

Uma Proposta de Gerador de Padrões Térmicos para Avaliação de Geradores Termoelétricos à Semicondutor

Mariana Marques Ferreira* Maria Paula Medeiros Gomes Miguel*
Cleonilson Protásio de Souza**

* *Graduanda em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, PB, Brasil, (e-mail: marianam.ferreira@cear.ufpb.br, maria.miguel@cear.ufpb.br).*

** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, PB, Brasil, (e-mail: protasio@cear.ufpb.br)*

Abstract: In recent decades, the search for alternative energy sources with low environmental impact has intensified. In this context, the concept of Energy Harvest emerged, which refers to the use of ambient energy and its conversion into electrical energy in order to power low-power electronic devices. Among the most varied forms of energy available in the environment, thermal energy has been highlighted, particularly in the conversion of thermal energy into electrical energy through Semiconductor Thermoelectric Generators (TEGs). In this article, experimental results of the behavior of a commercial TEG will be shown when subjected to different thermal standards applied to it. For this, a generator of thermal patterns was developed using the software LabVIEW, making it possible to determine values of temperatures that will be submitted to the TEG with the support of a Thermal Emulation Platform. Therefore, it is possible to analyze the dynamics of the electrical voltage effectively generated by the TEG in different thermal scenarios.

Resumo: Nas últimas décadas, tem-se intensificado a busca por fontes alternativas de energia que apresentem baixo impacto ambiental. Nesse âmbito, surgiu o conceito de Colheita de Energia que se refere ao aproveitamento da energia ambiente e a sua conversão em energia elétrica a fim de alimentar dispositivos eletrônicos de baixo consumo. Dentre as mais variadas formas de energias disponíveis no ambiente, a energia térmica vem se destacando, particularmente, na conversão de energia térmica em energia elétrica através de Geradores Termoelétricos à Semicondutor, denominados de TEGs. Neste artigo serão mostrados resultados experimentais do comportamento de um TEG comercial quando submetido à diferentes padrões térmicos aplicados sobre este. Para isso, foi desenvolvido um gerador de padrões térmicos utilizando o *software* LabVIEW, tornando possível determinar valores de temperaturas que serão submetidas ao TEG com o auxílio de uma Plataforma de Emulação Térmica. Assim, é possível analisar a dinâmica da tensão elétrica efetivamente gerada pelo TEG em diferentes cenários térmicos.

Keywords: Energy Harvesting, Thermal Energy, Semiconductor Thermoelectric Generator, Thermal Patterns Generation.

Palavras-chave: Colheita de Energia, Energia Térmica, Gerador Termoelétrico à Semicondutor, Geração de Padrões Térmicos.

1. INTRODUÇÃO

As energias renováveis são fontes de energia limpa cada vez mais competitivas em relação às tradicionais. Contrariamente aos combustíveis fósseis, as energias renováveis são diversas e possuem potencial para uso em diversos locais do planeta. Além disso, quando em uso, não produzem

gases de efeito estufa. Dessa forma, nos últimos anos, tem-se intensificado a busca por fontes alternativas de energia que apresentem baixo impacto ambiental no processo de geração. Assim, o estudo voltado para fontes renováveis de energia cresceu consideravelmente e parte deste trabalho foi direcionada para a captação de energia presente no ambiente.

* O presente trabalho foi realizado com apoio do PRONEX/FAPESQ-PB/CNPq (N^o 009/2019), do Edital FAPESQ 09/21 DEMANDA UNIVERSAL, Termo N^o 3055/2021, da Chamada N^o 03/2020 Produtividade em Pesquisa PROPESQ/PRPG/UFPB código SIGAA PVK13136-2020, do CNPq, termo N^o 309371/2019-8, do PIBIC/PIBITI da UFPB e pelo PET-Elétrica MEC.

Nesse contexto, surge o conceito de Colheita de Energia (do inglês, *Energy Harvesting*) que corresponde à prática de recuperar energia que está disponível no ambiente, nas formas de luz, calor, movimento, dentre outras, e transformar em energia elétrica (Baroudi et al., 2012)

(dos Santos et al., 2014) a fim de alimentar dispositivos eletrônicos de baixo consumo.

Na Figura 1, é apresentada a estrutura básica de um sistema de Colheita de Energia genérico, que pode ser dividido entre três elementos principais (Souza and Baiocchi, 2018) (Pozo et al., 2019):

- **Transdutor:** elemento conversor de energia de uma fonte primária em energia elétrica;
- **Circuito de Condicionamento de Energia:** circuito regulador da tensão de saída do transdutor em uma tensão adequada para alimentação do dispositivo de baixa potência; e
- **Dispositivo de Armazenamento de Energia:** elemento acumulador de energia para alimentar o dispositivo de destino e/ou armazenar energia excedente (exemplo: supercapacitor ou bateria).

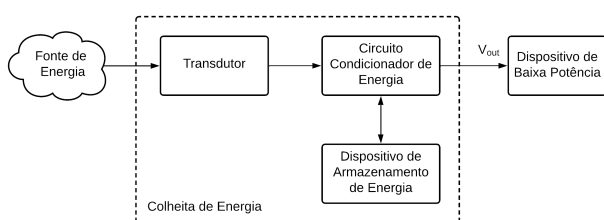


Figura 1. Estrutura básica de um sistema de Colheita de Energia. Fonte: (Souza and Baiocchi, 2018).

