr (1961), Bergman e Lavine (2019) e Lazzaretto e Tsatsaronis (2006).

2.1 Cálculos energéticos

A capacidade de refrigeração (Q_c) de um módulo termoelétrico é a 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 o calor é transferido de uma superfície quente para uma superfície fria através da condução.

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

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

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

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).

Juntando os três efeitos anteriores, tem-se a equação da capacidade de refrigeração do módulo termoelétrico, em W, dada por:

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

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) é calculada pela soma dos mesmos três efeitos anteriores. A diferença é que o efeito Peltier será calculado com base na temperatura do 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:

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

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:

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

O coeficiente de desempenho (COP) é dado pelo quociente da capacidade de refrigeração (Q_c) dividida 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 8:

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

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:

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

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

A eficiência exergética de refrigeração é dada pelo quociente da exergia de refrigeração dividida pela potência de entrada, :

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

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:

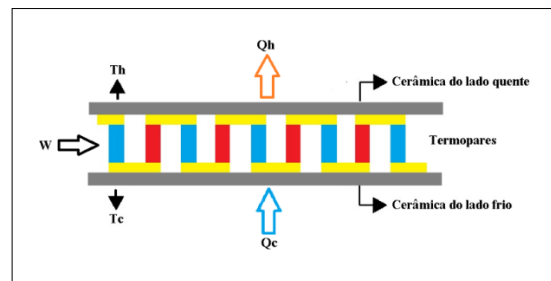
$$E_{destruída} = T_o \left(\frac{Q_h}{T_h} - \frac{Q_c}{T_c} \right) \quad (12)$$

2.3 Cálculos exergoeconômicos

Para aplicar o método SPECOS, devem-se seguir etapas principais. Primeiramente, é necessário identificar os componentes e todos os fluxos de entrada e saída de massa, calor e trabalho, juntamente com suas respectivas exergias. Cada módulo termoelétrico é composto por três componentes principais: a cerâmica do lado frio, os termopares e a cerâmica do lado quente (Figura 1).

Figura 1 ▶

Componentes de um módulo termoelétrico.
Fonte: elaborado pelos autores



A exergia é dividida em três categorias: exergia de refrigeração (E_{q_c}), exergia de aquecimento (E_{q_h}) e exergia relacionada à energia de entrada (E_w).

A segunda etapa envolve a definição dos produtos e dos combustíveis para cada componente. A definição de combustível e produto de cada componente está descrita no Quadro 1.

Quadro 1 ▶

Combustível e produto de cada componente.
Fonte: elaborado pelos autores

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

A terceira etapa consiste na aplicação da equação de balanço de custo para cada componente do sistema. A equação de 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); $\dot{C}_{q,c}$ é o custo de refrigeração (em \$/s); \dot{Z}_{cer} e $\dot{Z}_{termopar}$ são 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 energia (trabalho) são dados pelas Equações 18-20, respectivamente.

$$\dot{C}_{q,c} = \dot{C}_{q,h} + \dot{C}_w + 2\dot{Z}_{cer} + \dot{Z}_{termopar} \quad (17)$$

$$\dot{C}_{q,h} = c_q \times Eq_h \quad (18)$$

$$\dot{C}_{q,c} = c_q \times Eq_c \quad (19)$$

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

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:

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

$$CRF = i \left[\frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \times \frac{1}{n \times nh \times 3.600} \quad (23)$$

onde: i é a taxa anual de juros; n é a 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; φ é o fator de manutenção.

