



## Comportamento caótico em sistemas de captação de energia pelo efeito Seebeck: estudo de caso em rampas de temperatura estáveis

### Chaotic behavior in energy harvesting systems by Seebeck effect: a case study on stable temperature ramps

Marlon Abati<sup>1</sup>, Luiz Felipe Cassimano dos Santos<sup>2</sup>, Kamily Fulber Basseio<sup>3</sup>, Luiza Morsche Romani<sup>4</sup>, Vinícius Franzen Ramilo<sup>5</sup>, Douglas da Costa Ferreira<sup>6</sup>

#### RESUMO

Inúmeros trabalhos tratam de maneiras de obter energia elétrica de forma limpa e sustentável e, dentre esses trabalhos, destacam-se os estudos relacionados aos sistemas de captação de energia. Captar energia é converter pequenas fontes em energia elétrica, seja vibração, luz, som, radiação, ondas eletromagnéticas e pequenos gradientes de temperatura. Em relação ao gradiente de temperatura, a maior parte dos estudos utiliza a conversão realizada por meio de placas termoelétricas. Essas placas, quando recebem energia elétrica geram uma diferença de temperatura entre suas faces, chamado de Efeito Peltier, o processo inverso, quando existe uma diferença de temperatura entre as faces e é extraída energia elétrica, chama-se Efeito Seebeck. Esse estudo irá focar no Efeito Seebeck e no entendimento do possível efeito caótico que a variação de temperatura causa na captação de energia, para em estudos futuros, desenvolver um controlador de forma a aumentar a eficiência do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Captação de Energia; Comportamento Caótico; Efeito Seebeck

#### ABSTRACT

Numerous works deal with ways to obtain electricity in a clean and sustainable way, and, among these works, the studies related to energy capture systems stand out. To capture energy is to convert small sources into electrical energy, be it vibration, light, sound, radiation, electromagnetic waves, and small temperature gradients. Regarding the temperature gradient, most studies use the conversion performed by means of thermoelectric plates. These plates, when they receive electrical energy generate a temperature difference between their faces, called the Peltier Effect, the reverse process, when there is a temperature difference between the faces and electrical energy is extracted, is called the Seebeck Effect. This study will focus on the Seebeck Effect and the understanding of the possible chaotic effect that temperature variation causes in energy capture, to develop a controller in future studies to increase the efficiency of the system.

**KEYWORDS:** Energy Harvesting; Chaotic Behavior; Seebeck effect

## INTRODUÇÃO

Desde as primeiras máquinas a vapor, a geração de energia enfrenta um significativo problema de impacto ambiental. Os combustíveis fósseis também são muito poluentes, e mesmo hidrelétricas e parques eólicos possuem enormes impactos ambientais devido à

<sup>1</sup> Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: marlonabati@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 0455518685690851.

<sup>2</sup> Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: luizfelipesantos@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4815144904369862.

<sup>3</sup> Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: kamilyfulber@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 7472482229039771.

<sup>4</sup> Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: luizamorsche@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6777826032584670.

<sup>5</sup> Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: viniusramilo@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6102428625031381.

<sup>6</sup> Docente no Curso de Engenharia Química/DAENG. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: douglasferreira@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1684701123800326.



modificação causada no meio ambiente pela área alagada e rota das aves, respectivamente. Nesse sentido, a busca por maneiras de produção de energia elétrica sustentáveis e com menor impacto ambiental é uma busca constante em diversos estudos científicos (GURUACHARYA; HOSSAIN, 2018).