Dentre as mais variadas fontes de energia presentes no ambiente, a energia térmica tem se destacado, visto que existem inúmeras atividades do cotidiano que liberam energia em forma de calor, como a reação de combustão presente na maioria dos automóveis e em processos industriais.

Na colheita de energia térmica, um dispositivo transdutor que converte calor diretamente em energia elétrica é o Gerador Termoelétrico à Semicondutor (TEG) que é composto por um conjunto de pares de semicondutores do tipo-*n* e do tipo-*p* conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo entre um par de placas cerâmicas (Ramadass and Chandrakasan, 2010) (Dziurdzia, 2011), como pode ser visto na Figura 2. O calor aplicado através do TEG produz uma diferença de temperatura (ΔT) que gera uma tensão elétrica (V) nos terminais do TEG baseado no efeito Seebeck, em que:

$$V = Se \cdot \Delta T \quad (1)$$

em que Se é o coeficiente de Seebeck.

Uma aplicação de colheita de energia térmica com TEGs é a *Smart Tree*, proposta em Souza et al. (2016), fundamentada na proposição de que a árvore é um organismo vivo e é capaz, portanto, de regular sua temperatura interna, independentemente da temperatura externa. Dessa forma, existe um gradiente térmico entre a temperatura interna da árvore e a temperatura externa (temperatura ambiente). O comportamento do gradiente térmico entre a temperatura interna e a temperatura em torno da árvore pode ser visualizado na Figura 3, em que foi realizada a medição da temperatura interna da árvore à 50mm, 75mm e 100mm de profundidade e a temperatura externa.

Na Figura 3, é possível observar que, durante o dia, a tendência é que a temperatura externa seja mais elevada que

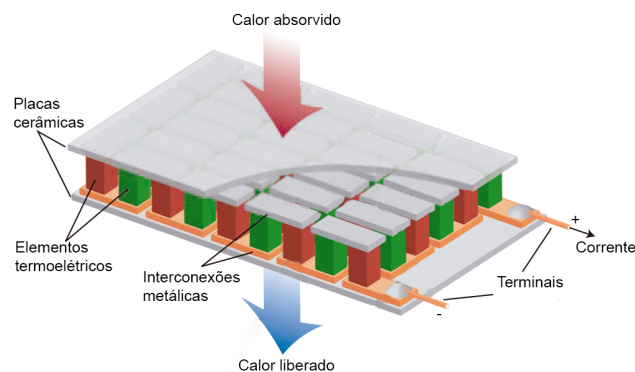


Figura 2. Visualização de um TEG. Fonte: Adaptado de (Snyder and Toberer, 2008).

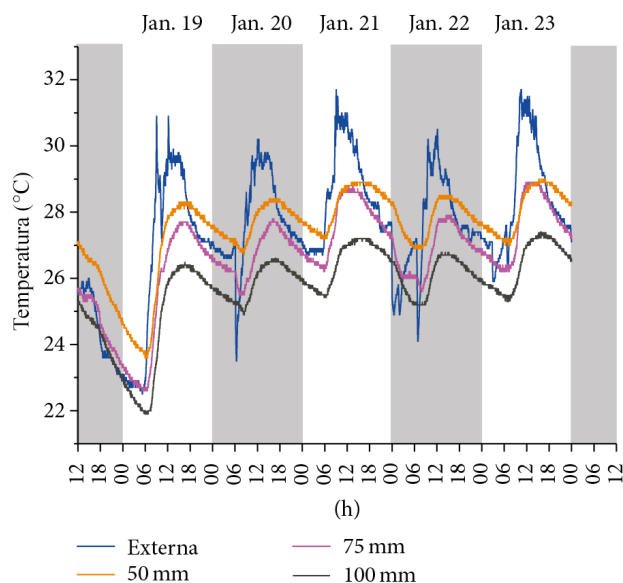


Figura 3. Medição de Temperatura em três profundidades de uma *Smart Tree*: 100mm, 75mm, 50mm e a temperatura externa. Fonte: (Souza et al., 2016).

a temperatura interna da árvore, surgindo um gradiente térmico positivo entre o ambiente e o interior da árvore ($+\Delta T$). Já durante a noite, o gradiente térmico se inverte e a temperatura do ambiente é inferior à temperatura interna da árvore ($-\Delta T$) (Souza et al., 2016). A partir do gradiente térmico existente na árvore, infere-se ser possível gerar energia elétrica suficiente para alimentar um nó sensor, também implementado na árvore, para diversas análises ambientais (Souza et al., 2016).

As aplicações envolvendo colheita de energia térmica não se limitam às árvores, há possibilidade de geração de energia elétrica a partir: do gradiente térmico do corpo humano em relação à temperatura ambiente (Ghosh et al., 2015); de um radiador de aquecimento central para uso doméstico (Lu and Yang, 2010); da diferença de temperatura entre o interior e o exterior da cabine de um avião (Lebahn and Ewald, 2015); e até mesmo de aplicações para redes industriais de sensores sem fio (Hou and Tan, 2016).