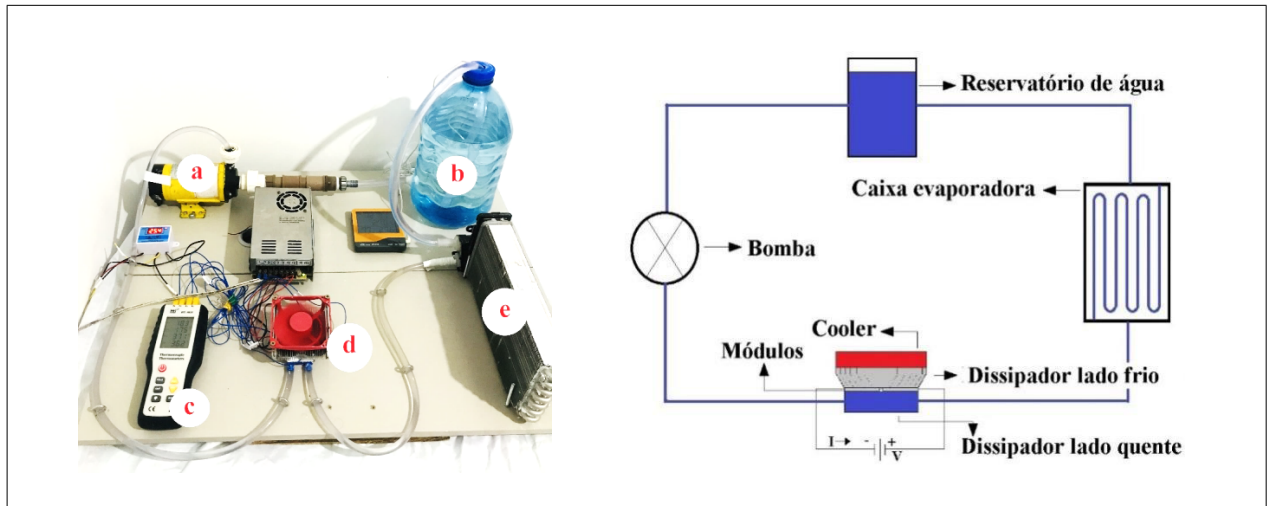
Figura 2 ▼

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

Fonte: elaborado pelos autores

3 Metodologia

A Figura 2 apresenta uma vista geral do protótipo de ar-condicionado termoelétrico e seu esquema.



O sistema proposto opera com base no efeito Peltier, em que um lado do módulo termoelétrico gera frio e o outro lado gera calor. Os lados frios dos módulos estão em contato com um dissipador de alumínio acoplado a um *cooler*, transferindo o frio gerado para o ar ambiente. Como a quantidade de frio gerado em um lado é proporcional à quantidade de calor gerado no outro lado, esse calor precisa ser dissipado. Para isso, utilizou-se um dissipador de calor aletado resfriado à água nos lados quentes dos módulos.

Após a água absorver o calor dos módulos, ela passa por uma unidade evaporativa comum, constituída de centenas de aletas, reduzindo sua temperatura. Um reservatório com capacidade de 5 litros abastece a água que circula no sistema, e uma bomba ajustada para uma vazão de 2,45 litros por minuto impulsiona essa circulação.

O sistema utiliza dois módulos termoelétricos modelo TEC1-12706 da fabricante Hebei I.T (Shangai) Co Ltd. As especificações dos módulos estão disponíveis no catálogo do fabricante e são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 ►

Especificações do módulo termoelétrico TEC1-12706. Fonte: dados da pesquisa

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

A medição das temperaturas das superfícies dos módulos foi realizada com um termômetro termopar digital modelo HT-9815, fabricado pela Dongguan Xintai Instrument. As medições da temperatura ambiente e da água foram feitas com um termostato modelo DM-W3001 e um termo-higrômetro modelo HT-20, respectivamente.

Para obter as temperaturas do lado frio dos módulos, foram criados pequenos canais no dissipador de alumínio, onde os termopares foram instalados. Para medir as temperaturas do lado quente, outros dois termopares foram colocados entre os módulos e em contato com o dissipador de calor resfriado à água. Como a água possui poder de absorção de calor, a temperatura em toda a face do dissipador de calor do lado quente foi considerada uniforme.

A energia elétrica para o sistema termoeletrico foi fornecida por duas fontes de alimentação da Minipa modelo MPL-3303M e uma fonte chaveada padrão 12V/25A, dependendo das características do ensaio. Para maior precisão, 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. Todos os instrumentos foram devidamente testados e calibrados antes de cada ensaio, conforme mostrado no Quadro 3.

Quadro 3 ▶

Características dos instrumentos de medição utilizados.

