

Configuración óptima para un enfriador termoelectrico de dos etapas usando BiTe y PbTe en cada etapa

Karen Anaid Rendón Cortés

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán,
Av. Santa Ana No. 1000, Del. Coyoacán, Col. San Francisco Culhuacán, C.P. 04430, Cd. de México, D.F.,
Teléfono: 57296000 ext. 73110
karendonc91@gmail.com

Miguel Angel Olivares Robles

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán,
Av. Santa Ana No. 1000, Del. Coyoacán, Col. San Francisco Culhuacán, C.P. 04430, Cd. de México, D.F.,
Teléfono: 57296000 ext. 73110
olivares@ipn.mx

Resumen

En trabajos anteriores se han estudiado sistemas de enfriamiento termoelectrico de dos etapas utilizando el mismo material para ambas etapas. En este trabajo consideramos un módulo termoelectrico semiconductor con diferentes materiales para cada etapa, la primera está compuesta por un termopar de plomo telurio (PbTe) y la segunda por termopares de bismuto telurio (BiTe). Se estudia la optimización del sistema considerando el coeficiente de desempeño y la capacidad de enfriamiento variando los parámetros de intensidad de corriente, área y número de termopares en la primera etapa. Con el propósito de estudiar el efecto de diferentes materiales en cada etapa del sistema, los resultados obtenidos en este trabajo se comparan con resultados previamente reportados para el caso en el que se utiliza el mismo material termoelectrico en ambas etapas. Como resultado de este estudio se muestra que el

coeficiente de desempeño y la capacidad de enfriamiento mejoran considerablemente al utilizar distintos materiales en cada etapa.

Palabra(s) Clave(s): capacidad de enfriamiento, coeficiente de desempeño, enfriador termoeléctrico de dos etapas, termopar.

1. Introducción

Los módulos termoeléctricos semiconductores son dispositivos en estado sólido, que utilizan energía eléctrica para generar un gradiente de temperaturas, este fenómeno fue descubierto por Peltier en 1834. Actualmente, las aplicaciones de estos dispositivos son muy diversas debido al desarrollo de nuevos materiales semiconductores.

El enfriamiento en un módulo termoeléctrico semiconductor es posible cuando se aplica una corriente eléctrica a la unión de 2 metales semiconductores, ya que se obtiene una diferencia de temperatura en dichas uniones, lo que se conoce como efecto Peltier e inversamente cuando existe una diferencia de temperatura en las uniones de los metales semiconductores, es posible generar un voltaje debido a otro efecto termoeléctrico conocido como efecto Seebeck [1].

El uso de enfriadores termoeléctricos está siendo cada vez más estudiado ya que tienen la ventaja de que son compactos, no existen vibraciones ni ruido, son de peso ligero, no tienen partes mecánicas móviles y no ocasionan un impacto ambiental considerable puesto que no utilizan refrigerantes que contaminen el medio ambiente, estas ventajas los hace ideales para su uso en diversos campos como son refrigeradores portátiles y aire acondicionado, la industria de la alimentación, dispositivos electrónicos, medicina, el campo militar e incluso en el espacio [2]. La desventaja que se encuentra en el uso de enfriadores termoeléctricos es que se tienen valores de eficiencia bajos comparados con los sistemas de refrigeración convencionales, es por esto que las investigaciones en la optimización de la construcción de estos dispositivos son cada vez mayores [3].

Durante la última década los sistemas termoeléctricos de dos etapas han sido estudiados considerando distintos parámetros que influyen en el coeficiente de desempeño y en la capacidad de enfriamiento [4]. Actualmente, se producen dispositivos termoeléctricos comerciales con múltiples etapas para mejorar la capacidad de enfriamiento del dispositivo [5], además, recientemente se ha estudiado el efecto del tamaño físico de los termopares en el desempeño de los dispositivos termoeléctricos [6]. Los parámetros considerados son la longitud, el área de los termopares la intensidad de corriente eléctrica, en las etapas del sistema [7]. Variando estos parámetros se pueden determinar los valores óptimos para obtener el mejor desempeño [8]. Sin embargo, los trabajos mencionados anteriormente consideran dispositivos termoeléctricos con el mismo material termoeléctrico para ambas etapas. Por lo tanto, se requiere estudiar el efecto de materiales distintos en cada etapa sobre el desempeño del enfriador termoeléctrico y comparar los resultados con aquellos obtenidos previamente [9].