Tendo em vista a abundância de ambientes propícios para a colheita da energia térmica, há a necessidade de identificar os cenários que favorecem a geração de energia

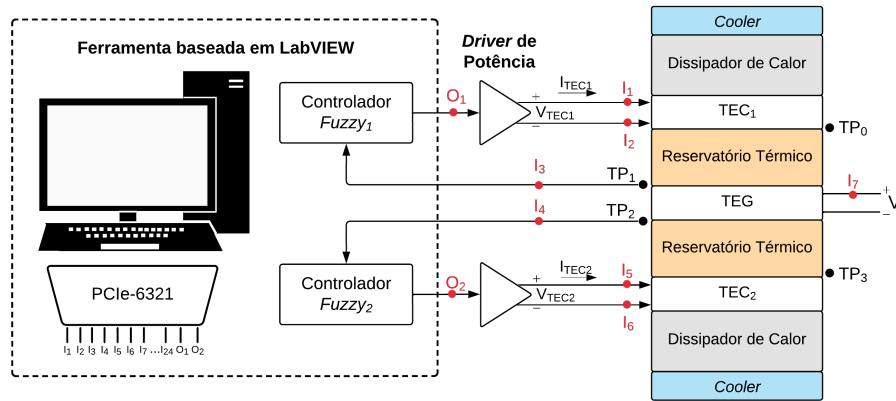


Figura 4. Diagrama de blocos da Plataforma de Emulação Térmica. Fonte: Modificado de (Camboin et al., 2019).

elétrica, seja em ambientes industriais nos quais pode-se observar padrões térmicos descontínuos ou em aplicações como a *Smart Tree* nos quais observa-se um padrão térmico contínuo por exemplo.

Dessa forma, em de Cerqueira Veras et al. (2015), foi proposta uma Plataforma de Emulação Térmica capaz de emular gradientes térmicos e submetê-los a um Gerador Termoelétrico possibilitando, portanto, uma análise da geração de energia do TEG em diversos cenários térmicos. Diante disso, o presente trabalho apresenta um gerador de padrões térmicos desenvolvido utilizando o *software* LabVIEW a fim de auxiliar e otimizar a análise do comportamento do TEG quando submetido a diferentes padrões térmicos pré-determinados na Plataforma de Emulação Térmica.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 é descrita a Plataforma de Emulação Térmica. Na Seção 3, são apresentados os Padrões Térmicos e, na Seção 4, são apresentados os resultados. Por fim, na Seção 5, são apresentadas as conclusões.

2. PLATAFORMA DE EMULAÇÃO TÉRMICA

Uma Plataforma de Emulação Térmica foi apresentada em de Cerqueira Veras et al. (2015) possibilitando a geração de diferenças de temperaturas de até $\pm 20^{\circ}\text{C}$. Na estrutura da plataforma, um TEG se encontra entre duas estruturas simétricas, onde cada uma dessas estruturas é composta um *cooler*, um dissipador de calor, um Refrigerador Termoelétrico (TEC) e um reservatório térmico (Cobre), como pode se observado no diagrama de blocos, na Figura 4. Na Figura 5, é possível visualizar a estrutura física da plataforma.

O sistema de controle da plataforma é baseado no *software* LabVIEW e a plataforma térmica é integrada a um computador pela placa de aquisição PCI-6321 do sistema DAQ da *National Instruments*TM. Assim, na plataforma, é possível determinar a temperatura desejada tanto na face superior do TEG quanto na face inferior (TP_1 e TP_2 , respectivamente). A partir disso, o TEG será submetido a uma diferença de temperatura $\Delta T = TP_1 - TP_2$.

O controle das temperaturas, TP_1 e TP_2 , é realizado por Controladores *Fuzzy* implementados no LabVIEW individualmente para cada TEC. Desta forma, o controlador irá

emitir um sinal de atuação para o TEC de acordo com a temperatura desejada e a temperatura atual do TEC. Em razão da simetria da plataforma, é possível gerar fluxo de calor de cima para baixo, quando TP_1 é maior que TP_2 , e de baixo para cima, quando TP_2 é maior que TP_1 .

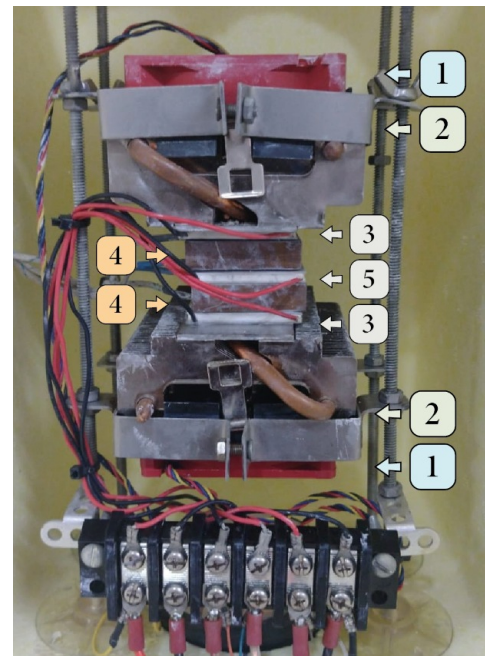


Figura 5. Plataforma de Emulação Térmica. (1) *Coolers*. (2) Dissipador de Calor. (3) TECs. (4) Reservatórios Térmicos. (5) TEG.