Fonte: dados da pesquisa

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	0,0001 V/0,4%
Multímetro Agilent U1242B	0,0001 A/0,5%
Fonte de alimentação Minipa MPL-3303M	Tensão 100 mV/1% Corrente 10 mA/1%

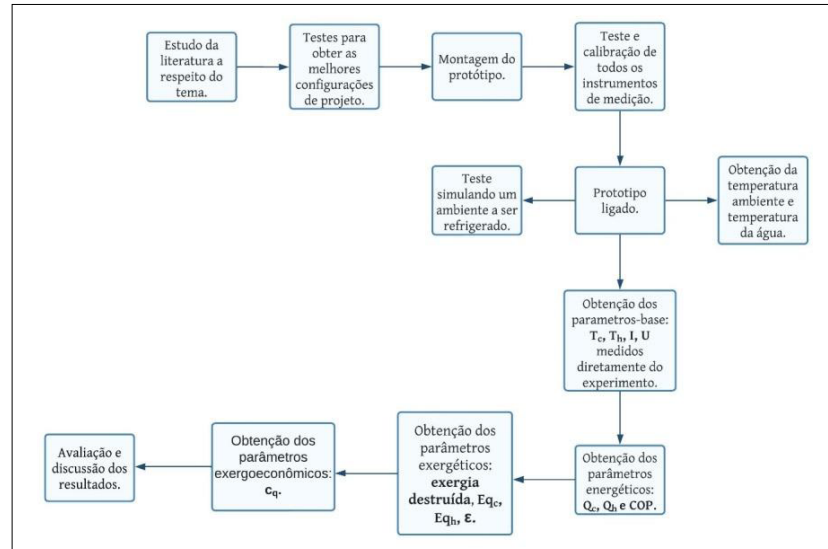
O estudo considerou como volume de controle os dois módulos termoeletricos. Os custos de investimento em cerâmica e termopares foram estimados em 0,1 \$/cm² e 0,000889565 \$/mm³ (Nemati *et al.*, 2016), totalizando \$ 6,4 e \$ 5,12, respectivamente. Adotou-se o valor de R\$ 5,00 por dólar. O coeficiente de Seebeck (α), a resistência elétrica (R) e a condutividade térmica (K) foram 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 2.190 horas de funcionamento por ano (6 horas diárias). Nos resultados, T_c e T_h referem-se às temperaturas médias dos módulos, e Q_c e Q_h , às capacidades de refrigeração e aquecimento de cada módulo, respectivamente.

Três tipos de ensaios foram realizados: o primeiro variou a temperatura da água que resfria os módulos; o segundo variou a corrente de entrada; e o terceiro simulou um ambiente a ser refrigerado. Para garantir a confiabilidade dos resultados, cada teste foi repetido três vezes. O fluxograma na Figura 3 apresenta todas as etapas seguidas na elaboração deste estudo.

Figura 3 ►

Etapas seguidas na elaboração do estudo.

Fonte: elaborado pelos autores



3.1 Primeiro ensaio: variação da temperatura da água

No primeiro ensaio, a temperatura da água que resfria o lado quente dos módulos foi testada para os valores de 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C. A fonte chaveada 12V/25A forneceu a corrente utilizada pelos módulos. A temperatura ambiente registrada pelo termostato foi de 25,2 °C. Quatro multímetros foram empregados para medir as tensões e correntes de cada módulo, que permaneceram constantes durante o ensaio. Para cada valor de temperatura da água, realizaram-se cinco medições. Todos os ensaios ocorreram no laboratório da Rede Cooperativa de Pesquisa do Gás Natural RECOGÁS – UFPB. A bancada experimental deste ensaio é mostrada na Figura 2.

3.2 Segundo ensaio: variação da corrente de entrada do sistema

No segundo ensaio, variou-se a corrente de alimentação dos módulos para os valores de 0,5 A; 1 A; 1,5 A; 2 A; 2,5 A; 3 A; 3,5 A e 4 A. As fontes Minipa forneceram as correntes utilizadas pelos módulos. A temperatura ambiente e da água registradas foram de 27,2 °C e 29,8 °C, respectivamente. Para cada valor de corrente, foram realizadas duas medições. Todos os ensaios ocorreram no Laboratório de Motores e Acionamentos Elétricos (LMA-UFPB). A bancada experimental deste ensaio é mostrada na Figura 4.