Uma alternativa mais sustentável para o meio ambiente são os sistemas de captação de energia, os quais transformam pequenas fontes de energia em energia elétrica, como pequenos gradientes de temperatura, pequenas movimentações de massa, radiofrequência, luz, ondas sonoras e vibração (HARB, 2011). Especificamente sobre o gradiente de temperatura, uma forma de conversão é por meio do Efeito Seebeck, utilizando pastilhas termoelétricas. As pastilhas termoelétricas são materiais dipolo, ou seja, possuem cargas positivas e negativas e quando submetidas a uma diferença de temperatura, produzem corrente elétrica (O. H. ANDO JUNIOR et al., 2016),

As pastilhas termoelétricas são fabricadas com materiais semicondutores e no efeito direto (Efeito Peltier) convertem energia elétrica em diferença de temperatura entre os lados opostos da pastilha. Com um dissipador de calor no lado quente da placa, são amplamente utilizados em sistemas de refrigeração pelo baixo consumo de energia elétrica e por não apresentarem ruído de compressores. Em sistemas de captação de energia utilizam o efeito inverso (Efeito Seebeck) é a opção mais utilizadas para pequenos gradientes de temperatura, sendo que a energia produzida é considerada limpa, renovável e sustentável, sendo esse um tema que vem sendo estudado desde o início dos anos 2000 e ainda possui muito a ser desenvolvido (CARUANA et al., 2016; KONG et al., 2023; XIE et al., 2023).

Na atualidade, nenhum sistema de captação de energia é viável economicamente como meio de substituir os sistemas de geração de energia tradicionais. Isso ocorre porque esses sistemas apresentam baixa eficiência e sua utilização é restrita onde os custos de manutenção suplantam a baixa eficiência (HUEN; DAOUD, 2017; XIE et al., 2023).

Dentre os diversos estudos para aumentar a eficiência dos sistemas de captação de energia de diferença de temperatura, o foco desse trabalho é no comportamento caótico desses sistemas. Já existem estudos buscando maximizar a captação de energia utilizando o comportamento caótico de sistemas vibratórios (HENRIQUE; COSTA; SILVA, 2013), mas em uma busca em diversas bases de dados de pesquisa, neste contexto, o presente estudo contribui na análise de caos para aumento da eficiência em sistemas de energia de diferença de temperatura.

Sistemas caóticos podem ser definidos como aqueles onde pequenas alterações nas condições iniciais resultam em efeitos significativos do comportamento (TAN et al., 2021; TELLES RIBEIRO et al., 2022). Os sistemas caóticos são não-lineares e podem ser caracterizados pela presença de *strange attractors* (KUMAR; GUPTA; ALI, 2019) que foram inicialmente observados por Lorenz (SPROTT, 2014) e mensurados em um sistema dinâmico não-linear por meio dos Expoentes de Lyapunov (DANCA; KUZNETSOV, 2018).

Apesar da significativa contribuição de Lyapunov para mensurar o caos e de Lorenz para estabelecer os conceitos dos sistemas caóticos, foi somente em 1985 que o estudioso Alan Wolf desenvolveu um algoritmo para determinar os expoentes de Lyapunov em seu trabalho "*Determining Lyapunov exponents from a time series*", que é a base do estudo de sistemas dinâmicos caóticos até os dias de hoje (FIEDLER-FERRARA; PRADO, 1994).

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de um sistema que converte diferença de temperatura em energia elétrica, comparando os picos de energia gerada e as

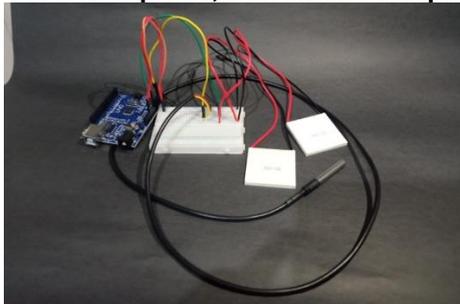


variações de temperatura no sistema termodinâmico, para verificar se há indícios de caos nesse sistema.