Neste trabalho, para integrar à estrutura física da plataforma foi desenvolvido um instrumento virtual, utilizando o *software* LabVIEW, responsável pela aquisição, controle e a visualização das grandezas térmicas e elétricas envolvidas no processo de emulação térmica. Além disso, foi implementado um gerador de padrões térmicos a fim de auxiliar e otimizar a análise do comportamento do TEG.

3. PADRÕES TÉRMICOS

Para a realização da análise do comportamento dos TEGs, foi idealizada a utilização de formas de onda já conhecidas como padrões térmicos de diferença de temperatura a serem submetidas no TEG. Foram escolhidas as quatro

principais formas de onda: Senoidal; Retangular; Triangular; e Dente de serra. Na Figura 6, podem ser vistos os padrões de onda para um determinado ΔT e um período, P .

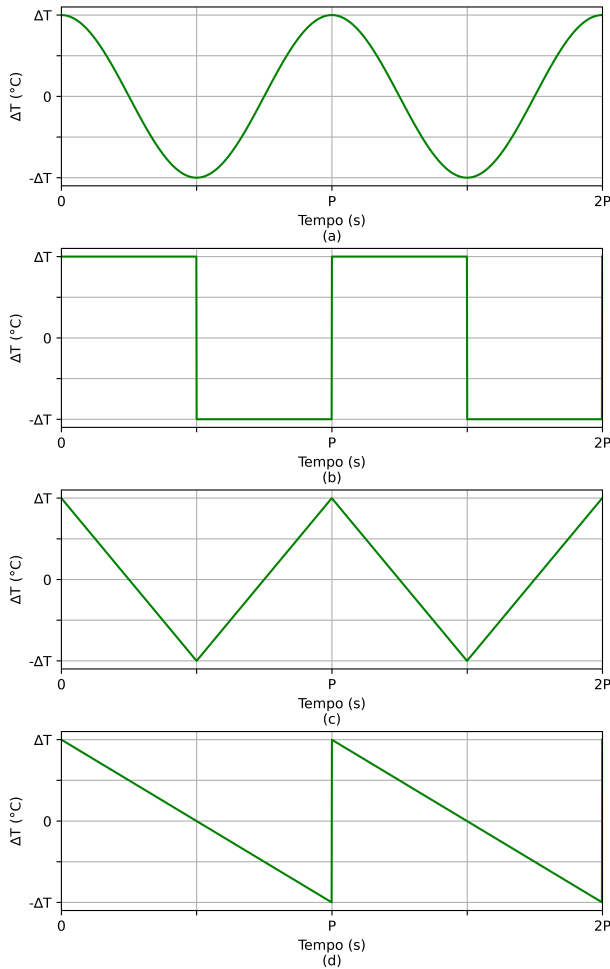


Figura 6. Diferença de temperatura (ΔT) desejada para: (a) Onda senoidal (b) Onda retangular (c) Onda triangular (d) Onda dente de serra.

Tendo em vista que é necessário aplicar diferentes valores de temperatura sob o TEG para que seja obtida a diferença de temperatura nos formatos de onda apresentados na Figura 6, torna-se necessária a geração automática da temperatura a ser submetida no lado superior e no inferior do TEG sob teste. Para alcançar tal feito, é necessário conhecer alguns parâmetros, tais como:

- Forma de onda;
- Temperatura superior (T_{sup});
- Temperatura inferior (T_{inf});
- Período (P);
- Quantidade de ciclos (C).

Com essas informações, infere-se que o ΔT é dado por:

$$\Delta T = T_{sup} - T_{inf} \quad (2)$$

E a Frequência do sinal (f) é obtida a partir da seguinte equação:

$$f = \frac{1}{P} \quad (3)$$

Por fim, temos que o Tempo de emulação corresponde a:

$$tempo = P \cdot C \quad (4)$$

Já para as formas de onda, há uma equação que modela o comportamento de cada uma, ou seja, é possível escrevê-las matematicamente. Para a forma de Onda senoidal, o comportamento da Temperatura Superior e da Temperatura Inferior nas faces do TEG para um ciclo podem ser determinadas pelas expressões:

$$T_{SUP}(t) = \frac{\Delta T}{2} \cdot \cos(2\pi ft) + \frac{T_{sup} + T_{inf}}{2} \quad (5)$$

$$T_{INF}(t) = \frac{\Delta T}{2} \cdot \cos(2\pi ft + \pi) + \frac{T_{sup} + T_{inf}}{2} \quad (6)$$

Para a Onda retangular, as expressões são:

$$T_{SUP}(t) = \begin{cases} T_{sup}, & 0 \leq t < \frac{P}{2} \\ T_{inf}, & \frac{P}{2} \leq t < P \end{cases} \quad (7)$$

$$T_{INF}(t) = \begin{cases} T_{inf}, & 0 \leq t < \frac{P}{2} \\ T_{sup}, & \frac{P}{2} \leq t < P \end{cases} \quad (8)$$