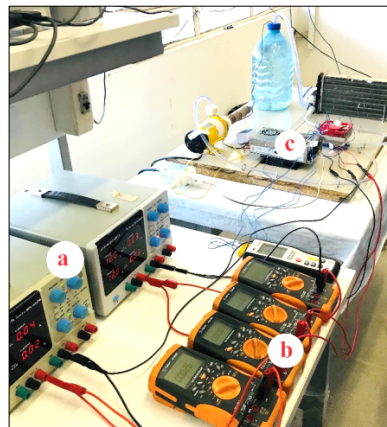
Figura 4 ►

Bancada experimental para o ensaio variando a corrente.
(a) Fontes de alimentação.

(b) Multímetros.

(c) Fonte chaveada.

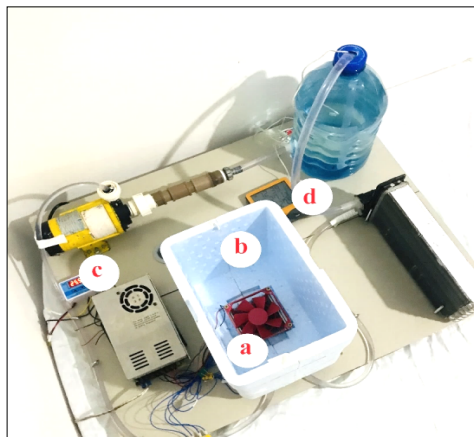
Fonte: arquivo dos autores



3.3 Terceiro ensaio: simulação de um ambiente a ser refrigerado

Para 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 interna, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 ▶
Protótipo de ar-condicionado termoeletrico 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.

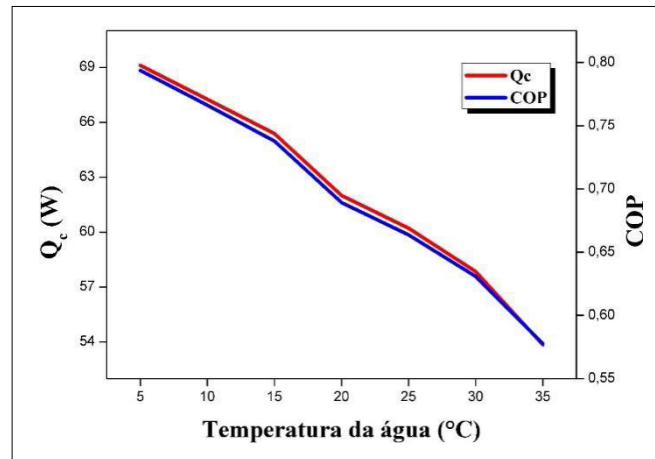
4.1 Primeiro ensaio: variação da temperatura da água

Primeiramente, é preciso compreender o comportamento do termo ΔT . Nos módulos termoeletricos, quanto mais calor é retirado do lado quente, menor será a temperatura no lado frio. Nesse ensaio, com o aumento da temperatura da água, as temperaturas dos lados quente (T_h) e 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, a diferença de temperatura entre os dois lados do módulo (ΔT) apresentou um comportamento crescente no decorrer do ensaio.

Observando a Equação 4, das três parcelas da capacidade de refrigeração, a que mais influenciou Q_c nesse ensaio foi o efeito Fourier. Isso se deve ao fato de que a corrente, o coeficiente de Seebeck (α), a resistência elétrica (R) e a condutividade térmica (K) são constantes. Como foi observado que ΔT aumentou ao longo do ensaio, Q_c apresentou um comportamento decrescente, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 ►