## METODOLOGIA

O experimento foi conduzido com a utilização de pastilhas termoelétricas fabricado de cerâmica e selada com silicone, modelo TEC1-12706, que tem dimensões de 40 mm x 40 mm x 3,4 mm, tensão de trabalho até 14 V, corrente até 6,4 A, potência máxima de 91 W, com uma resistência aproximada de 1,5  $\Omega$ . Essa placa termoelétrica opera entre -30 °C e 80 °C. A medição da temperatura foi realizada por meio de um sensor de temperatura ds18b20, que possui tensão de operação de 3 a 5,5 V, faixa de medição de -55 °C a 125 °C, precisão de  $\pm 0,5$  °C, resolução de 9 ou 12 bits e período de atualização menor que 750 ms. Para aquisição dos dados foi utilizado um Arduino Mega 2560 de 16 MHz, regulador de 5V, 4 portas seriais, 16 portas analógicas. Para fazer a conexão entre os sensores e o Arduino foi utilizado um protoboard de 840 pinos e fios jumper que evitam a necessidade de soldagem. O conjunto montado está mostrado na Figura 1.

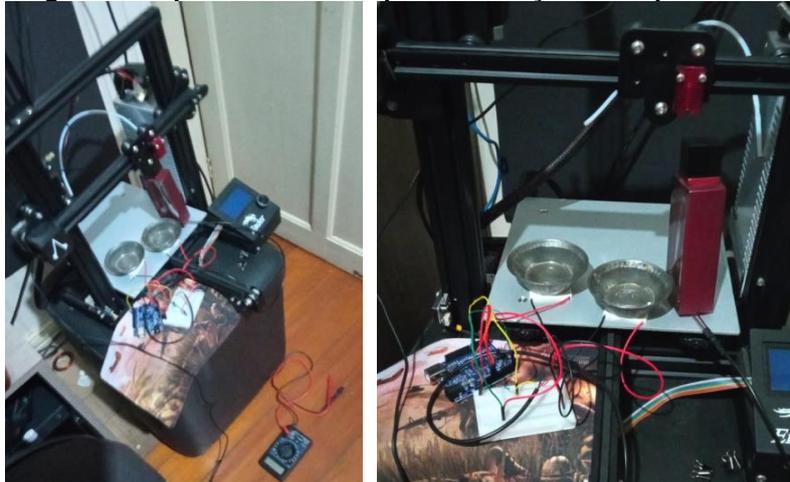
Figura 1 – Pastilha termoelétrica TEC1-12706, sensor de temperatura ds 189b20, Arduino Mega 2560 e protoboard 840 pinos, utilizados no experimento



Fonte: Autoria própria (2023)

O conjunto foi montado sobre uma impressora 3D que foi a fonte de calor. A opção de utilizar uma impressora 3D como fonte quente foi pela regulação precisa de temperatura da mesa da impressora 3D possibilitando uma maior acuracidade do experimento. O trabalho foi realizado de duas maneiras diferentes, com e sem um sistema resfriador. A fonte fria foram bacias com gelo, para manter a temperatura da face fria da pastilha termoelétrica com troca de calor constante com 0 °C, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Aparato montado para realização do experimento



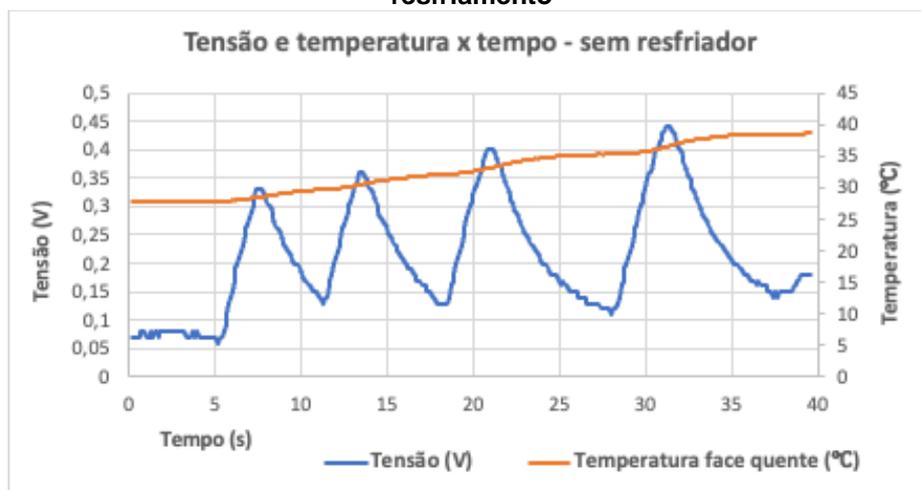
Fonte: Autoria própria (2023)

