



Estudio de casos



# Modelado de sistemas termoelectricos para la recolección energética en ambientes biológicos

## *Modeling of thermoelectric systems for energy harvesting in biological environments*

Martha Alexandra Gómez Caraveo<sup>1</sup> , Sharon Ezrre González<sup>2</sup> , José Alejandro Amézquita García<sup>1</sup>   
, Heriberto Márquez Becerra<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

<sup>2</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

<sup>3</sup>Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México

**Autor de correspondencia:** Sharon Ezrre González, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México. Correo electrónico: [sharon.ezrre@uabc.edu.mx](mailto:sharon.ezrre@uabc.edu.mx). ORCID: 0000-0002-3609-4470.

**Enviado:** 29 de Agosto del 2023

**Aceptado:** 25 de Octubre del 2023

**Publicado:** 13 de Noviembre del 2023

**Resumen.** - En los últimos años la tendencia en el desarrollo emergente de biosensores autónomos y portátiles han propiciado la búsqueda de nuevos materiales, además del diseño de nuevas estructuras que generen su propia energía de manera eficiente y con alto rendimiento para asegurar el suministro energético a largo plazo, eliminando el uso de baterías externas. De los materiales más estudiados encontramos a los triboeléctricos, piezoeléctricos, termoelectricos y piroeléctricos, materiales que han tenido mayor biocompatibilidad con los parámetros fisiológicos del cuerpo humano para la generación de energía. En este trabajo se propone ilustrar el proceso sistemático en un software de simulación de elementos finitos del material triteluro de dibismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), considerado como uno de los más eficientes en la generación de energía termoelectrica. Las simulaciones implementadas en COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, demuestran la correlación entre el diseño físico-mecánico de las estructuras y la eficiencia energética, permitiendo la determinación de las características y parámetros esenciales para su futura fabricación. Los resultados demuestran que, con un número mayor de termopares, incluso cuando las dimensiones son inferiores tomando como referencia la temperatura superficial del cuerpo humano, aumenta la potencia generada de las estructuras evaluadas.

**Palabras clave:** Biosensores; Análisis de elemento finito; Bioenergía; Termogeneradores de energía; Simulación FEM.

**Abstract.** – In recent years, the trend in the emerging development of autonomous and portable biosensors has led to the search for new materials, as well as the design of new structures that can efficiently generate their own energy with high performance to ensure long-term energy supply, eliminating the use of external sources. Among the most studied are triboelectric, piezoelectric, thermoelectric, and pyroelectric materials, which have shown greater biocompatibility with the physiological parameters of the human body for energy harvesting. This paper proposes to illustrate the systematic process in a finite element simulation software of the bismuth telluride ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) material, considered one of the most efficient in thermoelectric energy generation. Simulations implemented in COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> demonstrate the correlation between the physical-mechanical design of the structures and energy efficiency, allowing the determination of the crucial features and parameters for future development. The results demonstrate the power generated by the material according to the surface temperature gradient of the human body for each of the designed structures.

**Keywords:** Biosensors; Finite element method; Bioenergy; Energy thermogenerator; FEM simulation.



## 1. Introducción

Actualmente, es bien conocido que el mundo requiere más que nunca energía limpia, además de medios eficientes para manejarla, existen múltiples estrategias para producirla desde métodos clásicos como sistemas aerogeneradores [1], sistemas fotovoltaicos [2], incluso sistemas hidroeléctricos que nos brindan energía a gran escala [3]. Sin embargo, en las últimas décadas se ha buscado obtener o encontrar formas de recolectar energía a pequeña escala [4-10]. Con el avance y desarrollo de la electrónica se han creado sistemas más eficientes, es decir, sistemas que ahorran y aprovechan la energía de una mejor forma, llegando a la construcción de sistemas de ultra-bajo consumo [11-12]. Se sabe que la energía encontrada en el ambiente puede ser recolectada, bajo este principio se han desarrollado las estrategias antes mencionadas, de igual forma ha habido un avance significativo en el desarrollo de materiales que transforman otros tipos de energía en energía eléctrica, desde materiales termoeléctricos, piroeléctricos, triboeléctricos, piezoeléctricos, entre otros. En este sentido, el estudio de nuevas formas de generación de energía se encuentra apoyándose de sistemas de simulación como COMSOL Multiphysics® que permiten modelar los materiales, los ambientes y las condiciones que propician la conversión energética, es decir, la física que rige el comportamiento de estos materiales, donde es posible modelar materiales generadores de energía y su eficiencia en ambientes y condiciones específicas. El uso de este tipo de programas se ve reflejado en múltiples estudios [13-17] donde se plantea el diseño de estos dispositivos y su evaluación teórica, para su posterior fabricación.

En este trabajo se plantea proyectar la forma y las consideraciones que deben tenerse en cuenta para generar una simulación válida para sistemas generadores de energía termoeléctrica (TEG). Los parámetros que se evaluarán serán la

eficiencia energética considerando diferentes gradientes de temperatura ( $\Delta T$ ) de acuerdo a la temperatura corporal normal de 37 °C, en dos estructuras TEG convencionales con un área de 1 cm<sup>2</sup>: un TEG con termopares a escala milimétrica y otro con termopares a escala micrométrica, con una forma estructural y escala definida para su posible fabricación y uso en sistemas portables.

El principal objetivo es poder ver las implicaciones en la generación de energía, comparar y consolidar el conocimiento que se tiene de estos dispositivos con otras investigaciones, además de desarrollar la descripción metódica de la simulación de los sistemas generadores de energía del tipo TEG.

## 1. Estado del arte

La generación de energía eléctrica por medio de la diferencia de calor entre los materiales semiconductores de un TEG, es una herramienta en constante desarrollo donde podemos encontrar diversos tipos de diseños estructurales. Los termogeneradores utilizados para sistemas biológicos, en específico, aquellos que utilizan la temperatura corporal como fuente de calor, han sido estudiados y probados por diversos autores que demuestran su uso y factibilidad, al evaluar su portabilidad y eficiencia energética [18-21]. En [22] simularon y fabricaron un termogenerador de telururo de bismuto portable, utilizado en la palma de la mano del cuerpo humano, evaluaron diversos parámetros que podrían influir directamente en la generación de energía, probando que los termogeneradores pueden ser aplicados en partes estratégicas del cuerpo humano para una máxima generación de energía eléctrica. En [23] simularon un termogenerador en forma de anillo con distintos materiales como el Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, seleniuro de bismuto (Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>) y telururo de antimonio (Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>), mostrando que el Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, es de los materiales que muestran mejores resultados en la generación de



energía. El diseño de estructuras de este tipo de materiales es clave en este campo de investigación. En [24], evaluaron y compararon la longitud y espesor de las aletas del material  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , integrado en el diseño del TEG, obteniendo como resultado una mayor eficiencia energética, cuando se aumenta la longitud de las piernas dentro de la estructura. Los materiales tipo-N y tipo-P en la integración de los TEG son una parte fundamental del funcionamiento, por lo que la modificación de la estructura de estos influye en la eficiencia energética, tal y como describen en [25], donde el análisis demostró que la distribución de los materiales influye en la dispersión del calor, así como otros parámetros en los TEG son afectados por el tipo de estructura implementada.

### 2.1 Funcionamiento de un generador termoeléctrico (TEG)

La generación de energía termoeléctrica es descrita por el fenómeno Seebeck el cual se

describe como una fuerza electromotora que se genera a lo largo de un dominio conductor cuando existe un gradiente de temperatura, produciendo un voltaje eléctrico [26].

Más en específico, de acuerdo a la figura 1, al existir un gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ) a través de un termopar conformado por materiales semiconductores tipo-N y tipo-P conectados en serie por un conductor eléctrico, y confinados entre dos placas térmicas que funcionan como aislante eléctrico, donde a la placa superior es expuesta a una fuente de calor ( $T_C$ ), y la inferior a una fuente frío ( $T_F$ ), ocurre el movimiento de electrones de un extremo a otro a lo largo de las columnas tipo-N y tipo-P, específicamente, del extremo caliente al extremo frío [26]. Este efecto crea electrodos positivos y negativos que generan una diferencia de potencial ( $\Delta V$ ), que produce una potencia eléctrica ( $P$ ) proporcional al flujo de corriente ( $I$ ), generado por la resistencia de carga ( $R_L$ ).