Efeito da temperatura da água em Q_c e COP.
 Fonte: dados da pesquisa



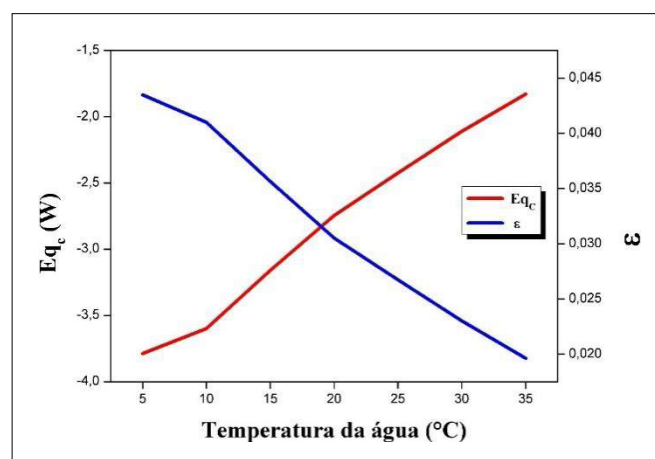
As curvas de Q_c e COP em função da temperatura da água apresentaram o mesmo comportamento, uma vez que, nesse ensaio, a corrente elétrica foi mantida aproximadamente constante (3,653 A), e o COP dependendo diretamente de Q_c . O maior valor de Q_c obtido no ensaio foi de 69,11 W, correspondente à temperatura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

No que diz respeito aos parâmetros exergeticos, em uma 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. Dizaji *et al.* (2019), ao avaliarem um ar-condicionado termoelétrico com o lado quente do módulo também resfriado à água, chegaram a resultados semelhantes aos obtidos neste estudo. Em ambos os trabalhos, a variação da destruição de exergia correspondeu a menos de 2% do valor total, concluindo que a influência da temperatura da água na destruição de exergia é bem inferior quando comparada a outros fatores como a corrente de entrada.

Os comportamentos da exergia de refrigeração (E_{q_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 o valor entre parênteses da Equação 9 é menor do que 1, pois durante todo o ensaio T_c foi menor que T_o , resultando em exergia de refrigeração negativa. Isso pode ser entendido pela segunda lei da termodinâmica, que estabelece que o calor flui naturalmente de uma região de temperatura mais alta para uma região

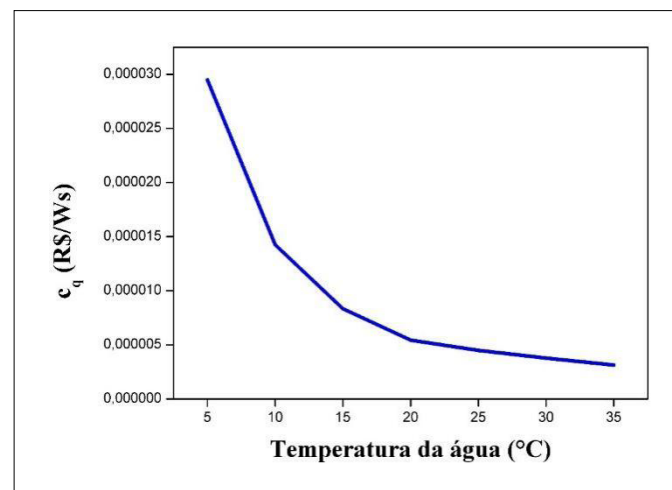
de temperatura mais baixa. Em um sistema de ar-condicionado, o objetivo é o oposto (transferir calor de uma região mais fria para uma mais quente), exigindo a aplicação de trabalho para que o processo ocorra. Portanto, a exergia negativa reflete que a transferência de calor está ocorrendo na direção contrária à natural e requer entrada de trabalho. A menor exergia de refrigeração obtida foi de $-3,78$ W, correspondente à temperatura da água de 5 °C.

Como o sistema é alimentado por energia elétrica – uma forma organizada de energia com 100% de exergia – e essa energia é transformada em calor – uma forma desorganizada de energia com menor exergia –, há significativa destruição de exergia durante o processo de conversão. Como consequência, a eficiência exergética de refrigeração (ε) é bem menor do que o *COP*. A maior eficiência exergética de refrigeração foi de 0,043, obtida na temperatura da água de 5 °C.

Portanto, pode-se afirmar que os sistemas termoelétricos 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 termoelétrica com fontes de baixa exergia, como painéis fotovoltaicos.

Na área de exergoeconomia, um dos parâmetros mais importantes 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.

