

Análisis del Calor de Thomson en un Sistema Termoeléctrico Unidimensional de Dos Etapas

Pablo Eduardo Ruiz Ortega

Sección de Estudios de Posgrado e investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Culhuacán, IPN. Av. Santa Ana No 1000, Culhuacán, Coyoacán, 04430, México, D.F.
eduardo29491@hotmail.com

Miguel Ángel Olivares Robles

Sección de Estudios de Posgrado e investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Culhuacán, IPN. Av. Santa Ana No 1000, Culhuacán, Coyoacán, 04430, México, D.F.
olivares@ipn.mx

Linda Karina Toscano Medina

Sección de Estudios de Posgrado e investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Culhuacán, IPN. Av. Santa Ana No 1000, Culhuacán, Coyoacán, 04430, México, D.F.,
ltoscano@ipn.mx

Resumen

En este trabajo investigamos la influencia del efecto del calor de Thomson, τ , en el desempeño de un sistema termoeléctrico unidimensional de dos etapas, haciendo uso de las ecuaciones diferenciales que determinan la distribución de temperatura en un modelo unidimensional. Obtenemos las expresiones para determinar el coeficiente de desempeño, COP y la carga térmica, Q_c , en función de los coeficientes del calor de Thomson, τ_1 y τ_2 , correspondientes a cada etapa del sistema, respectivamente. Por otro lado, consideramos el caso en el que fluyen corrientes eléctricas distintas, I_1 y I_2 en cada etapa. Finalmente, comparamos nuestros resultados con resultados previos.

1. Introducción

Recientemente se ha incrementado el interés por la investigación en Cosecha o Recuperación de Energía, EH (en inglés EnergyHarvesting), que significa la provisión de energía requerida desde el medio ambiente. Este concepto es esencial por razones financieras y ambientales ya que la vida media de baterías restringe varias aplicaciones, por ejemplo, de sistemas sensores autónomos. Redes de sensores distribuidos dan lugar a diferentes aplicaciones tales como monitoreo médico en casa. Las fuentes de energía ambientales más comunes son los procesos industriales y la tecnología debido a que todos los días se pierde energía en estos procesos. Por ejemplo en centrales eléctricas - casi toda la energía eléctrica del mundo se genera por los motores térmicos. Estas son turbinas de gas o de vapor-accionado que convierten el calor en energía mecánica, que luego se convierte en electricidad. Aproximadamente dos tercios de la entrada de energía no se convierte en energía eléctrica, pero se pierde en forma de calor. También en los ordenadores y microondas (de hecho todos nuestros aparatos electrónicos) - pierden energía a través de calor y / o vibración. Diferentes tipos de energía de desecho pueden ser capturados utilizando diferentes materiales EH. Las tecnologías EH a micro-escala más prometedoras en desarrollo, incluyen aquellas en las que la vibración, movimiento y sonido se pueden capturar y transformar en energía eléctrica utilizando materiales piezoeléctricos [1,2]. El calor puede ser capturado y transformado en energía eléctrica utilizando materiales termoeléctricos y piroeléctricos [3]. Los efectos termoeléctricos son causados por el acoplamiento entre cargas de transporte y transporte de calor. En un dispositivo termoeléctrico Peltier, al considerar ambos la presencia de corriente eléctrica y un gradiente de temperatura, deben considerarse el calor de Joule y el Calor de Thomson [4]. Los dispositivos termoeléctricos pueden operar como generadores de potencia o como refrigeradores. De hecho, se han propuesto nuevos modelos físicos tanto para generadores termoeléctricos como para refrigeradores Peltier [5]. En estos modelos se incluyen el efecto Thomson, el calor de Peltier, el calor de Joule y el efecto Seebeck. Modelos unidimensionales de sistemas termoeléctricos se han propuesto para estudiar la influencia del calor de Thomson en el desempeño de los dispositivos

termoeléctricos que operan como refrigeradores [5,6]. En la mayoría de estos estudios se considera una sola etapa del sistema termoeléctrico.