NOMENCLATURA			
I	Corriente eléctrica (A)	T_c	Temperatura en la unión fría (K)
K	Conductancia térmica de un termopar (W/K)	T_h	Temperatura en la unión caliente (K)
A	Área de sección transversal en cada termopar (cm ²)	α	Coeficiente Seebeck (V/K)
L	Longitud del termopar (cm)	ρ	Resistividad eléctrica (Ωcm)
R	Resistencia eléctrica en cada termopar (Ω)	λ	Conductividad térmica (W/K cm)
n	Número de termopares en la primera etapa	ε	Coeficiente de desempeño
q_c	Tasa de flujo de calor del termopar en la unión fría (W)	1	Primera etapa
q_h	Tasa de flujo de calor del termopar en la unión caliente (W)	2	Segunda etapa
Q_c	Capacidad de enfriamiento del módulo termoeléctrico semiconductor (W)	p	Semiconductor tipo p
Q_r	Flujo de calor de calor rechazado en el módulo termoeléctrico (W)	n	Semiconductor tipo n

Tabla 1. Nomenclatura y unidades.

2. Desarrollo

2.1. Descripción del módulo termoeléctrico semiconductor

El módulo considerado en este trabajo consiste en un módulo termoeléctrico semiconductor convencional de dos etapas que funciona como enfriador. La primera etapa está formada por n termopares de PbTe y la segunda etapa por un termopar de BiTe. Los termopares están compuestos de un conductor tipo p y otro tipo n , conectados eléctricamente en paralelo y térmicamente en serie, apilados uno sobre otro. Además se utilizan valores distintos de corriente eléctrica I_1 , I_2 para cada etapa. También existe una placa de cerámica que aísla eléctricamente a las dos etapas. Las resistencias de contacto son despreciables y todo el módulo está aislado térmicamente [10], ver Figura 1.

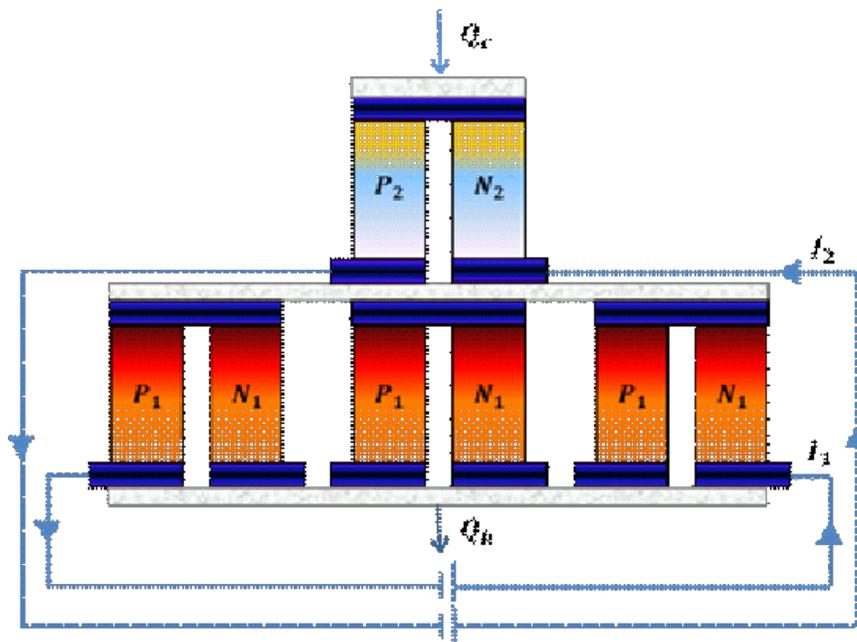


Fig. 1. Módulo termoeléctrico semiconductor, primera etapa con un termopar de PbTe y segunda etapa con n termopares de BiTe.

Una vez definido el sistema considerado en este trabajo, se pueden definir los parámetros para optimizar al sistema, esto se analiza en las siguientes secciones [11].