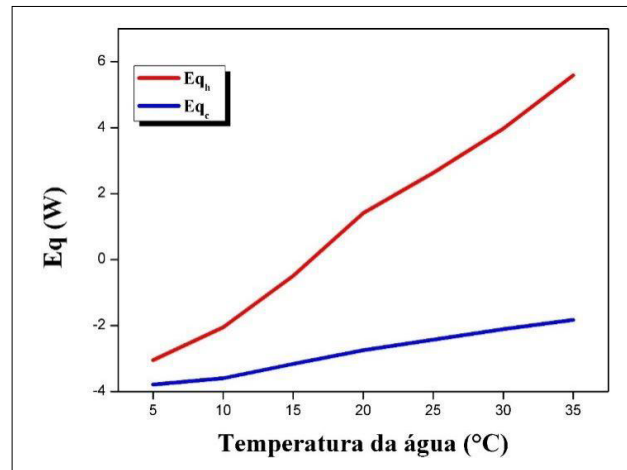
Figura 8 ►
Efeito da temperatura da água no c_q .
Fonte: dados da pesquisa



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 apresentou um comportamento decrescente, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 9 ▶

Efeito da temperatura da água em E_{q_c} e E_{q_h} .
 Fonte: dados da pesquisa



Utilizando uma metodologia experimental semelhante à desta pesquisa, Tian *et al.* (2021) 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.* (2021) encontraram um custo que aumenta com a temperatura da água, divergindo dos resultados obtidos nesta pesquisa. Essa diferença se deve ao fato de os autores adotarem que a exergia de refrigeração (Equação 9) será positiva.

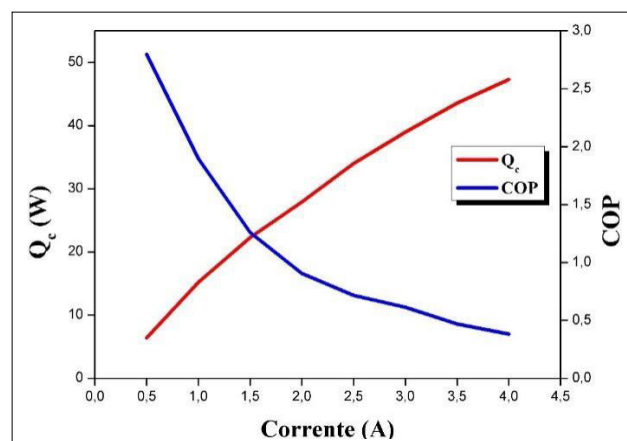
4.2 Segundo ensaio: variação da corrente de entrada do sistema

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

Conforme ilustrado na Figura 10, houve um incremento na capacidade de refrigeração à medida que a corrente foi aumentada. Isso ocorre porque o efeito Peltier, para os valores de corrente desse ensaio, cresceu mais rapidamente do que as irreversibilidades internas do sistema (efeitos Joule e Fourier). O maior valor de Q_c obtido foi de 47,29 W, correspondente à corrente de 4 A.

Figura 10 ▶

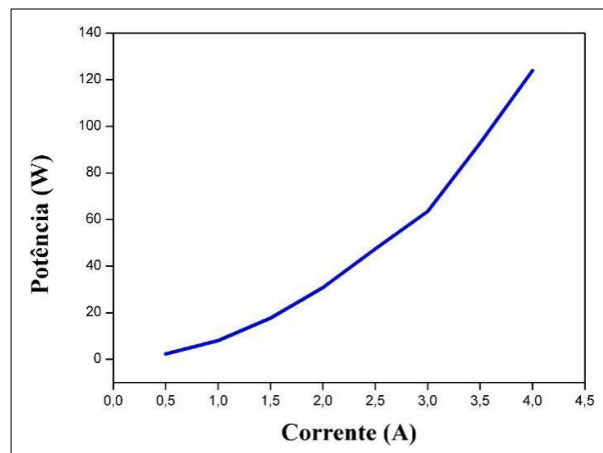
Efeito da corrente em Q_c e COP.
 Fonte: dados da pesquisa



O *COP* do sistema diminuiu 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 foi de 2,79, correspondente à corrente de 0,5 A.

Figura 11 ►

Efeito da corrente na potência do sistema.
Fonte: dados da pesquisa



Sob a ótica da energia, é mais vantajoso utilizar o sistema com correntes de entrada mais baixas. Uma forma de otimizar o desempenho de um ar-condicionado termoelétrico seria aumentar o número de módulos utilizados, diminuindo assim a corrente utilizada por cada módulo individual. Desse modo, obter-se-ia o mesmo valor de Q_c , mas com um *COP* geral maior.