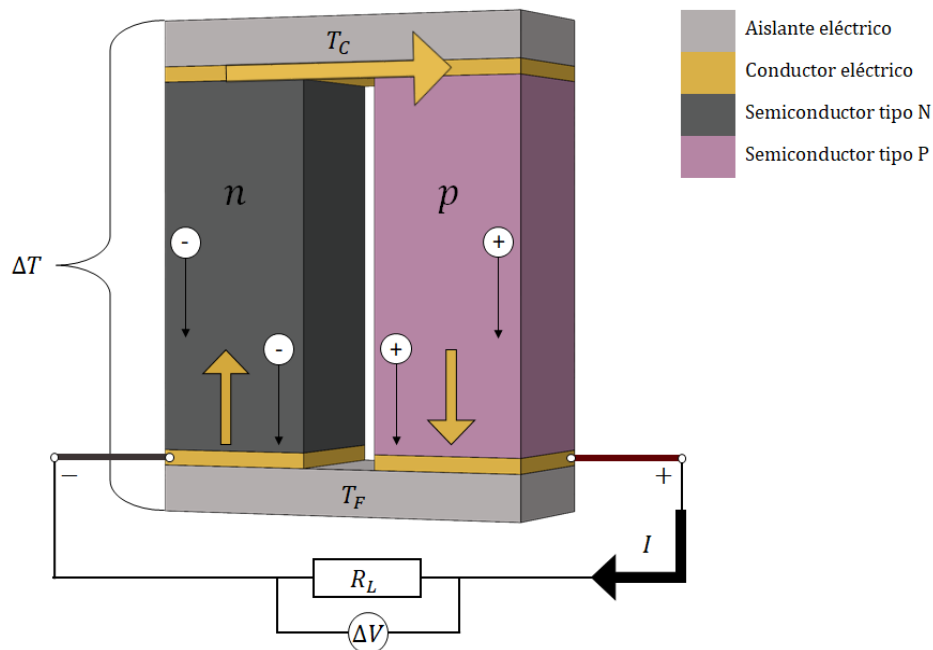


Figura 1. Principio de funcionamiento de un termopar TEG.



El valor de la potencia eléctrica suministrada en ( $R_L$ ) está dada por la ecuación (1),

$$P = I^2 R_L \quad (1)$$

Considerando la contribución de los materiales, contactos, electrodos y cables, además de la resistencia interna del módulo TEG ( $R_\Omega$ ), la corriente se determina con la ecuación (2)

$$I = \frac{2N|S|(T_C - T_f)}{R_\Omega + R_L} \quad (2)$$

que al sustituirse en la ec. (1), la potencia eléctrica se convierte en la ecuación (3),

$$P = \frac{[2N|S|(T_C - T_f)]^2}{R_\Omega} \cdot \frac{m}{(1+m)^2} \quad (3)$$

donde,  $N$ , es el número de termopares que conforman al módulo TEG,  $S$ , es el coeficiente de Seebeck, y el parámetro  $m$  es,  $m = R_L / R_\Omega$ , el cual nos dice que la potencia máxima ( $P_{max}$ ) del TEG se obtiene cuando  $m = 1$ , esto es que,  $R_L = R_\Omega$  [26, 27].

La eficiencia de conversión ( $\eta$ ) de un TEG se presenta en la ecuación (4) y se define como la razón entre la  $P$  y el calor absorbido sobre la fuente de calor ( $Q_C$ ), definido como en la ecuación (5),

$$\eta = \frac{P}{Q_C} \quad (4)$$

$$Q_C = N[ST_C I - \frac{1}{2} I^2 R_\Omega + K(T_C - T_F)] \quad (5)$$

donde,  $K$ , es la conductividad termal.

Sustituyendo la ecuación (3) y ecuación (5) en la ecuación (4) y diferenciando  $\eta$  con respecto a la razón  $R_L / R_\Omega = \sqrt{1 + ZT}$  obtenemos la máxima eficiencia de conversión ( $\eta_{max}$ ) en la ecuación (6),

$$\eta_{max} = \frac{T_C - T_F}{T_C} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_F}{T_C}} \quad (6)$$

donde,  $ZT$ , es la figura de mérito adimensional [8].

## 2. Metodología, simulación numérica de un TEG

La figura 2 presenta el modelo CAD de un termopar de columnas de  $Bi_2Te_3$ , una tipo-N y una tipo-P conectadas eléctricamente en serie, por un electrodo de cobre y térmicamente en paralelo, por placas de tungsteno que funcionan como aislante eléctrico.

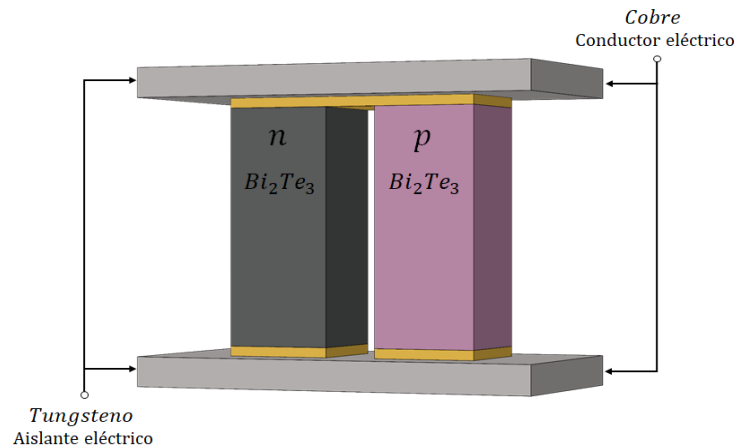
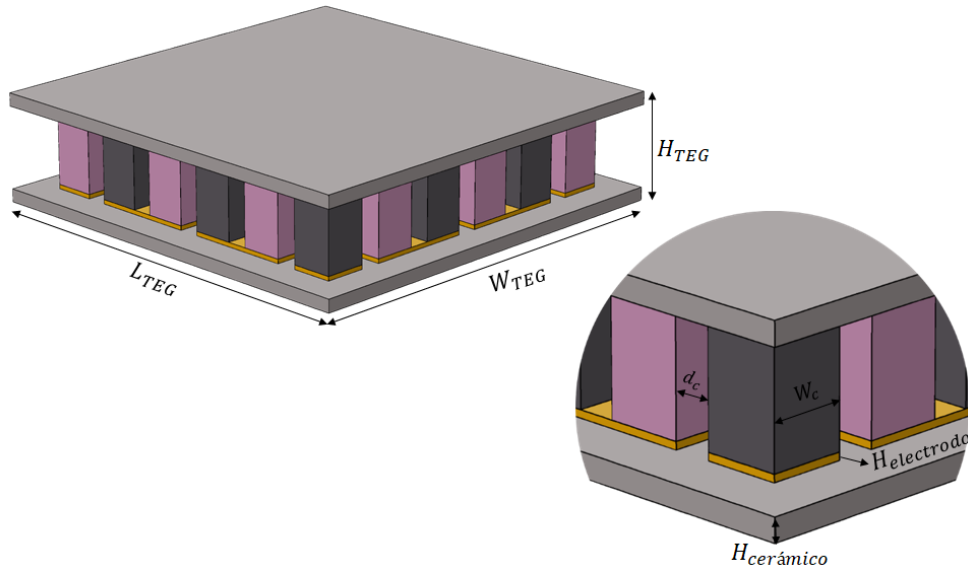


Figura 2. Modelo CAD de un termopar.



Para la simulación se diseñaron dos estructuras TEG de 1 cm<sup>2</sup> conformadas por un número n de termopares de acuerdo al área transversal de las columnas, para el primer TEG de 1 mm<sup>2</sup>, y para

el segundo TEG de 250 μm<sup>2</sup>. La figura 3 presenta los parámetros físicos descritos a detalle en la Tabla 1 para el TEG (mm) y el TEG (μm).



**Figura 3.** Diagrama de los parámetros físicos para el diseño del TEG (mm) y TEG (μm).

**Tabla 1.** Características de las estructuras simuladas.

Variable	TEG (mm)	TEG (μm)
Altura del TEG ( $H_{TEG}$ )	2.5 mm	500 μm
Ancho y espesor del TEG ( $W_{TEG}$ , $L_{TEG}$ )	1 cm	1 cm
Área transversal de una columna del termopar ( $W_c$ )	1 mm <sup>2</sup>	250 μm <sup>2</sup>
Distancia entre columnas ( $d_c$ )	0.5 mm	200 μm
Altura del electrodo ( $H_{electrodo}$ )	100 μm	30 μm
altura del cerámico ( $H_{cerámico}$ )	0.3 mm	100 μm

Las propiedades de los materiales termoeléctricos se definieron desde la librería de

COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, los cuales se presentan en la tabla 2.