Foram coletados dados a cada 0,1 segundos variando a temperatura de forma contínua na face quente e mantendo gelo na bandeja na face fria. A análise dos dados coletados está apresentada no capítulo seguinte.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram coletadas 377 amostras sem resfriador. A temperatura inicial do experimento foi de 27,69 °C e a temperatura final de 38,56 °C na face quente, não foram realizadas medidas da face fria. A medição foi realizada na face quente da pastilha termoelétrica com sensor de temperatura ds18b20. A variação da tensão, coletada com Arduino no experimento, segue o padrão apresentado nos trabalhos teóricos e experimentais de (O. H. ANDO JUNIOR et al., 2016; THANKAKAN; NADAR, 2020), conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 –Variação da tensão captada (V) e da temperatura (°C) ao longo do experimento - sem resfriamento



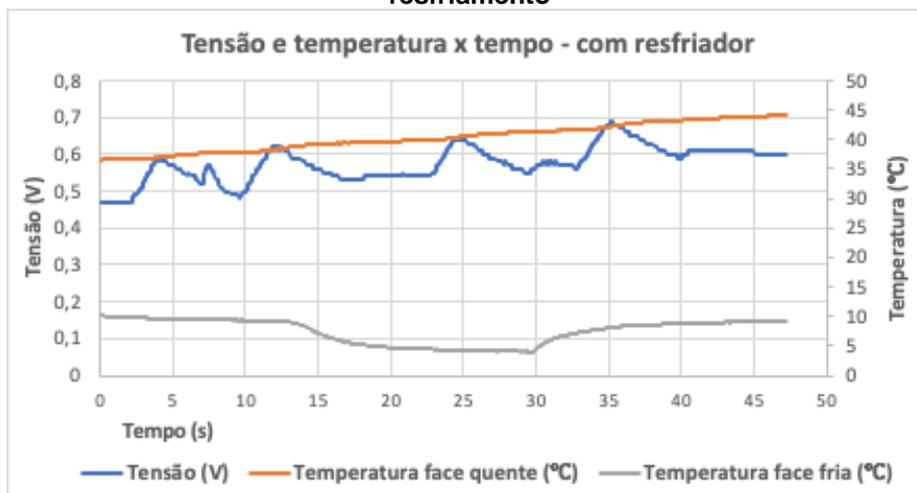
Fonte: Autoria própria (2023)



Foram coletadas 474 amostras com resfriador. A temperatura inicial da face fria foi de 10,13 °C e final de 9,19 °C. A temperatura inicial da face quente foi de 36,5 °C e final de 44,13 °C, conforme mostra a Figura 4.

Observa-se que existem picos de tensão tanto no experimento sem resfriamento quanto com resfriamento. Esses picos não podem ser explicados pelos conceitos clássicos da termodinâmica. O esperado era que a captação de energia em Volts fosse condizente com o aumento da diferença de temperatura entre as faces quente e fria. No experimento sem resfriamento a diferença de temperatura entre as faces vai decrescendo com o passar do tempo, e deveria haver um decréscimo da tensão coletada, o que não ocorreu. No experimento com resfriamento, mesmo o acréscimo de tensão ser justificado pelo aumento da diferença de temperatura entre as faces, os picos de tensão não podem ser explicados pelas leis da termodinâmica clássica.