2.1.1. Primera etapa del módulo termoelectrico semiconductor

El calor absorbido y rechazado por cada termopar en la primera etapa están dados respectivamente por:

$$q_{c1} = \alpha_1 I_1 T_{c1} - K_1 (T_{h1} - T_{c1}) - \frac{1}{2} R_1 I_1^2 \quad (1)$$

$$q_{h1} = \alpha_1 I_1 T_{h1} - K_1 (T_{h1} - T_{c1}) + \frac{1}{2} R_1 I_1^2 \quad (2)$$

donde la conductividad térmica y la resistencia eléctrica se obtienen:

$$K_1 = \frac{2\lambda_1 A_1}{L_1} \quad (3)$$

$$R_1 = \frac{2\rho_1 L_1}{A_1} \quad (4)$$

2.1.2. Segunda etapa del módulo termoelectrico semiconductor

El calor absorbido y rechazado por el termopar en la segunda etapa están dados por:

$$q_{c2} = \alpha_2 I_2 T_{c2} - K_2 (T_{h2} - T_{c2}) - \frac{1}{2} R_2 I_2^2 \quad (5)$$

$$q_{h2} = \alpha_2 I_2 T_{h2} - K_2 (T_{h2} - T_{c2}) + \frac{1}{2} R_2 I_2^2 \quad (6)$$

donde:

$$K_2 = \frac{2\lambda_2 A_2}{L_2} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{2\rho_2 L_2}{A_2} \quad (8)$$

El balance de calor en el módulo implica que:

$$T_{h2} = T_{c1} \quad (9)$$

$$q_{h2} = q_{c1} \quad (10)$$

A partir de las ecuaciones (9) y (10), la capacidad de enfriamiento y la tasa de calor rechazado en el enfriador termoeléctrico de dos etapas estan dados por:

$$Q_c = Q_{c2} = \alpha_2 I_2 T_{c2} - K_2 (T_{h2} - T_{c2}) - \frac{1}{2} R_2 I_2^2 \quad (11)$$

$$Q_h = n(\alpha_1 I_1 T_{h1} - K_1 (T_{h1} - T_{c1}) + \frac{1}{2} R_1 I_1^2) \quad (12)$$

El coeficiente de desempeño (ε) del módulo termoeléctrico está definido como::

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} = \frac{1}{\frac{Q_h}{Q_c} - 1} \quad (13)$$

En la segunda etapa del módulo existe una corriente eléctrica óptima correspondiente a la máxima capacidad de enfriamiento del módulo termoeléctrico [9], y está dada por

$$I_{2cma} = \frac{\alpha_2 T_{c2}}{R_2} \quad (14)$$

2.2. Parámetros de optimización

Con el propósito de determinar los valores óptimos del coeficiente de desempeño y de la capacidad de enfriamiento se analizan los siguientes casos:

Caso 1: corriente y área variables

Caso 2: corriente constante y área variable

Caso 3: corriente variable área y constante

Las propiedades termoeléctricas de los materiales utilizados para el cálculo de los valores numéricos se muestran en la Tabla 2 [12].

	$\alpha = \alpha_p + \alpha_n $ (V/K)	$\lambda = \lambda_p = \lambda_n$ (W/Kcm)	$\rho = \rho_p = \rho_n$ (Ωcm)
PbTe	$(180 + 350)10^{-6} = 5.30 \times 10^{-4}$	2.0×10^{-2}	8.30×10^{-6}
BiTe	$2 \times 1.8 \times 10^{-4}$	1.4×10^{-2}	$7.7 \times 10^{-4} \Omega cm$

Tabla 2. Propiedades termoeléctricas.

3. Resultados

3.1. Caso 1: corriente I_1 y área A_1 variables

El número n de termopares considerados para la segunda etapa es $n = 3,4,5$. Además, la Tabla 3 muestra los valores utilizados para obtener el coeficiente de desempeño y la capacidad de enfriamiento mostrados la Fig. 2 y 3.

A_2	L_2	T_{c2}	T_{h1}	I_{2cmax}
$0.1 cm^2$	$0.5 cm$	$248 K$	$308 K$	$11.59 A$

Tabla 3. Valores utilizados para calcular el coeficiente de desempeño y la capacidad de enfriamiento en la etapa 2.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento del coeficiente de desempeño en términos de la corriente eléctrica I_1 con distinto número de termopares. Nótese que para $n = 3$ los valores de ε son mayores en comparación con los otros valores de n , el máximo coeficiente de desempeño lo obtenemos para corrientes alrededor de 5A. Esto implica un menor costo de operación y fabricación del dispositivo.