Tabla 2. Propiedades de los materiales.

Parámetro	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> tipo-N	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> tipo-P	Cobre	Tungsteno
Capacidad de calor (J/(Kg•K))	154	154	385	132
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	7700	7700	8960	17800
conductividad térmica (W/(m•K))	k(T)	k(T)	400	175
Conductividad eléctrica (S/m)	$\sigma(T)$	$\sigma(T)$	$5.998 \times 10^7$	-
coeficiente de Seebeck (V/K)	S(T)	-S(T)	$6.5 \times 10^{-6}$	-
permitividad relativa	1	1	1	-

### 3.1 Ecuaciones de gobierno

El efecto termoeléctrico es la conversión directa de diferencias térmicas a voltaje eléctrico o viceversa. En COMSOL Multiphysics®, la interfase de efecto termoeléctrico, combina las interfaces de transferencia de calor en sólidos (ht) y corrientes eléctricas (ec) para modelar los efectos Peltier-Seebeck-Thomson.

En específico, de acuerdo al diagrama de la figura 4, las características térmicas se obtienen por medio del módulo ht donde se define una diferencia de temperaturas, que genera una corriente eléctrica aislada definida por el módulo “ec” cuyo valor se determina por un circuito eléctrico de acondicionamiento [28, 29].

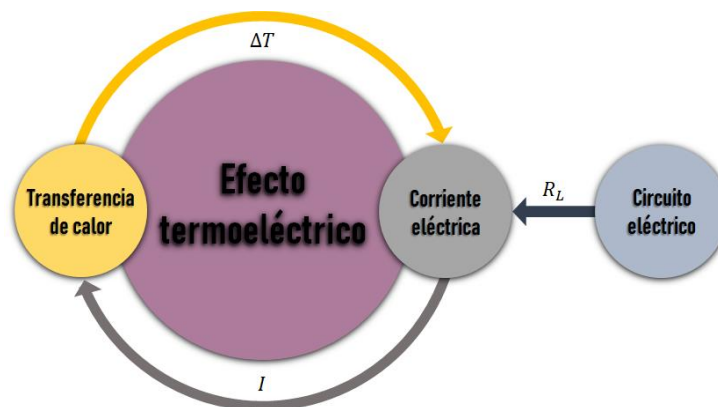


Figura 4. Diagrama de bloques del modelo físico de COMSOL Multiphysics® para la simulación del efecto termoeléctrico.



Este efecto se encuentra gobernado por la forma diferencial de la ecuación de transferencia de calor y, la densidad de corriente continua.

La ecuación de transferencia de calor se utiliza para modelar el balance de energía en un sólido el cual se origina de las contribuciones de conducción, convección, y radiación, la cual se define como en ecuación (7),

$$\rho C_p \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (7)$$

donde,  $\rho$  es la densidad,  $C_p$  es la capacidad de calor,  $q$  es el vector flujo de calor y  $Q$  es la fuente de calor de Joule.

Para manejar las corrientes en el medio conductor en un material isotrópico, la ecuación de continuidad (8),

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (8)$$

donde,  $J$ , es el vector de la densidad de corriente eléctrica establecida.

El fenómeno termoeléctrico es acoplado mediante la contribución del efecto Seebeck definido en la ecuación (9),

$$J_{se} = -\sigma \nabla T \quad (9)$$

donde,  $\sigma$ , es la conductividad eléctrica.

El vector de densidad del flujo de calor,  $q$ , definido por la ley de Fourier, se modifica de acuerdo a la contribución  $PJ$  de la forma en ecuación (10),

$$q = -k \nabla T + PJ \quad (10)$$

donde, el primer término representa la conducción de calor en la estructura, mientras que el segundo término representa la relación lineal entre el campo eléctrico y el gradiente de

temperatura debido a la contribución de una corriente externa definida por el efecto Seebeck que modifica el vector de la densidad de corriente,  $J$ , definido por la ley de Ohm, de la forma en la ecuación (11),

$$J = \sigma E + J_{se} = -\sigma(\nabla V + S \nabla T) \quad (11)$$

donde,  $k$  es la conductividad termal,  $P$  es el coeficiente de Peltier, y  $E$  es el campo eléctrico descrito por la función potencial de la ecuación (12).

$$E = -\nabla V \quad (12)$$

Sustituyendo la ec. (10) y ec. (11) en ec. (7) y ec. (8) se produce el sistema de ecuaciones parciales acopladas que describen fenómeno termoeléctrico en un sistema isotrópico conformado por la ecuación (13) y (14).

$$\rho C_p \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T + \sigma P (\nabla V + S \nabla T)) = Q \quad (13)$$

$$-\nabla \cdot (\nabla V + S \nabla T) = 0 \quad (14)$$

Como consecuencia se genera un gradiente de voltaje a lo largo de cada uno de los elementos termoeléctricos cuya intensidad se relaciona con la potencia de consumo de la fuente de calor superficial de Joule de acuerdo al campo eléctrico de Seebeck en la ecuación (15).

$$Q = J \cdot E \quad (15)$$

Las ec. (7), ec. (8), y el sistema de ecuaciones formado por la ec. (13) y ec. (14), constituyen la formulación fuerte que representa las condiciones de frontera iniciales del sistema. Cuando las condiciones iniciales son definidas de manera precisa, COMSOL Multiphysics® emplea el Método de Elementos Finitos (FEM) para analizar la distribución de temperatura, voltaje y flujos en el dominio ( $\Omega$ ) definido por un número  $n$  de elementos finitos [30]. Mediante la



formulación débil de Galerkin [31], el sistema de ecuaciones parciales se transforma a un sistema de ecuaciones integrales que plantea funciones base aplicadas en cada uno de los elementos para encontrar la aproximación a la solución numérica mediante la resolución de un sistema lineal representado de forma general en la ec. (16),

$$\begin{bmatrix} C_T & 0 \\ 0 & C_E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T^2}{\partial x} \\ \frac{\partial V^2}{\partial x} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_T & 0 \\ K_{TE} & K_E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T^e \\ V^e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ I \end{Bmatrix} \quad (16)$$

donde, las submatrices  $K_T$ ,  $K_{TE}$  y  $K_E$ , llevan a la solución de temperaturas y potenciales eléctricos en la forma de flujo de calor y corrientes eléctricas, respectivamente.

### 3.2 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se definieron de acuerdo a la figura 5. Para el módulo “ht”, la

superficie de la placa superior de tungsteno fue definida como la fuente de calor ( $T_C$ ), donde la temperatura se mantuvo constante de acuerdo al valor de la temperatura superficial de la piel  $T_0 = 310.15$  °K. La superficie de la placa inferior se definió como la superficie fría ( $T_F$ ) con un valor calculado de acuerdo a  $\Delta T$ . El resto de las superficies se definieron como superficies aislantes de calor. Para el módulo “ec” las columnas de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  tipo-N y tipo-P se conectaron en serie mediante los electrodos de cobre. La superficie inferior de los electrodos conectados a los extremos de las columnas se definió con un potencial  $V=0$  donde el electrodo de la columna tipo-P se conectó a tierra, mientras que el tipo n se conectó a una terminal, ambos unidos por un circuito eléctrico “ec” de acondicionamiento con una resistencia  $R_L$ . El resto de las superficies eléctricas se definieron como superficies aislantes de electricidad.