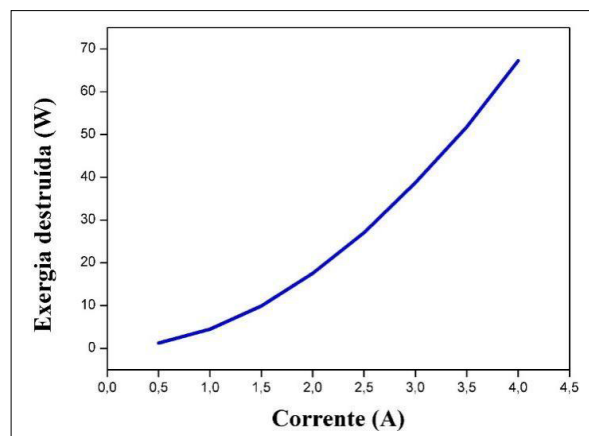
Os resultados deste trabalho corroboram as descobertas de Dizaji *et al.* (2016), que também observaram um aumento de Q_c e uma diminuição do *COP* em seu estudo. Utilizando apenas um módulo, os autores encontraram uma capacidade de refrigeração máxima de aproximadamente 16 W e um *COP* máximo de 2,97, 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, no experimento de Dizaji *et al.* (2016), foi examinado 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, a temperatura ambiente de 27,2 °C mostrou que a exergia destruída apresentou um comportamento crescente no ensaio (Figura 12).

Figura 12 ►

Efeito da corrente na destruição de exergia.
Fonte: dados da pesquisa



Para maiores valores de correntes, as perdas devido ao efeito Joule e ao efeito Fourier, que são as irreversibilidades internas do sistema, também aumentam. 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 com o aumento da 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 de que, em um ar-condicionado, a transferência de calor ocorre na direção contrária à natural, sendo necessária a entrada de trabalho para que o processo ocorra. A menor exergia de refrigeração obtida foi de -2,8 W, correspondente à corrente de 4 A.

A eficiência exérgica de refrigeração nesse ensaio apresentou valores bem menores do que o *COP*. Isso se deve ao fato de que, no processo de conversão das formas de energia dentro dos componentes do módulo, há muita destruição de exergia. O maior valor de eficiência exérgica de refrigeração obtido 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, embora o numerador sofra 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 a variação desse termo no decorrer do ensaio.

Figura 13 ►

Efeito da corrente no custo por unidade de refrigeração.

Fonte: dados da pesquisa

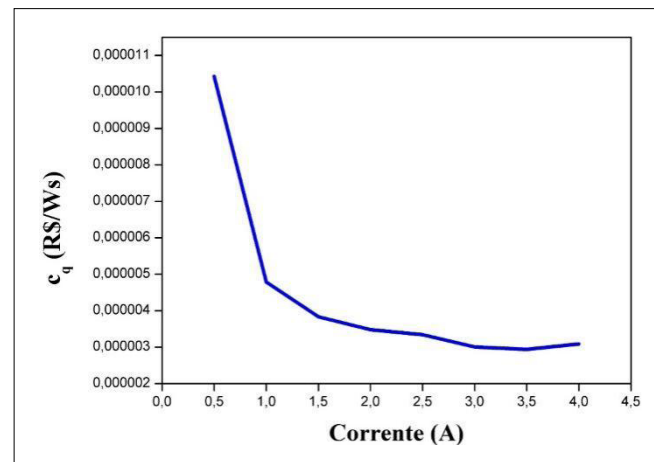
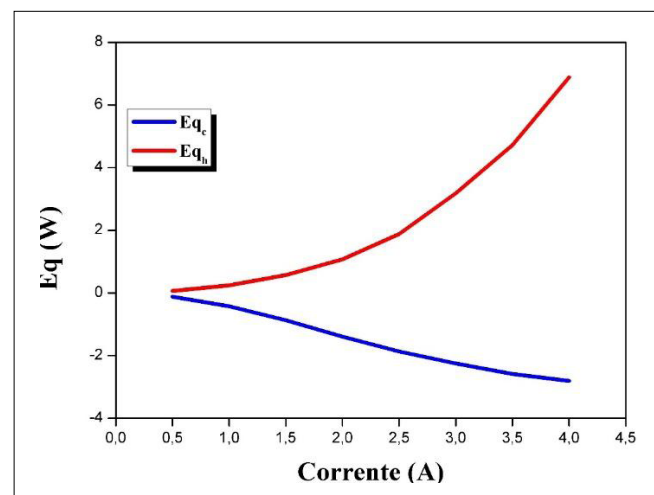