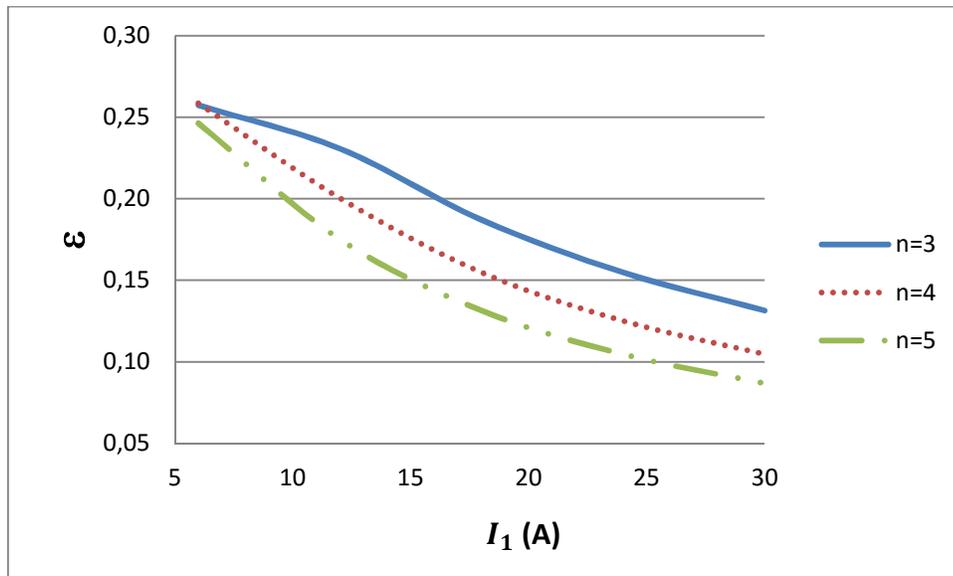


Fig. 2. Coeficiente de desempeño vs corriente eléctrica para diferente número termopares de PbTe en la primera etapa.

La Figura 3 muestra que la capacidad de enfriamiento es mayor con el incremento de la corriente, como es de esperarse, los valores de la capacidad de enfriamiento son mayores para $n = 5$ que para $n = 3$. Esto es consistente con el hecho de que a mayor número de termopares se absorbe mayor cantidad de calor.

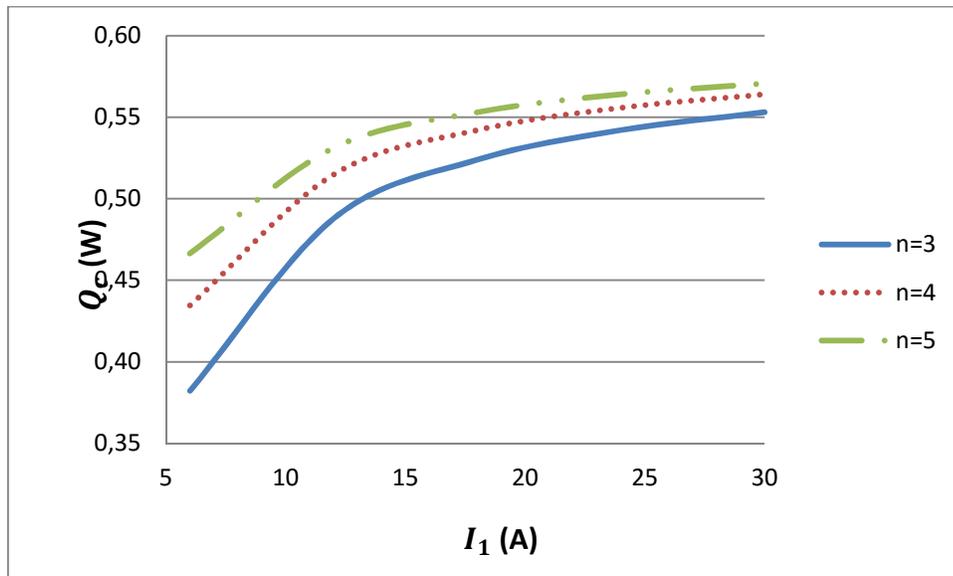


Fig. 3. Capacidad de enfriamiento vs corriente eléctrica para diferente número termopares de PbTe en la primera etapa.

3.2. Caso 2: corriente I_1 constante y área A_1 variable

En esta parte se asume que el área A_1 de la primera etapa es la suma del área de cada termopar. La Figura 4 muestra que los valores óptimos del coeficiente de desempeño se obtienen para valores pequeños de A_1 y con $n = 3$, para valores mayores de n y de A_1 el desempeño del sistema es bajo.