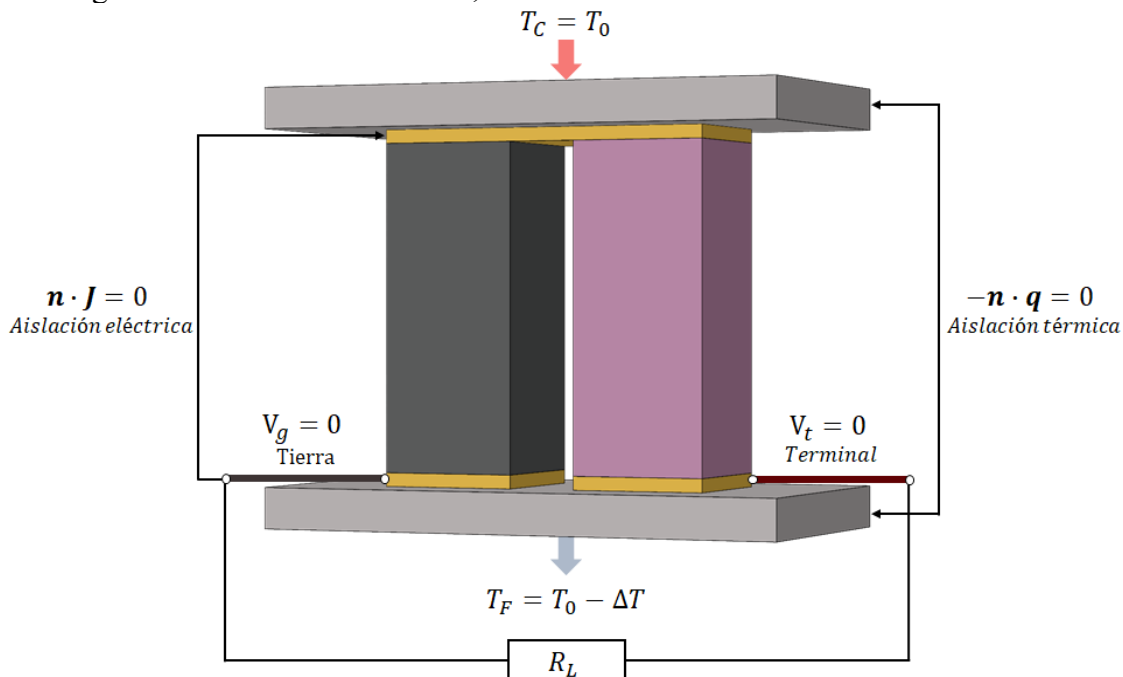


Figura 5. Condiciones de frontera.





### 3.4 Mallado

Debido a que cada uno de los elementos que conforman a los TEG diseñados cuentan con secciones transversales constantes, para cada uno de ellos se generó un mallado cuadrangular. En específico, las superficies de los electrodos que conectan las columnas se definieron como superficies de origen para las cuales se generó una malla tipo mapeo, mientras que las superficies de las placas de tungsteno que conectan a los electrodos se definieron como superficies definidas con una malla tipo

cuadrangular libre. Finalmente, para cada dominio se generó una malla tipo swept.

### 3.5 Estudio de COMSOL

Para el modelado del efecto termoeléctrico, se definió un estudio estacionario paramétrico con el cual se evaluó la generación de energía termoeléctrica de acuerdo a una diferencia de temperatura  $\Delta T$  con una resistencia de carga variable  $R_L$ . La tabla 3 presenta los valores evaluados para cada uno de los modelos diseñados.

**Tabla 3.** Variables analizadas.

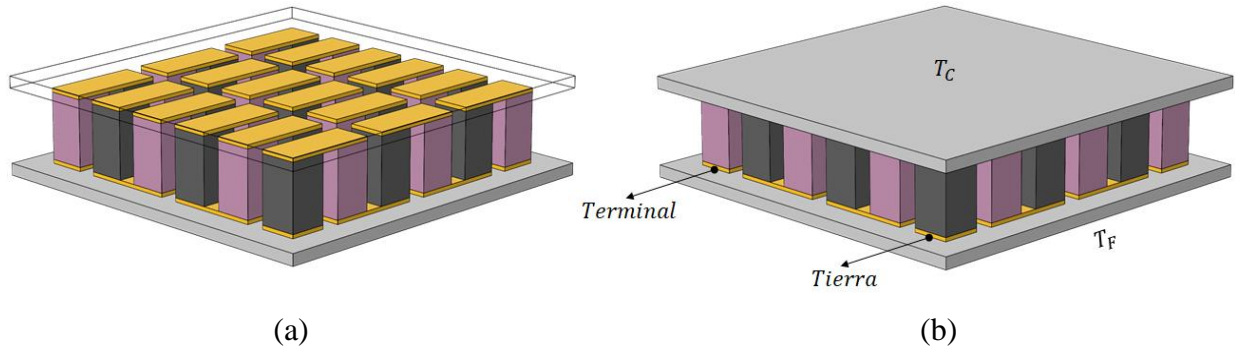
Variable	TEG (mm)	TEG ( $\mu\text{m}$ )
$\Delta T$ (K)	5 - 10 - 15	5 - 10 - 15
$R_L$ ( $\Omega$ )	0.01:0.05:50	1:0.5:250

## 4. Resultados

### 4.1 Termogenerador eléctrico a escala milimétrica (TEG mm)

Dentro del procedimiento descrito en la metodología está la simulación, revisión y análisis de dos estructuras TEG, una en escala milimétrica y otra a escala micrométrica. En la figura 6 se presenta el TEG (mm) diseñado de

acuerdo a los parámetros definidos en la tabla 1. En la figura 6 (a) se observa la cantidad de 18 termopares encontrados en el área definida de  $1 \text{ cm}^2$  conformada por un total de 18 columnas de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  tipo-N y 18 de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  tipo-P intercaladas entre sí y conectadas eléctricamente en serie por los electrodos de cobre y térmicamente en paralelo por las placas de tungsteno. Además, en la figura 6 se definen las condiciones de frontera de acuerdo a la descripción de la figura 5.

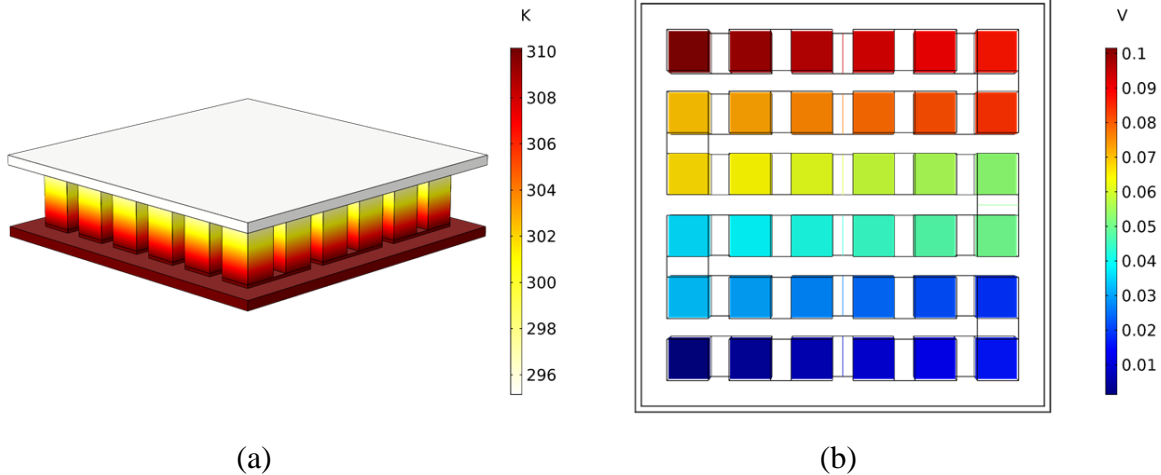


**Figura 6.** Diseño y definición de las condiciones de frontera para el TEG (mm).



La dispersión de temperatura y potencial eléctrico a través de la estructura del TEG (mm)

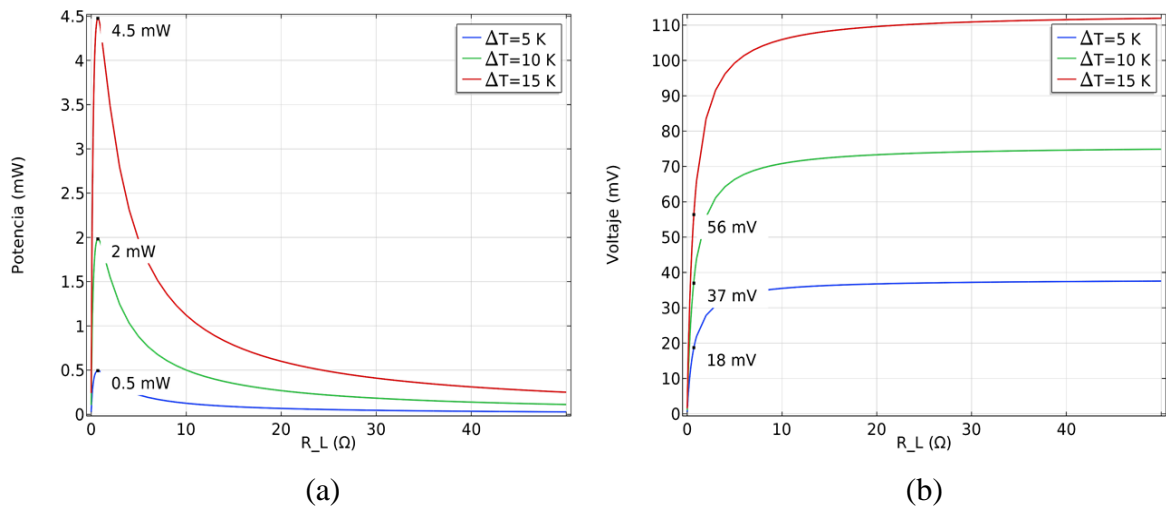
para un  $\Delta T$  de 15 °K, se presentan en la figura 7.