Para a Onda triangular:

$$T_{SUP}(t) = \begin{cases} -\frac{\Delta T}{0,5 \cdot P} \cdot t + T_{sup}, & 0 \leq t < \frac{P}{2} \\ \frac{\Delta T}{0,5 \cdot P} \cdot (t - P/2) + T_{inf}, & \frac{P}{2} \leq t < P \end{cases} \quad (9)$$

$$T_{INF}(t) = \begin{cases} \frac{\Delta T}{0,5 \cdot P} \cdot t + T_{inf}, & 0 \leq t < \frac{P}{2} \\ -\frac{\Delta T}{0,5 \cdot P} \cdot (t - P/2) + T_{sup}, & \frac{P}{2} \leq t < P \end{cases} \quad (10)$$

Por fim, as expressões para um ciclo da Onda dente de serra são:

$$T_{SUP}(t) = -\frac{\Delta T}{P} \cdot t + T_{sup} \quad (11)$$

$$T_{INF}(t) = \frac{\Delta T}{P} \cdot t + T_{inf} \quad (12)$$

Assim, para otimizar o processo de geração de padrões térmicos foi desenvolvido um instrumento virtual (Figura 7) que está programado para:

- (1) O usuário selecionar um dos quatro tipos de padrões térmicos: Onda senoidal, triangular, retangular ou dente de serra;
- (2) O usuário definir valores para Período e Quantidade de ciclos correspondentes às características do padrão térmico a ser emulado;
- (3) O programa calcular a Frequência e o Tempo de emulação;
- (4) O usuário definir os valores iniciais para Temperatura superior (T_{sup}) e Temperatura inferior (T_{inf}) e, assim, o programa calcular o ΔT ;
- (5) O programa gerar os valores de temperatura a serem emulados na face superior e inferior do TEG;

(6) Os Controladores *Fuzzy* atuarem de modo a igualar temperatura nas faces do TEC com a temperatura emulada.

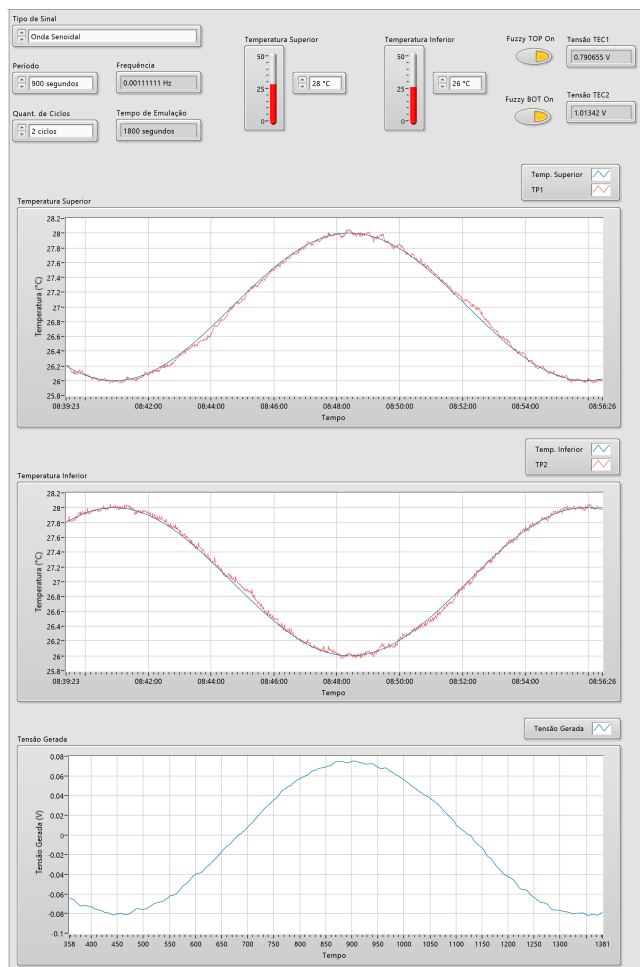


Figura 7. Tela principal do instrumento virtual desenvolvido em LabVIEW.

4. RESULTADOS

Para analisar o comportamento do TEG quando submetido aos diferentes padrões térmicos Onda senoidal, retangular, triangular e dente de serra pré-definidos, foram escolhidos parâmetros a serem seguidos, apresentados na Tabela 1. Os parâmetros foram escolhidos tendo em vista a temperatura ambiente média em João Pessoa, Paraíba, Brasil durante a realização das emulações (27 °C) e o elevado tempo de estabilização térmico.

Tabela 1. Parâmetros dos padrões térmicos

Temperatura superior	28 °C
Temperatura inferior	26 °C
ΔT	2 °C
Período	900s
Frequência	0,0011Hz
Quantidade de ciclos	2 ciclos

Cada padrão térmico apresenta um tempo de emulação de 1800s (30min). Os padrões térmicos estão representados na Figura 8, nos quais as curvas vermelhas correspondem à temperatura desejada na face superior do TEG (TP_1) e

as curvas azuis correspondem à temperatura desejada na face inferior do TEG (TP_2).