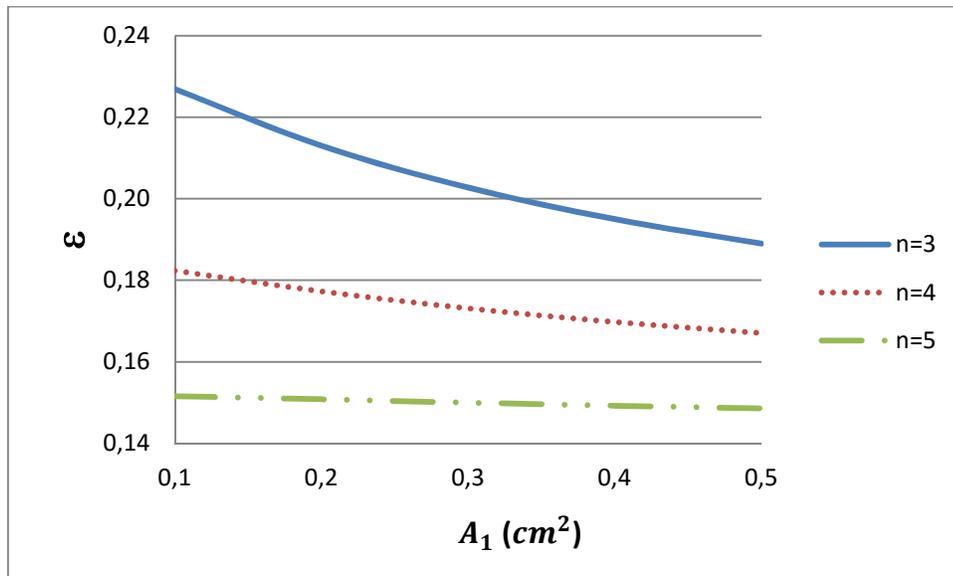


Fig. 4. Coeficiente de desempeño vs área para diferente número termopares de PbTe en la primera etapa.

La Figura 5 muestra que la capacidad de enfriamiento es mayor para áreas menores.

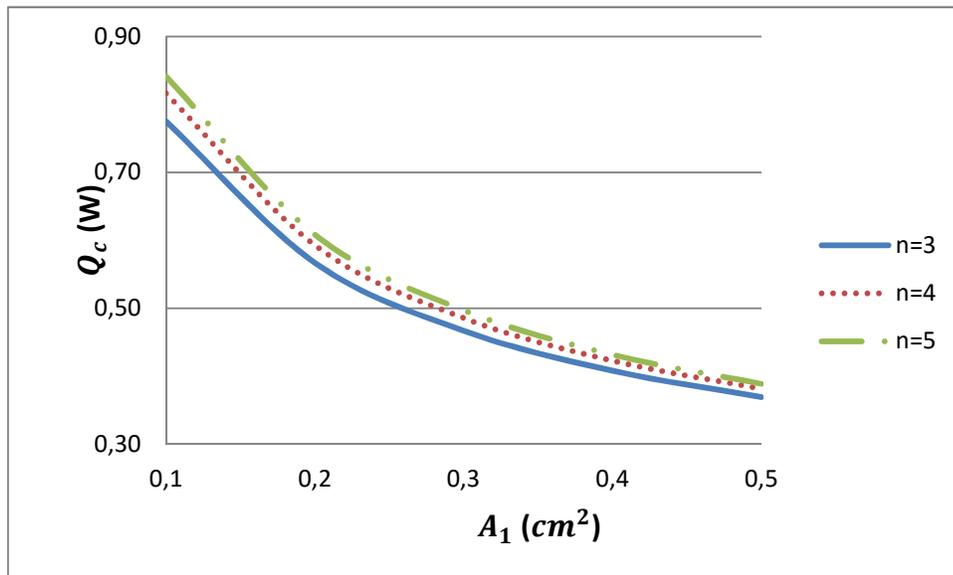


Fig. 5. Capacidad de enfriamiento contra área y número de termopares para diferente número termopares de PbTe en la primera etapa.

3.3. Caso 3: corriente I_1 variable y área A_1 constante

En general, se sabe que n , I_1 y A_1 influyen sobre ε y Q_c , estos parámetros están relacionados entre sí y deben ser considerados para la óptima configuración de un enfriador termoeléctrico de dos etapas. La Figura 6 muestra el coeficiente de desempeño para diferentes valores de área y en la primera etapa con diferente número de termopares. Nótese que el valor máximo del coeficiente de desempeño se obtiene para el caso en el que el área de la primera etapa es $A = 0.2 \text{ cm}^2$, $n = 3$ y con un valor de $I_1 = 12A$. Un comportamiento similar se obtiene de $A = 0.3 \text{ cm}^2$ y $n = 3$, pero un máximo menor a las condiciones mencionadas anteriormente.