Figura 14 ►

Efeito da corrente em Eq_c e Eq_h .

Fonte: dados da pesquisa



Como pode ser visto, a diferença entre E_{q_c} e E_{q_h} é mínima na corrente de 0,5 A 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 de o 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 encontrar um ponto ótimo na relação entre o *COP* e o custo por unidade de refrigeração que melhor atenda ao objetivo proposto.

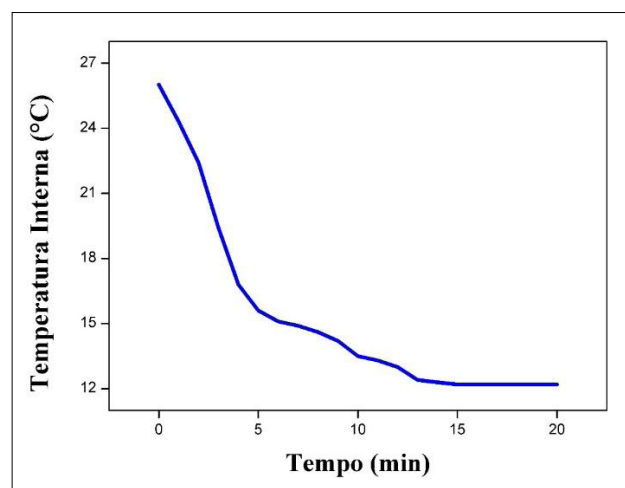
De acordo com os resultados de Moria *et al.* (2021), foi identificado um ponto de pico no gráfico do custo por unidade de refrigeração em função da energia elétrica fornecida. Em contraste, os resultados do presente estudo revelaram um comportamento diferente, em que o custo por unidade de refrigeração diminuiu. Esse cenário pode ser atribuído ao fato de 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 passou 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, é possível atingir os mesmos resultados utilizando mais módulos com correntes de entrada menores.

5 Conclusões

Este artigo teve como objetivo realizar uma análise energética, exérgica e exergoeconômica de um protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos, empregando o método SPECO.

Nos ensaios experimentais, variando a corrente elétrica, observou-se que a capacidade de refrigeração e o custo por unidade de refrigeração apresentaram melhores resultados com valores de correntes maiores. O maior valor de Q_c foi de 47,28 W,

correspondente à corrente elétrica de 4 A. No entanto, o *COP* apresentou melhores resultados para correntes de entrada menores, atingindo seu valor máximo de 2,79 na corrente de 0,5 A.

Ainda nos ensaios experimentais, variando a temperatura da água, todos os parâmetros energéticos ofereceram melhores resultados para valores mais baixos de temperatura da água, uma vez que menores valores de temperatura da água reduzem 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.

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

Pela perspectiva da exergoeconomia, ambos os ensaios indicaram 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 termoeletrônicos, nas características e condições dos ensaios, apresentou resultados satisfatórios. As análises energética, exergética e exergoeconômica mostraram-se eficazes para evidenciar sob quais condições o sistema tem melhor desempenho e menor custo.

Para trabalhos futuros, sugere-se a otimização do sistema proposto; a realização de uma análise exergoambiental do sistema; a utilização de água para remover calor do lado frio; a utilização de módulos com maiores valores de figura de mérito; e a simulação da configuração utilizada no software Ansys.

Financiamento

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.

Nota

Este artigo é derivado de dissertação do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/30091>.

Contribuições ao artigo

LEITE, T. R. A.; SANTOS, C. A. C.: concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. J. **Thermal design and optimization**. New York: 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 JR, R. W. **Thermoelectricity: Science and Engineering**. New York: 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. **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>.