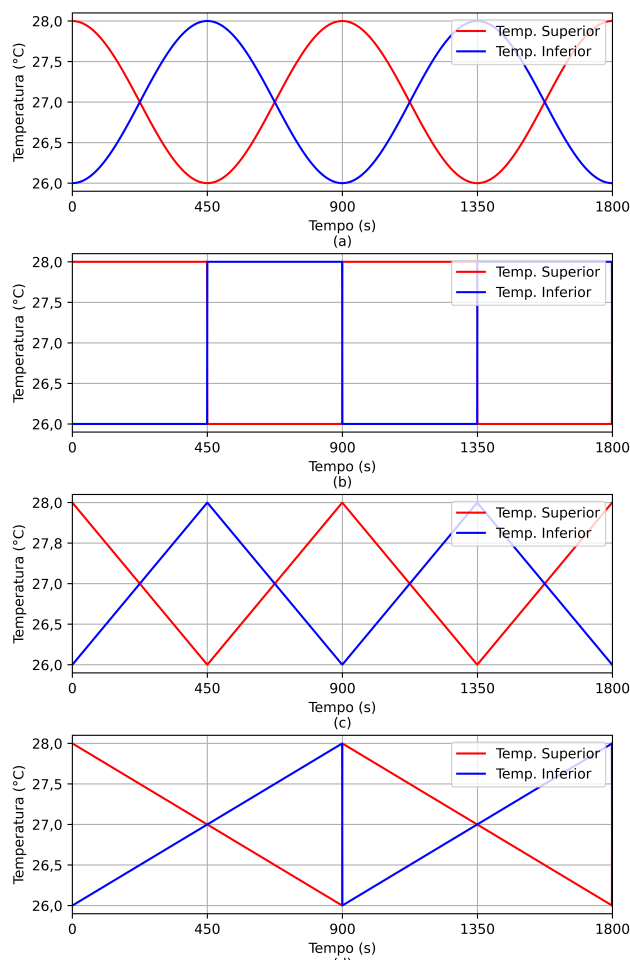


Figura 8. Padrões térmicos: (a) Senoidal (b) Retangular (c) Triangular (d) Dente de serra.

Os padrões térmicos foram emulados na Plataforma de Emulação Térmica. Na Figura 9, é apresentada a Temperatura superior e inferior para a Onda senoidal. Na Figura 10, é apresentada a Temperatura superior e inferior para a Onda triangular.

Nas Figuras 9 e 10, as curvas pretas correspondem aos valores de temperatura desejados e as curvas em vermelho e em azul tratam-se dos valores reais das temperaturas na face superior e inferior do TEG, respectivamente. Ainda observando as Figuras 9 e 10, é possível perceber que as curvas reais seguem com bastante precisão a curva de temperatura desejada (na cor preta), com discreta imprecisão nos primeiros 1,5s; este comportamento decorre da diferença entre a temperatura ambiente e as temperaturas TP_1 e TP_2 , ainda que o controlador esteja atuando para que seja alcançada a temperatura desejada. As curvas de temperatura para a Onda retangular e Onda dente de serra podem ser observadas nas Figuras 11 e 12, respectivamente.

Para comparação entre os valores reais de temperatura, tanto na face superior (TP_1) quanto na inferior (TP_2), com os valores desejados, foi calculada a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE):

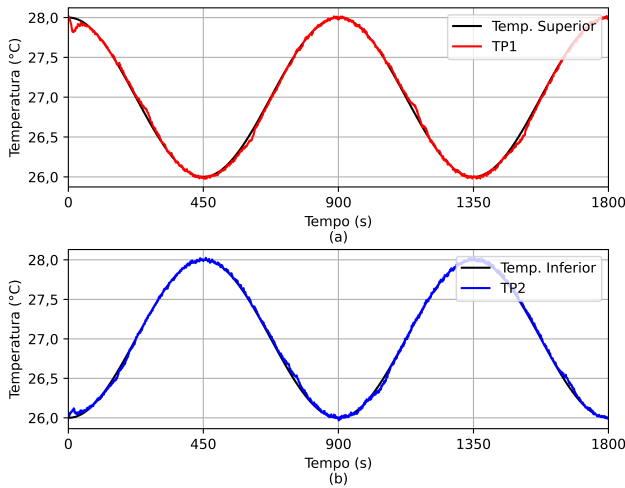


Figura 9. Curvas de temperatura para Onda senoidal: (a) Face superior do TEG (b) Face inferior do TEG.

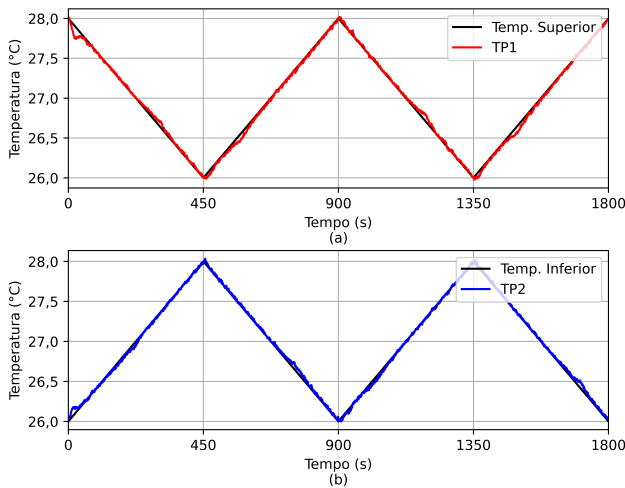


Figura 10. Curvas de temperatura para Onda triangular: (a) Face superior do TEG (b) Face inferior do TEG.