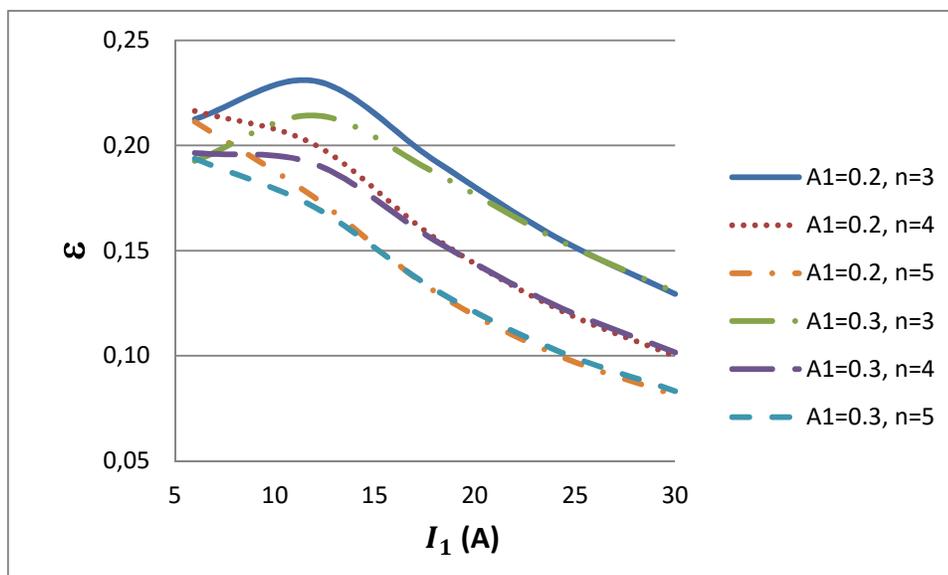


Fig. 6. Coeficiente de desempeño vs corriente eléctrica para diferente número termopares de PbTe en la primera etapa.

La Figura 7 muestra que los valores de la capacidad de enfriamiento aumentan conforme la corriente se incrementa, son mayores para el caso $A = 0.2 \text{ cm}^2$ y $n = 5$. Nótese que cuando $A = 0.3 \text{ cm}^2$ y $n = 5$ los valores de la capacidad de enfriamiento son menores que al caso antes descrito.

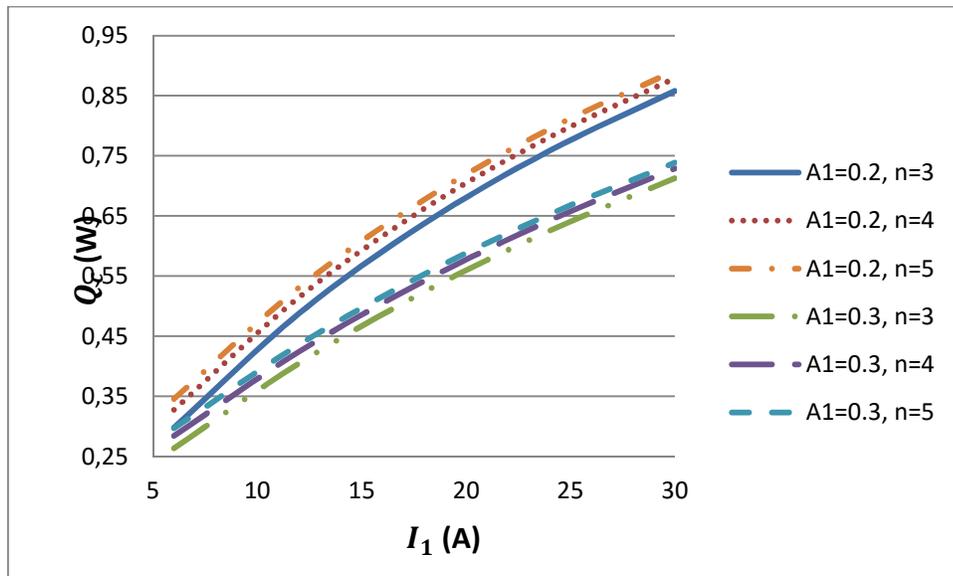


Fig. 7. Capacidad de enfriamiento vs corriente eléctrica para diferente número termopares de PbTe en la primera etapa.

En las Tablas 7 a 9 se muestran los resultados numéricos del estudio realizado.