**Figura 7.** (a) Dispersión de la temperatura y (b) dispersión de potencial eléctrico para el TEG (mm).

Las gráficas de la figura 8 presentan la relación entre el valor de la  $R_L$  y la potencia y el voltaje generado en el módulo TEG (mm) de acuerdo a los 3 valores de  $\Delta T$  analizados, en azul,  $\Delta T = 5$  °K, en verde,  $\Delta T = 10$  °K, y en rojo,  $\Delta T = 15$  °K. En la Figura 8(a) se observa la potencia en

función a la  $R_L$  con una potencia máxima generada para una  $R_L = 0.71 \Omega$ . En la Figura 8(b) podemos determinar el valor del voltaje de operación óptimo producido en función del valor de la  $R_L$  relacionado con la potencia máxima generada para cada  $\Delta T$  analizado.



**Figura 8.** Gráficas para el TEG (mm) en función a la resistencia de carga. En (a) potencia vs. resistencia de carga y (b) voltaje vs. resistencia de carga.



De la misma manera podemos caracterizar el funcionamiento del TEG (mm) de acuerdo a la corriente óptima para determinar la potencia máxima generada. En la figura 9 se presentan los gráficos del voltaje y la potencia en función de la corriente. Para cada uno de los gradientes de temperatura,  $\Delta T$ , analizados, en la figura 9(a)

podemos determinar el valor óptimo de la corriente de acuerdo al valor de voltaje óptimo establecido en la figura 8(b). En la figura 9(b) se muestra el punto de operación de la variable óptima de corriente de acuerdo a la potencia máxima generada por los tres diferenciales de temperatura,  $\Delta T$ , analizados.

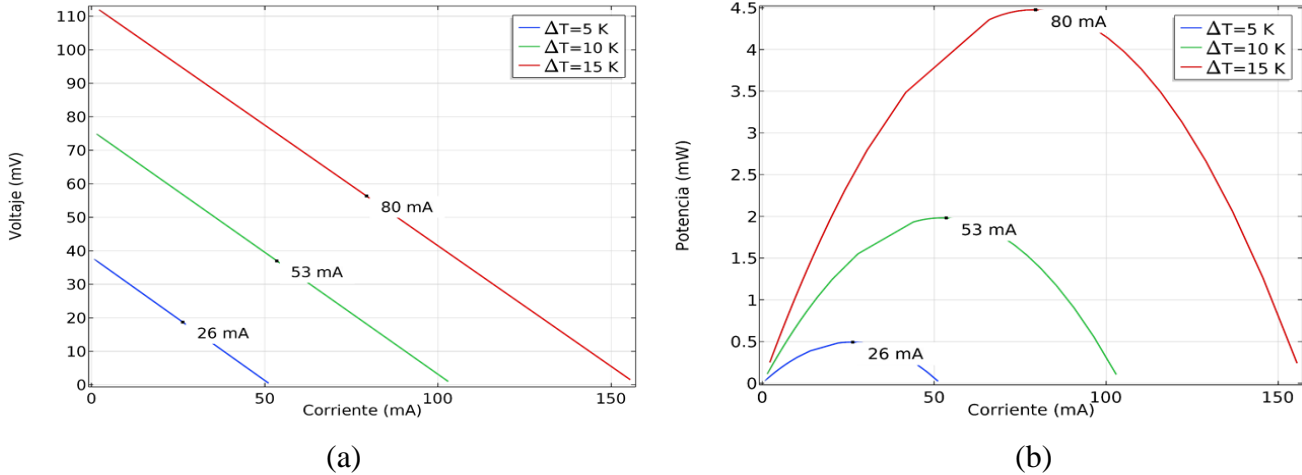


Figura 9. Gráficas del TEG (mm) en función a la corriente. En (a) voltaje vs. corriente (b) corriente vs. potencia.

### 4.2 Termogenerador eléctrico a escala micrométrica

En la figura 10 se presenta el TEG ( $\mu\text{m}$ ) diseñado de acuerdo a los parámetros definidos en la tabla 1. En la Figura 10(a) se observa la cantidad de 242 termopares encontrados en el área definida

de  $1 \text{ cm}^2$  conformada por un total de 242 columnas de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  tipo-N y 242 de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  tipo-P intercaladas entre sí, conectadas eléctricamente en serie por los electrodos de cobre y térmicamente en paralelo por las placas de tungsteno. Además, en la figura 10(b) se definen las condiciones de frontera de acuerdo a la figura 5.

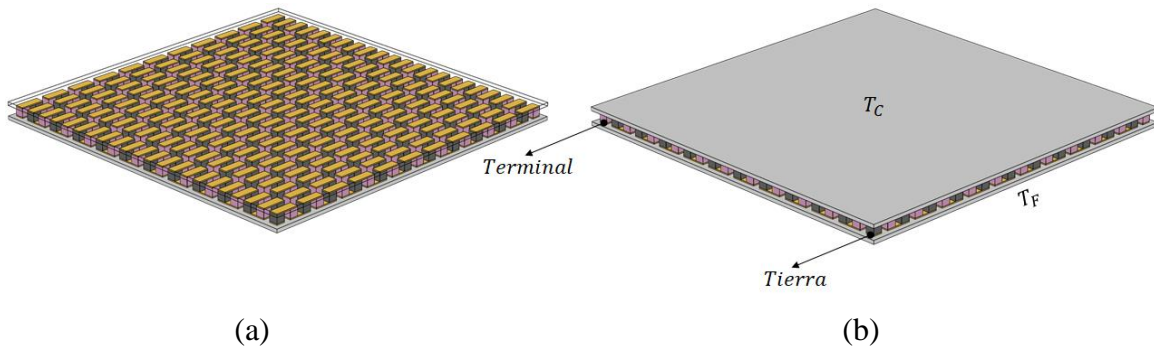
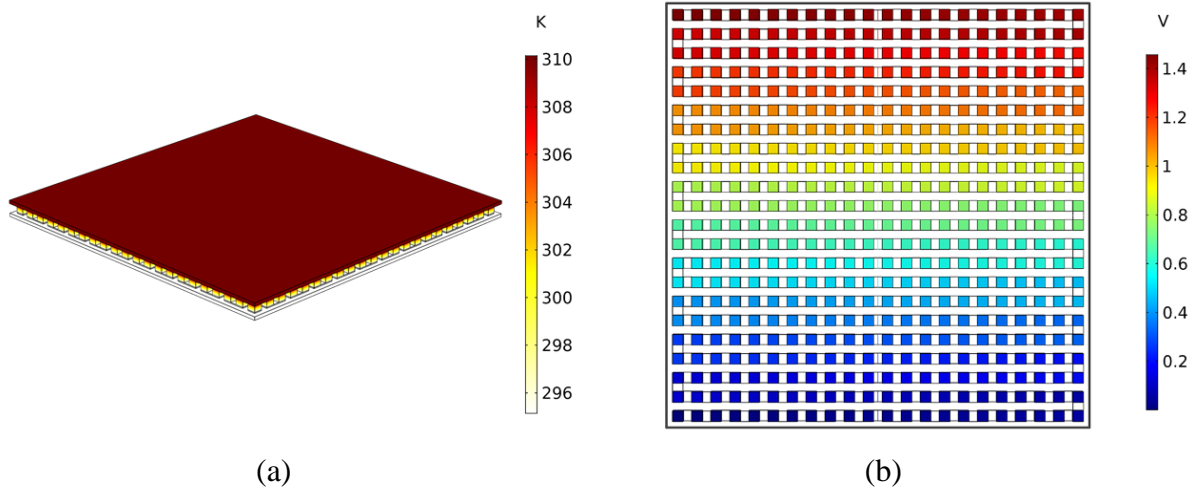


Figura 10. Diseño y definición de las condiciones de frontera del TEG ( $\mu\text{m}$ ).