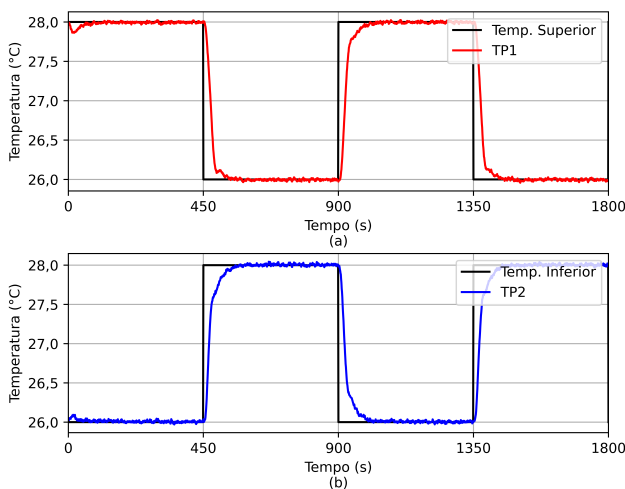


Figura 11. Curvas de temperatura para Onda retangular: (a) Face superior do TEG (b) Face inferior do TEG.

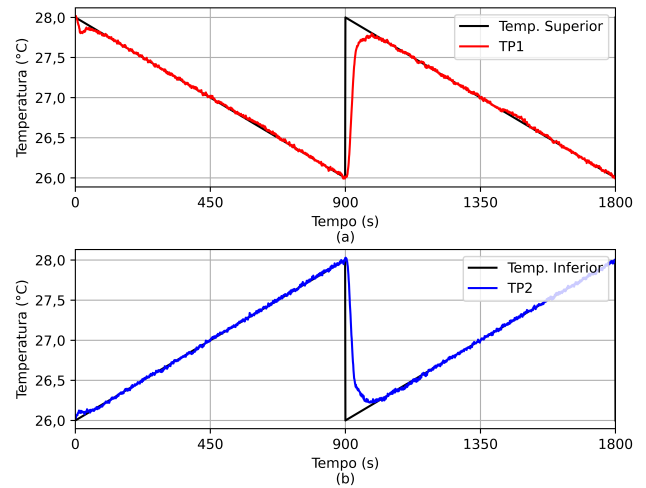


Figura 12. Curvas de temperatura para Onda dente de serra: (a) Face superior do TEG (b) Face inferior do TEG.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (TempEmulada_i - TempReal_i)^2}{N}} \quad (13)$$

na qual $TempEmulada$ representa a temperatura desejada em uma das faces do TEG e a $TempReal$, o valor de temperatura obtido na plataforma.

Na Tabela 2, são mostrados os resultados alcançados para os valores de RMSE de cada padrão térmico. A partir desses resultados, nota-se que valores de RMSE mínimos foram atingidos nas formas de onda contínuas, Senoidal e Triangular. Já para as formas de onda descontínuas, Onda retangular e dente de serra, é visível que os valores obtidos de RMSE sejam superiores devido aos choques térmicos em degrau.

Tabela 2. RMSE dos padrões térmicos

	Temp. superior	Temp. inferior
Onda senoidal	0,0332 °C	0,0274 °C
Onda triangular	0,0311 °C	0,0249 °C
Onda retangular	0,3594 °C	0,3378 °C
Onda dente de serra	0,2074 °C	0,2019 °C

Além disso, como o TEG está submetido a uma diferença de temperatura, consequentemente, gerando uma tensão elétrica nos seus terminais. Assim, na Figura 13 são apresentados os valores da tensão gerada para diferentes padrões térmicos emulados.

Na Tabela 3, há os valores de tensão máxima e mínima, em volts, para cada uma das ondas. Os valores de tensão negativos são normais e esperados quando a temperatura de TP_2 é superior à temperatura de TP_1 .

Tabela 3. Tensão gerada

	Tensão máxima	Tensão mínima
Onda senoidal	0,0731 V	-0,0826 V
Onda triangular	0,0734 V	-0,0837 V
Onda retangular	0,0746 V	-0,0828 V
Onda dente de serra	0,0704 V	-0,0844 V