	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$		$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
ϵ	0.2574	0.2585	0.2463	Q_c (W)	0.5530	0.5640	0.5706
I_1 (A)	6	6	6	I_1 (A)	30	30	30
A (cm ²)	0.1	0.1	0.1	A (cm ²)	0.5	0.5	0.5

Tabla 7. Valores óptimos para el caso 1: corriente I_1 y área A_1 variable.

	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$		$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
ϵ	0.2269	0.1823	0.1515	Q_c (W)	0.7749	0.8161	0.8411
A_1 (cm ²)	0.1	0.1	0.1	A_1 (cm ²)	0.1	0.1	0.1

Tabla 8. Valores óptimos para el caso 2: corriente I_1 constante y área A_1 variable.

	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$		$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
ϵ	0.2124	0.2163	0.2112	Q_c (W)	0.8579	0.8790	0.8918
I_1 (A)	12	6	6	I_1 (A)	6	6	6

Tabla 9.1. Valores óptimos para el caso 3: corriente I_1 variable y área $A_1=0.2$ cm²

	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$		$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
ε	0.2142	0.1964	0.1936	$Q_c (W)$	0.7127	0.7289	0.7386
$I_1 (A)$	12	6	6	$I_1 (A)$	30	30	30

Tabla 9.2. Valores óptimos para el caso 3: corriente I_1 variable y área $A_1 = 0.3\text{cm}^2$ constante.

4. Discusión de resultados

En esta sección se muestra la importancia de considerar materiales distintos en cada etapa. Las Tablas 10-12 muestran los valores óptimos obtenidos en trabajos previos [9]. Estos resultados óptimos fueron obtenidos cuando ambas etapas están formadas de BiTe.

	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$		$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
ε	0.1260	0.1291	0.1305	$Q_c (W)$	0.4578	0.4734	0.4828
$I_1 (A)$	12	6	6	$I_1 (A)$	30	30	30
$A (cm^2)$	0.2	0.1	0.1		0.5	0.5	0.5

Tabla 10. Valores obtenidos en la referencia 9 para el caso 1: corriente I_1 y área A_1 variable.

	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$		$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
ε	0.0663	0.0583	0.0509	$Q_c (W)$	0.3908	0.44465	0.4802
$A_1 (cm^2)$	0.1	0.1	0.1	$A_1 (cm^2)$	0.1	0.1	0.1

Tabla 11. Valores obtenidos en la referencia 9 para el caso 2: corriente I_1 constante y área A_1 variable.

	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$		$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
ε	0.1359	0.1470	0.1471	$Q_c (W)$	0.5031	0.5319	0.5493
$I_1 (A)$	6	6	6	$I_1 (A)$	30	30	30

Tabla 12.1. Valores obtenidos en la referencia 9 para el caso 3: corriente I_1 variable y área $A_1=0.2\text{cm}^2$ constante.

	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$		$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
ε	0.1410	0.1494	0.1495	$Q_c (W)$	0.5135	0.5361	0.5497
$I_1 (A)$	12	6	6	$I_1 (A)$	30	30	30

Tabla 12.2. Valores obtenidos en la referencia 9 para el caso 3: corriente I_1 variable y área $A_1 = 0.3\text{cm}^2$ constante.

La Tabla 13 muestra los valores óptimos del coeficiente de desempeño y la capacidad de enfriamiento en términos de la corriente y del área para el modulo termoeléctrico. Se puede observar que cuando se trabaja con un enfriador, donde se utilizan PbTe y BiTe en diferentes etapas, los valores del coeficiente de desempeño y la capacidad de enfriamiento son mayores a los valores obtenidos cuando se utiliza un solo material en ambas etapas, a saber BiTe. Incluso nótese que para valores más pequeños de corriente y área obtenemos un mejor valor de coeficiente de desempeño y capacidad de enfriamiento. Esto representa un ahorro en costos de operación y fabricación.

Enfriador de dos etapas (a) materiales diferentes para cada etapa			
n	$n = 4$		$n = 5$
ε	0.2585	$Q_c (W)$	0.8918
$I_1 (A)$	6	$I_1 (A)$	6
$A_1 (cm^2)$	0.1	$A_1 (cm^2)$	0.2
Enfriador de dos etapas (b) materiales iguales en ambas etapas			
n	$n = 5$		$n = 5$
ε	0.1495	$Q_c (W)$	0.5497
$I_1 (A)$	6	$I_1 (A)$	30
$A_1 (cm^2)$	0.3	$A_1 (cm^2)$	0.3

Tabla 13. Comparación de valores máximos para ε y Q_c

5. Conclusiones

Este trabajo muestra, que el empleo de materiales distintos en cada etapa, a saber PbTe y BiTe, de un enfriador termoeléctrico semiconductor de dos etapas mejora su

desempeño. En comparación con el caso cuando se utiliza el mismo material para ambas etapas, por ejemplo BiTe.