La dispersión de temperatura y potencial eléctrico a través de la estructura del TEG ( $\mu\text{m}$ )

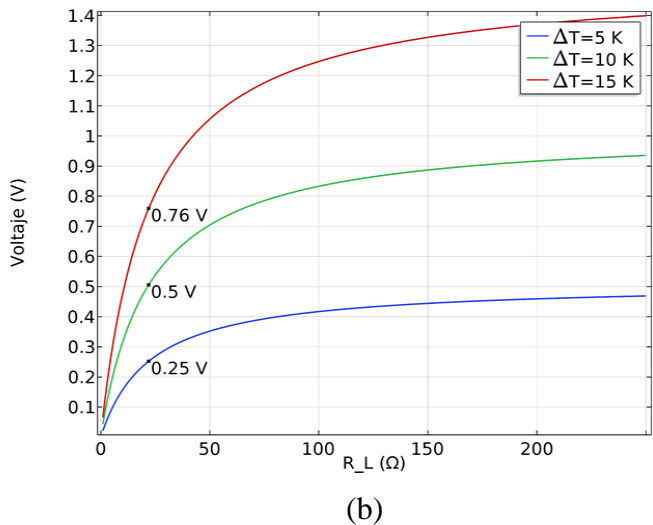
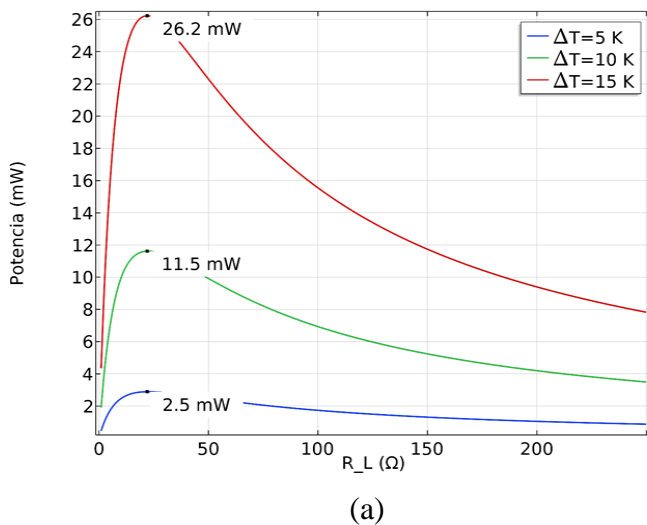
para un  $\Delta T$  de 15 °K, se presentan en la figura 11.



**Figura 11.** (a) Dispersión de la temperatura y (b) dispersión de potencial eléctrico para el TEG ( $\mu\text{m}$ ).

Las gráficas de la figura 12 presentan la relación entre el valor de la  $R_L$  y la potencia y el voltaje generado en el módulo TEG ( $\mu\text{m}$ ) de acuerdo a los 3 valores de  $\Delta T$  analizados, en azul,  $\Delta T = 5$  °K, en verde,  $\Delta T = 10$  °K, y en rojo,  $\Delta T = 15$  °K. En la Figura 12(a) se observa la potencia en

función a la  $R_L$  con una potencia máxima generada para una  $R_L = 22 \Omega$ . En la Figura 12(b) podemos determinar el valor del voltaje de operación óptimo producido en función del valor de la  $R_L$  relacionada con la potencia máxima generada para cada  $\Delta T$  analizado.

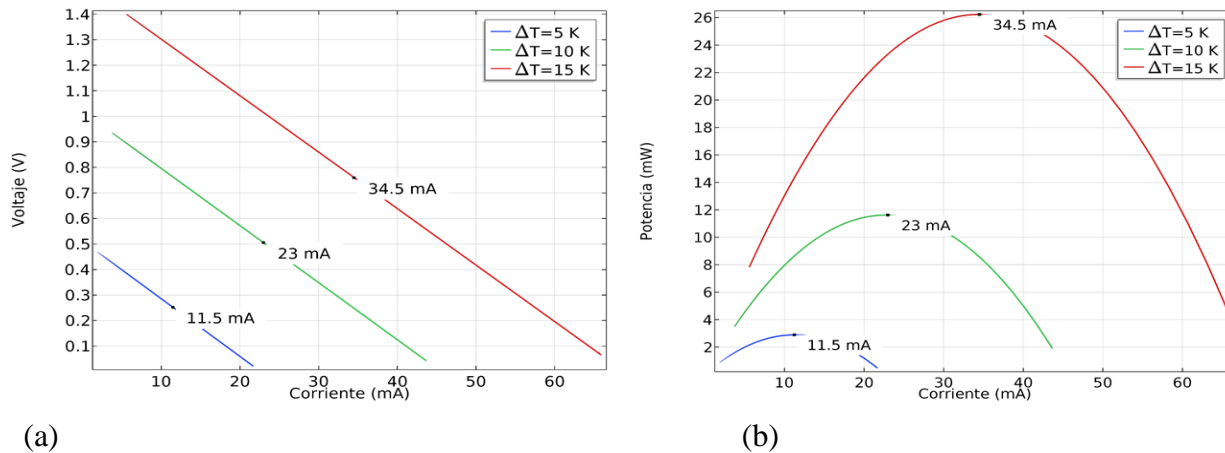


**Figura 11.** Gráficas para el TEG ( $\mu\text{m}$ ) en función a la resistencia de carga. En (a) potencia vs. resistencia de carga y (b) voltaje vs. resistencia de carga.



De la misma manera podemos caracterizar el funcionamiento del TEG ( $\mu\text{m}$ ) de acuerdo a la corriente óptima para determinar la potencia máxima generada. En la figura 13 se presentan los gráficos del voltaje y la potencia en función de la corriente. Para cada uno de los gradientes de temperatura,  $\Delta T$ , analizados, en la figura 13(a)

podemos determinar el valor óptimo de la corriente de acuerdo al valor de voltaje óptimo establecido en la figura 12(b). En la figura 13(b) se muestra el punto de operación de la variable óptima de corriente de acuerdo a la potencia máxima generada por los tres diferenciales de temperatura,  $\Delta T$ , analizados.



**Figura 13.** Gráficas para el TEG ( $\mu\text{m}$ ) en función a la corriente. En (a) corriente vs. voltaje (b) corriente vs. potencia.

En la tabla 4 se resumen los resultados de voltaje y corriente óptimos, además de la potencia máxima evaluada de acuerdo a los parámetros de

$\Delta T$  y  $R_L$ , de acuerdo a la tabla 3, para cada una de las estructuras diseñadas.

**Tabla 4.** Parámetros obtenidos de la simulación en COMSOL Multiphysics®.

	$R_L$ ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia maxima (mW)
<b>TEG (mm)</b>				
$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{K}$ )	5	$18 \times 10^{-3}$	26	0.5
	10	0.71	$37 \times 10^{-3}$	2
	15	$56 \times 10^{-3}$	80	4.5
<b>TEG (<math>\mu\text{m}</math>)</b>				
$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{K}$ )	5	0.25	11.2	2.5
	10	22	0.5	23
	15	0.76	34.5	26.2



## 5. Discusiones

Uno de los aportes de este trabajo es establecer un procedimiento estándar en la simulación de materiales TEG y los puntos principales que deben considerarse para mejorar la eficiencia energética de las estructuras diseñadas, aunque sí encontramos trabajos que realizan estudios de este tipo, la forma en la que establecen las simulaciones en programas de cómputo como COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, a veces no es descrita, dejando una brecha entre los resultados experimentales y su modelado numérico.