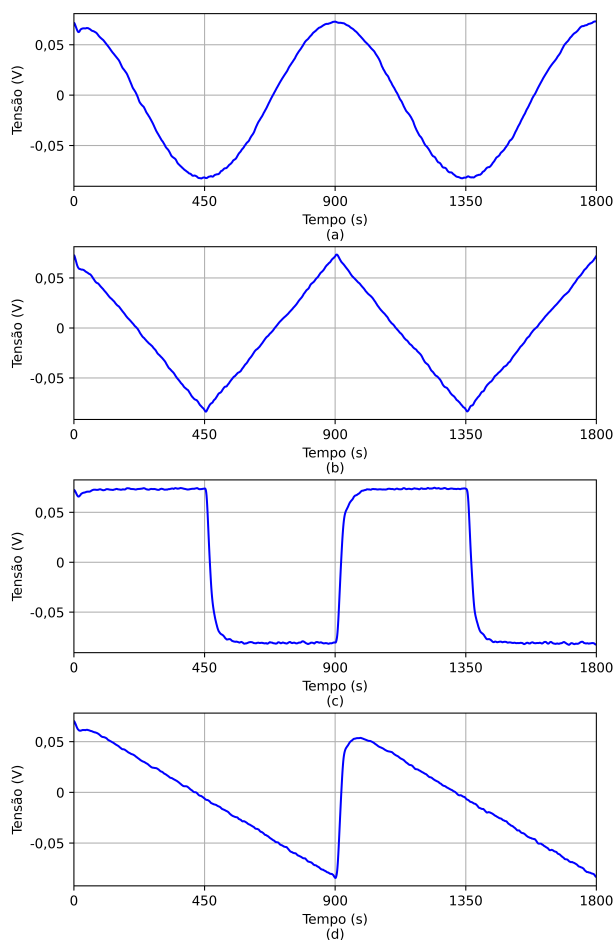


Figura 13. Tensão gerada da forma de onda: (a) Senoidal (b) Triangular (c) Retangular (d) Dente de serra.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, um gerador de padrões térmicos integrado a uma Plataforma de Emulação Térmica foi apresentado. O gerador de padrões térmicos foi desenvolvido utilizando o *software* LabVIEW, possibilitando a geração de padrões em diferentes formas de onda. Por conseguinte, foi possível visualizar o comportamento de um Gerador Termoelétrico à Semicondutor, tanto em relação à temperatura em ambas as suas faces quanto à tensão gerada, quando submetido a padrões térmicos contínuos ou descontínuos.

REFERÊNCIAS

Baroudi, U., Qureshi, A.u.d., Mekid, S., and Bouhraoua, A. (2012). Radio frequency energy harvesting characterization: An experimental study. In *2012 IEEE 11th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications*, 1976–1981. doi:10.1109/TrustCom.2012.231.

Camboin, M.M., Baiocchi, O., Rodrigues Villarim, A.W., Cavalcanti Catunda, S.Y., de Souza, C.P., and Da Silva Moreira, C. (2019). An automatic emulation system for environmental thermal energy harvesting. In *2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 1–6. doi:10.1109/I2MTC.2019.8827004.

de Cerqueira Veras, J.C., de Cerqueira Veras, J.C., Albuquerque Vieira, D., Melo, E.C.S., and Protásio de Souza, C. (2015). An automatic thermal cycling based test platform for thermoelectric generator testing. In *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 1949–1953. doi:10.1109/I2MTC.2015.7151580.

dos Santos, M.P., Vieira, D.A., Rodriguez, Y.P.M., Souza, C.P.d., Moraes, T.O.d., and Freire, R.C.S. (2014). Energy harvesting using magnetic induction considering different core materials. In *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 942–944. doi:10.1109/I2MTC.2014.6860881.

Dziurdzia, P. (2011). *Modeling and Simulation of Thermoelectric Energy Harvesting Processes*. doi:10.5772/28530.

Ghosh, A., Meenakshi, Khalid, S., and Harigovindan, V.P. (2015). Performance analysis of wireless body area network with thermal energy harvesting. In *2015 Global Conference on Communication Technologies (GCCT)*, 916–920. doi:10.1109/GCCT.2015.7342795.

Hou, L. and Tan, S. (2016). A preliminary study of thermal energy harvesting for industrial wireless sensor networks. In *2016 10th International Conference on Sensing Technology (ICST)*, 1–5. doi:10.1109/ICST.2016.7796283.

Lebahn, F. and Ewald, H. (2015). Using atmospheric temperature variations for thermal energy harvesting for wireless sensors. In *2015 9th International Conference on Sensing Technology (ICST)*, 133–137. doi:10.1109/ICST.2015.7438378.

Lu, X. and Yang, S.H. (2010). Thermal energy harvesting for wsns. 3045 – 3052. doi:10.1109/ICSMC.2010.5641673.

Pozo, B., Garate, J.I., Araujo, J., and Ferreira, S. (2019). Energy harvesting technologies and equivalent electronic structural models review. *Electronics*, 8(5). doi:10.3390/electronics8050486. URL <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/5/486>.

Ramadass, Y.K. and Chandrakasan, A.P. (2010). A batteryless thermoelectric energy-harvesting interface circuit with 35mv startup voltage. In *2010 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC)*, 486–487. doi:10.1109/ISSCC.2010.5433835.

Snyder, G. and Toberer, E. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature materials*, 7, 105–14. doi:10.1038/nmat2090.

Souza, C. and Baiocchi, O. (2018). *Energy Resources in Agriculture and Forestry: How to be Prepared for the Internet of Things (IoT) Revolution*. doi:10.5772/intechopen.74940.

Souza, C.P., Carvalho, F.B.S., Silva, F.A.N., Andrade, H.A., Silva, N.d.V., Baiocchi, O., and Muller, I. (2016). On harvesting energy from tree trunks for environmental monitoring. *Int. J. Distrib. Sen. Netw.*, 2016, 11. doi:10.1155/2016/9383765. URL <https://doi.org/10.1155/2016/9383765>.