La optimización del sistema se realizó considerando la corriente I_1 , el área A_1 , el número de termopares n y utilizando termopares para la primera etapa en la que se utiliza de PbTe y en la segunda etapa se utiliza BiTe, el coeficiente de desempeño mejora cuando se tiene el valor menor de A_1 y n . Los valores óptimos de la capacidad de enfriamiento Q_c se obtienen de igual manera que en el caso anterior con A_1 menor pero con un mayor número de n . Los valores obtenidos usando PbTe en la primera etapa y BiTe en la segunda se incrementan en el coeficiente de desempeño un 73% y en la capacidad de enfriamiento 62% respecto a los valores obtenidos al utilizar dos etapas de BiTe, porcentajes representativos para la optimización del desempeño del modelo semiconductor termoeléctrico analizado.

Los resultados aquí obtenidos son la base para futuras optimizaciones de enfriadores termoeléctricos prácticos, además se pueden hacer análisis con diferentes parámetros, ya que mejorando el coeficiente de desempeño y la capacidad de enfriamiento las aplicaciones pueden abarcar un campo más amplio.

6. Referencias

- [1] S.Priya, D. Inman, Energy harvesting technologies. 2009. Springer. London, Nueva York. 337-340 pp.
- [2] S. B. Riffat, X. Ma, "Thermoelectrics: A review of present and potential applications". Applied thermal engineering. Vol. 23. January 2003. 913-935 pp.
- [3] M. Ma, J. Yu, "An analysis on a two-stage cascade thermoelectric cooler for electronics cooling applications". International journal of refrigeration. August 2013. 352-357 pp.

- [4] F. Meng, L. Chen, "Effects of thermocouples physical size on the performance of the TEG-THE system". *International journal of low-carbon*. December 2013. 1-8 pp.
- [5] Vikhor, L. Anatyshuk, "Theoretical evaluation of maximum temperature difference in segmented thermoelectric coolers". *Applied thermal engineering*. Vol. 26. January 2006. 1692-1696 pp.
- [6] X. Wang, Q. Wang, "Performance analysis of two-stage TECs (thermoelectric coolers) using a three-dimensional heat-electricity coupled model". *Energy*. Vol.38. January 2014. 419-429 pp.
- [7] M. Hamid, D. Abdulameer. "A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance". *Renewable and sustainable energy reviews*. Vol. 30. February, 2014. 337-355 pp.
- [8] J. Chen, Y. Zhou, "Comparision of the optimal performance of single- and two-stage thermoelectric refrigeration systems". *Applied energy*. Vol. 73. October 2002. 285-298 pp.
- [9] L. Kai-Zhen, L.Rui-Sheng, "Analysis of Performance and Optimum Configuration of Two-stage Semiconductor Thermoelectric Module". *Semiconductor Science and Technology*. Vol. 17. No.4. April 2008. 1349-1354 pp.
- [10] H. J. Goldsmith, *Introduction to Thermoelectricity*. 2010. Springer. London, Nueva York. 249 pp.
- [11] J. Yu, H. Zhao, "Analysis of Optimum Configuration of Two-stage Thermoelectric Modules". *Cryogenics*. Vol. 47. February 2007. 89-93 pp.
- [12] Everredtronics. www.everredtronics.com. Mayo, 2014.

7. Autores

Ing. Karen Anaid Rendón Cortés. Ingeniera Mecánica por el Instituto Politécnico Nacional en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME-Culhuacán). Actualmente es estudiante de Maestría en Ciencias de Ingeniería en Sistemas Energéticos en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME-Culhuacán) del Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Dr. Miguel Ángel Olivares Robles. Doctor en Ciencias por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-Iztapalapa). Recibió el grado de Maestro en Ciencias en Física y el Grado de Doctor en Ciencias 1994 y 1997 respectivamente, en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa (UAM - Iztapalapa). Realizó su Estancia Posdoctoral en el Department of Physics, Ohio University durante los años 1999 y 2000. Actualmente es Profesor Investigador Titular C, definitivo y de tiempo completo en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME- Culhuacan) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Es miembro del Sistema Nacional e Investigadores (SNI) ininterrumpidamente desde 1997 a la fecha.