En este trabajo se estableció el análisis de la simulación de dos estructuras TEG a diferentes escalas y como estas permiten la generación de energía aprovechando una diferencia de temperatura,  $\Delta T$ , de hasta 15 °K, de acuerdo a la temperatura corporal normal.

Como se observa en la tabla 4 se establece que el número de termopares, así como las dimensiones de estos, son factores que determinan la potencia máxima de los TEG, se observa como la estructura micrométrica bajo una misma área de aplicación logra una potencia superior a la milimétrica en los tres gradientes de temperatura considerados, con 5 veces la potencia máxima para 5 grados, 5.75 veces más para 10 grados y 5.82 veces para 15 grados.

Trabajos como este nos permite visualizar, diseñar y analizar diferentes estructuras termogeneradoras en diferentes escenarios, con una amplia gama de materiales y configuraciones. Dentro de los parámetros que generalmente se evalúan de los TEG son la cantidad de elementos involucrados, i.e., cantidad de termopares, su dimensión, el área transversal y la longitud de cada una de las columnas, los materiales semiconductores, el tipo de diseño estructural, entre otras. Para el

caso de este trabajo se determinó un área de trabajo constante de 1 cm<sup>2</sup> para la cual se diseñaron dos estructuras TEG convencionales modificando el área transversal y la altura de las columnas, así como el número de termopares. En la tabla 4 se observa el desempeño energético de ambos dispositivos, donde se aprecia que la estructura a escala milimétrica (TEG mm) es menos eficiente en términos de potencia, esto es apoyado por varias investigaciones que establecen que, tanto el tamaño del TEG como la longitud de las piernas, no son parámetros importantes que logren modificar la potencia del dispositivo, sino que, como lo establecen en [20], la cantidad de termopares y el área transversal de estas estructuras son los parámetros directamente relacionados con la generación de potencia energética. Lo anterior es reafirmado en [32] donde demostraron que la longitud de los termopares debe estar en un rango de 100 a 300  $\mu\text{m}$  para un máximo rendimiento energético dependiendo de la sección transversal de cada una de las piernas del TEG, lo que concuerda con nuestra estructura micrométrica y su ventaja sobre la estructura milimétrica. Las dimensiones evaluadas demuestran que mientras exista un número mayor de termopares evaluados en una misma área existirá una mayor potencia eléctrica, esto es apoyado en [24].

La importancia de este trabajo de simulación recae en el hecho de que el acceso a herramientas de softwares de análisis numérico, como lo es COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, permiten modelar estructuras novedosas y determinar los parámetros básicos para su funcionamiento óptimo [33]. Se debe mencionar que el diseño de dispositivos TEG aún se encuentra en constante cambio. Hoy día se han diseñado estructuras TEG flexibles que se adapten a las diferentes zonas del cuerpo humano mediante materiales poliméricos para los cuales se han realizado simulaciones con el módulo de mecánica de



sólidos para analizar el desgaste de las estructuras, además de su desempeño [34-36].

No obstante, el modelado numérico de estos dispositivos nos permite determinar las dimensiones estructurales, materiales y parámetros esenciales como lo son el valor de la resistencia de carga ( $R_L$ ), el voltaje y la corriente óptima, para lograr una mejor conversión térmico-eléctrica. Además, de forma indirecta nos permite seleccionar el método de fabricación de acuerdo a la geometría diseñada. El estudio en cuestión abre las puertas para el diseño y la fabricación de dispositivos TEG de acuerdo a los datos simulados para un gran número de aplicaciones biomédicas como los TEG integrados en la vestimenta [33, 34], o para la autoalimentación energética de dispositivos médicos portátiles [37].

## 6. Conclusión

El acceso a herramientas de simulación que nos permitan experimentar con materiales y estructuras bien definidas, nos abre un campo de conocimiento para el diseño de dispositivos portátiles y autónomos para la generación de energía. En este caso se analizaron dos estructuras TEG, para las cuales se definieron materiales, dimensiones y diferenciales de temperatura, donde se evaluaron los parámetros eléctricos para obtener la eficiencia energética de cada uno de ellos. Se confirmó que las dimensiones y el número de termopares son factores que afectan a la potencia máxima que son capaces de producir este tipo de dispositivos. El diferencial de temperatura, según los resultados obtenidos, es otro parámetro importante para la eficiencia energética, aunado a la cantidad de los termopares, y la longitud y el área transversal de las columnas. En este trabajo se enfatizó en la generación de una metodología clara y reproducible, exponiendo las consideraciones necesarias para realizar una

simulación válida de este tipo de dispositivos. La metodología desarrollada abre un campo de conocimiento para la evaluación del diseño estructural, y los materiales necesarios, para determinar los parámetros óptimos que den como resultado una alta eficiencia energética en dispositivos de generación de energía autónoma.

## 7. Agradecimientos

Agradecimiento a la Universidad Autónoma de Baja California por el apoyo brindado durante el desarrollo de este artículo académico. Agradecimiento a CONAHCYT por el apoyo económico brindado [No. de apoyo: 828838, CVU-642624]. Agradecemos al proyecto interno No. 632160 del departamento de óptica del CICESE.

## 8. Agradecimientos de autoría

*Martha Alexandra Gómez Caraveo:* Escritura – Borrador Original, Conceptualización, Investigación, Análisis formal. *Sharon Ezrre González:* Escritura – Borrador Original, Conceptualización, Investigación, Metodología, Análisis formal. *José Alejandro Amezcua García:* Revisión y edición, Investigación, Metodología. *Heriberto Márquez Becerra:* Revisión y edición, Análisis formal.

## Referencias

- [1] S. Mondal, A. Dalvi, A. K. Mondal, and V. Thapa, "A novel approach for aerogenerators-triple state absorption-based cooling system", in *Materials Today: Proceedings*, May 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.036>
- [2] M. Temiz, and I. Dincer, "Design and analysis of a floating photovoltaic based energy system with underground energy storage options for remote communities", *J. Energy Storage*, vol. 55, pt. C, Nov. 2022, Art. no. 105733. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105733>



- [3] C. Pestana Barros, "Efficiency analysis of hydroelectric generating plants: A case study for Portugal", *Energy Econ.*, vol. 30, no. 1, pp. 59-75, Jan. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2006.10.008>
- [4] Q. Zhang, C. Xig, F. Shen, Y. Gong, Y. Zi, H. Gou, Z. Li, Y. Peng, Q. Zhang, and Z. L. Wang, "Human body IoT systems based on the triboelectrification effect: energy harvesting, sensing, interfacing and communication", *Energy Environ. Sci.*, vol. 15, no. 9, pp. 3688-3721, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1039/D2EE01590K>
- [5] T. Tat, A. Libanori, C. Au, A. Yau, and J. Chen, "Advances in triboelectric nanogenerators for biomedical sensing," *Biosens Bioelectron.*, vol. 171, Art. no. 112714, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112714>
- [6] F. Zamanpour, L. Shooshtari, M. Gholami, R. Mohammadpour, P. Sasanpour, and N. Taghavinia, "Transparent and flexible touch on/off switch based on BaTiO<sub>3</sub>/silicone polymer triboelectric nanogenerator", *Nano Energy*, vol. 103, pt. A, Art. no. 107796, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107796>
- [7]. X. Cheng, X. Xue, Y. Ma, M. Han, W. Zhang, Z. Xu, H. Zhang, and H. Zhang, "Implantable and self-powered blood pressure monitoring based on a piezoelectric thinfilm: Simulated, in vitro and in vivo studies", *Nano Energy*, vol. 22, pp. 453-460, April 2016. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.02.037>
- [8]. B. H. Moghadam, M. Hasanzadeh, and A. Simchi, "Self-Powered Wearable Piezoelectric Sensors Based on Polymer Nanofiber-Metal-Organic Framework Nanoparticle Composites for Arterial Pulse Monitoring", *ACS Appl Nano Mater.*, vol. 3, no. 9, pp. 8742-8752, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c01551>
- [9]. Y. Wang, W. Zhu, Y. Deng, B. Fu, P. Zhu, Y. Yu, Jiao Li, and J. Guo, "Self-powered wearable pressure sensing system for continuous healthcare monitoring enabled by flexible thin-film thermoelectric generator", *Nano Energy*, vol. 73, Art. no. 104773, July 2020. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.10.4773>
- [10]. K. Meng, S. Zhao, Y. Zhou, Y. Wu, S. Zhang, Q. He, X. Wang, Z. Zhou, W. Fan, X. Tan, J. Yang, and J. Chen, "A Wireless Textile-Based Sensor System for Self-Powered Personalized Health Care", *Matter*, vol. 2, pp. 896-907, April 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.12.025>
- [11] P. Jha, P. Patra, J. Naik, A. Dutta, A. Acharya, P. Rajalakshmi, and S. G. Singh, "A 2 $\mu$ W biomedical frontend with  $\Sigma\Delta$  ADC for self-powered U-healthcare devices in 0.18 $\mu$ m CMOS technology", en 2015 IEEE 13th International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), Grenoble, Francia, June 2015. <https://doi.org/10.1109/NEWCAS.2015.7182054>
- [12] M. L. S. Mi, S. H. M. Ali, and M. S. Islam, "A Novel Architecture of Maximum Power Point Tracking for Ultra-Low-Power Based Hybrid Energy Harvester in Ubiquitous Devices: A Review", *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 10, pp. 1240-1251, Sep. 2013. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2013.1240.1251>
- [13]. R. Kumar, F. J. Montero, R. Lamba, M. Vashishtha, and S. Upadhyaya, "Thermal management of photovoltaic-thermoelectric generator hybrid system using radiative cooling and heat pipe", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 227, Art. no. 120420, June 2023. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120420>
- [14]. Y. Zhu, D. W. Newbrook, C. H. de Groot, and R. Huang, "Comprehensive analysis of radiative cooling enabled thermoelectric energy harvesting", *J. Phys. Photonics*, vol. 5, no. 2, Art. no. 025002, April 2023. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/accac1>
- [15]. F. J. Montero, R. Lamba, A. Ortega, W. Jahn, W. H. Chen, and A. M. Guzmán, "A bidirectional solar thermoelectric generator combining heat storage for daytime and nighttime power generation", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 224, Art. no. 119997, April 2023. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.119997>