Figura 4 –Variação da tensão captada (V) e da temperatura (°C) ao longo do experimento - com resfriamento



Fonte: Autoria própria (2023)

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi avaliar um possível comportamento caótico em sistemas de captação de energia pela diferença de temperatura em uma placa termoelétrica. Observou-se que existem picos de energia que não podem ser explicados pelos conceitos da termodinâmica clássica. Para caracterizar o comportamento caótico será preciso determinar os expoentes de Lyapunov com os dados experimentais, o que será a continuação dessa pesquisa. Em os expoentes de Lyapunov sendo positivos, então se confirma a hipótese de que os picos de energia captada são resultado do comportamento caótico do sistema termodinâmico estudado.

## Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por incentivar a pesquisa na graduação por meio do Programa de Iniciação Científica Voluntária (PIVIC).



Agradecemos à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação do Campus de Francisco Beltrão da UTFPR por disponibilizar os laboratórios de pesquisa e os instrumentos necessários para realização deste trabalho.

### Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

### REFERÊNCIAS

- CARUANA, A. J. et al. Demonstration of polycrystalline thin film coatings on glass for spin Seebeck energy harvesting. **Physica Status Solidi - Rapid Research Letters**, v. 10, n. 8, p. 613–617, 1 ago. 2016.
- DANCA, M. F.; KUZNETSOV, N. Matlab Code for Lyapunov Exponents of Fractional-Order Systems. **International Journal of Bifurcation and Chaos**, v. 28, n. 5, 1 maio 2018.
- GURUACHARYA, S.; HOSSAIN, E. Self-Sustainability of Energy Harvesting Systems: Concept, Analysis, and Design. **IEEE Transactions on Green Communications and Networking**, v. 2, n. 1, p. 175–192, 1 mar. 2018.
- HARB, A. Energy harvesting: State-of-the-art. **Renewable Energy**, v. 36, n. 10, p. 2641–2654, out. 2011.
- HENRIQUE, C.; COSTA, C.; SILVA, S. Exploiting Nonlinearities and Chaos To Enhance Energy Harvesting System Using Piezoelectric Devices. **22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)**, v. 1, n. Cobem, p. 449–457, 2013.
- HUEN, P.; DAOUD, W. A. Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, n. June 2014, p. 1295–1302, 2017.
- KONG, S. et al. Tellurium-Nanowire-Doped Thermoelectric Hydrogel with High Stretchability and Seebeck Coefficient for Low-Grade Heat Energy Harvesting. **Nano Energy**, p. 108708, jul. 2023.
- KUMAR, R.; GUPTA, S.; ALI, S. F. Energy harvesting from chaos in base excited double pendulum. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 124, p. 49–64, 1 jun. 2019.
- O. H. ANDO JUNIOR et al. Use of the Seebeck Effect for Energy Harvesting. **IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS**, v. 14, n. 9, p. 4106–4114, 2016.
- SPROTT, J. C. A dynamical system with a strange attractor and invariant tori. **Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics**, v. 378, n. 20, p. 1361–1363, 4 abr. 2014.
- TAN, T. et al. Piezoelectric autoparametric vibration energy harvesting with chaos control feature. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 161, 1 dez. 2021.
- TELLES RIBEIRO, J. G. et al. Controlling chaos for energy harvesting via digital extended time-delay feedback. **European Physical Journal: Special Topics**, v. 231, n. 8, p. 1485–1490, 1 jul. 2022.

XIII Seminário de Extensão e Inovação  
XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão  
20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR



SEI-SICITE  
2023



THANKAKAN, R.; NADAR, E. R. S. Investigation of a novel multi-input-singleoutput DC-DC converter topology with GWO based MPPT controller for energy harvesting using Seebeck generators at different thermal gradients. **IET Power Electronics**, v. 13, n. 17, p. 4098–4111, 21 dez. 2020.

XIE, Z. et al. Experimental and Field Study of a Pavement Thermoelectric Energy Harvesting System Based on the Seebeck Effect. **Journal of Electronic Materials**, v. 52, n. 1, p. 209–218, 1 jan. 2023.