- [16]. I. Vijitha, N. Jacob, N. Raveendran, C. Vijayakumar, and B. Deb, "Simulation-aided studies on the superior thermoelectric performance of printable PBDTT-FTTE/SWCNT composites", *Mater. Today, Energy*, vol. 32, art. no. 101233, March 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2022.101233>
- [17]. Z. Varga, and E. Racz, "COMSOL 3D Simulation of Optimization of Waste Heat Recovery Using Thermoelectric Generator by Modifying the Design", 2022 IEEE 5th International Conference and Workshop in Obuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), Budapest, Hungria, pp. 000101-000106, 2022. <https://doi.org/10.1109/CANDOEPE57516.2022.10046369>
- [18] T. Kucova, P. Prauzek, J. Konecny, M. Zilys, and R. Martinek, "Thermoelectric energy harvesting for internet of things devices using machine learning: A review", *CAAI Trans Intell Technol*, pp. 1-21, July 2023. <https://doi.org/10.1049/cit2.12259>
- [19] Y. Hou, Y. Yang, Z. Wang, Z. Li, X. Zhang, B. Bethers, R. Xiong, H. Guo, and H. Yu, "Whole fabric-assisted thermoelectric devices for wearable electronics", *Adv. Sci.*, vol. 9, no. 1, Art. no. 2103574, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1002/advs.202103574>
- [20] Y. Wang, Y. Shi, D. Mei, and Z. Chen, "Wearable thermoelectric generator to harvest body heat for powering a miniaturized accelerometer". *Appl. Energy*, vol. 215, pp. 690-698, April 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.062>
- [21] M. Dargusch, W. D. Liu, and Z. G. Chen, "Thermoelectric generators: alternative power supply for wearable electrocardiographic systems". *Adv Sci*, vol. 7, no. 18, Art. no. 2001362, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1002/advs.202001362>
- [22] S. Addanki, and D. Nedumaran, "Simulation and fabrication of thermoelectric generators for hand held electronic gadgets", *Mater Sci Engineering: B*, vol. 251, Art. no. 114453, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114453>
- [23] C. Rudderham, and J. Maassen, "Ab initio thermoelectric calculations of ring-shaped bands in two-dimensional Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, and Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>: Comparison of scattering approximations", *Physical Rev B*, vol. 103, n. 16, April 2021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.165406>
- [24] L. Yi, H. Xu, H. Yang, S. Huang, H. Yang, Y. Li, Q. Zhang, Z. Guo, H. Hu, P. Sun, X. Tan, G. Liu, K. Song, and J. Jiang, "Design of Bi<sub>2</sub>te<sub>3</sub>-Based Thermoelectric Generator in a Widely Applicable System", *J. Power Sources*, vol. 559, March 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4218766>
- [25] W. Glatz, E. Schwyter, L. Durrer, and C. Hierold, "Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Based Flexible Micro Thermoelectric Generator with Optimized Design", *J. Microelectromech Syst*, vol. 18, n. 3, pp. 763-772, June 2009. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2009.2021104>
- [26] Ho Sung Lee, "Thermoelectric Generators", in *Thermoelectrics: Design and Materials*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, pp. 8-22, 2016. <https://doi.org/10.1002/9781118848944>
- [27] J. Garcia-Cañadas, "Thermoelectric Modules: Power Output, Efficiency, and characterization", in *Thermoelectric Energy Conversion: Basic Concepts and Device Applications*, D. D. Pineda y A. Rezaniakolaei, Eds., Dinamarca, Wiley-VCH Verlag GmbH y Co. KGaA., pp. 127-146, 2017. <https://doi.org/10.1002/9783527698110.ch7>
- [28] The Heat Transfer Module, User's Guide, COMSOL 5.4. Available: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>. [Accessed: 03, Aug. 2023]
- [29] AC/DC Module, User's Guide, COMSOL 5.4. Available: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.acdc/ACDCModuleUsersGuide.pdf>. [Accessed: 03, Aug. 2023]
- [30] The Finite Element Method (FEM). "An Introduction to the Finite Element Method", COMSOL, 2017. available: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>. [Accessed: 29, July, 2023]



- [31] J. L. Perez-Aparicio, R. L. Taylor, and D. Gavela, "Finite element analysis of nonlinear fully coupled thermoelectric materials", *Comput Mech*, vol. 40, pp. 35-45, June 2007. <https://doi.org/10.1007/s00466-006-0080-7>
- [32] W. Glatz, S. Muntwyler, and C. Hierold, "Optimization and fabrication of thick flexible polymer based micro thermoelectric generator," *Sens Actuators A, Phys*, vol. 132, no. 1, pp. 337-345, Nov. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.04.024>
- [33] R. Ahmed, Zeeshan, M. U. Mehmood, A. Mannan, J. Y. Lee, S. H. Lim, and W. Chun, "Design and performance analysis of powering a wireless earphone by a thermoelectric generator", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 54457-54465, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062086>
- [34] M. K. Kim, M. S. Kim, S. Lee, C. Kim, and Y. J. Kim. "Wearable thermoelectric generator for harvesting human body heat energy", *Smart Mater Struct*, vol. 23, no. 10, Art. no. 105002, Sep. 2014. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/10/105002>
- [35] T. Sugahara, Y. Ekubaru, N. V. Nong, N. Kagami, K. Ohata, L. T. Hung, M. Okajima, S. Nambu, and K. Sukanuma, "Fabrication with semiconductor packaging technologies and characterization of a large-scale flexible thermoelectric module", *Adv Mater, Technol*, vol. 4, no. 2, art. no. 1800556, Dec. 2018. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/10/105002>
- [36] B. Lee, H. Cho, K. T. Park, J. S. Kim, M. Park, H. Kim, Y. Hong, and S. Chung, "High-performance compliant thermoelectric generators with magnetically self-assembled soft heat conductors for self-powered wearable electronics", *Nat. Commun.*, vol. 11, art. no. 5948, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19756-z>
- [37] C. S. Kim, H. M. Yang, J. Lee, G. S. Lee, H. Choi, Y. Kim, S. H. Lim, S. H. Cho, and B. J. Cho, "Self-powered wearable electrocardiography using a wearable thermoelectric power generator", *ACS Energy Lett.*, vol. 3, no. 3, pp. 501-507, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.7b01237>

Derechos de Autor (c) 2023 Martha Alexandra Gómez Caraveo, Sharon Ezrre González, José Alejandro Amézquita García, Heriberto Márquez Becerra



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)