En este trabajo realizamos el estudio de un sistema termoeléctrico unidimensional de dos etapas con propiedades termoeléctricas distintas en cada etapa, incluyendo el caso cuando fluyen corrientes distintas para cada etapa. El trabajo está organizado como sigue. En la sección 2, describimos el sistema termoeléctrico de dos etapas considerado y las ecuaciones que gobiernan su comportamiento en una dimensión. En la sección 3, mostramos el comportamiento del coeficiente de desempeño, COP , y la carga térmica Q_c , en función de la relación de los coeficientes de Thomson, τ_1 y τ_2 , de cada etapa. En la sección 4, consideramos el caso cuando fluyen corrientes distintas en cada etapa y su efecto en el COP y Q_c . En la sección 5 discutimos nuestros resultados mencionando su relación con algunas propuestas tecnológicas y finalmente, en la sección 6 se encuentran nuestras conclusiones.

2. Modelo 1D del sistema Termoeléctrico (TE)

La configuración del sistema TE de dos etapas considerado en este trabajo, se muestra en la Fig. 1. Esta figura muestra que las dos etapas que componen al sistema TE, se encuentran conectadas eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. El sistema se encuentra operando entre dos fuentes térmicas, una fuente caliente a temperatura T_h , y otra fuente fría a temperatura T_c , con temperaturas $T_h > T_c$. Cada etapa está formada por pares termoeléctricos, que están compuestos a su vez de semiconductores tipo N y P , conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Al fluir la corriente eléctrica, I , a través del circuito, la etapa 1 absorbe una cantidad de calor Q_c de la fuente térmica caliente y libera una cantidad de calor Q_m , a la segunda etapa, que a su vez libera una cantidad de calor Q_h a la fuente térmica fría.

El sistema es usado como una bomba de calor en el que la temperatura, T_h , de uno de los reservorios es mayor que la temperatura T_c del segundo reservorio y la tasa de

bombeo de calor es Q_h . Por otro lado, si el sistema TE, es usado como un refrigerador termoeléctrico, el reservorio a T_c es el espacio enfriado y el calor absorbido es Q_c . Las temperaturas T_{11} y T_{12} son las temperaturas en el interior de los semiconductores tipo N y P de la primera etapa y T_{21} y T_{22} son las temperaturas correspondientes en el termopar de la segunda etapa. Estas temperaturas son funciones de la posición [6].

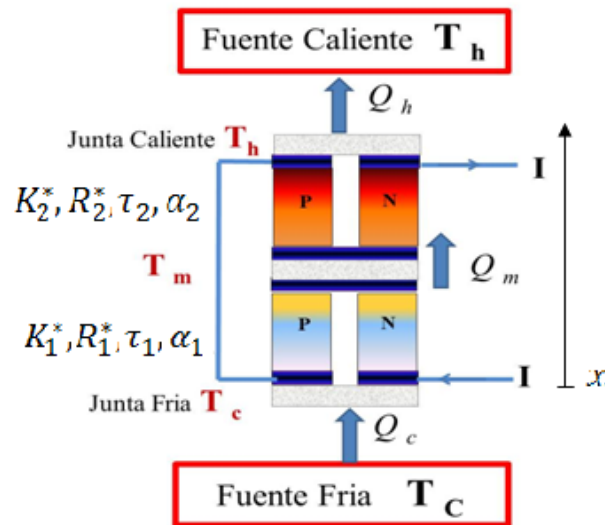


Fig. 1. Sistema termoeléctrico de dos etapas.

De acuerdo a la termodinámica fuera de equilibrio cuando se establece un flujo de densidad de corriente eléctrica, J , a través del material semiconductor entre un gradiente de temperatura, tenemos que

$$\nabla \cdot J_u = -\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + T J \cdot \nabla \alpha - J \cdot \frac{J}{\sigma} \quad (1)$$

donde J_u es la densidad de la corriente de energía en el interior del material semiconductor a una temperatura T , α es el coeficiente de Seebeck, λ es la conductividad térmica y σ es la conductividad eléctrica. Aquí, α varía con el material y la temperatura T , mientras que λ y σ dependen del material [6] y de la geometría del semiconductor.

Asumimos que la construcción de los semiconductores es homogénea; λ y σ son constantes. Las longitudes, sección transversal uniforme, conductividades térmicas, conductividades eléctricas, coeficiente de Seebeck y coeficiente de Thomson de los elementos tipo N y P son L_{ij} , S_{ij} , λ_{ij} , σ_{ij} , α_{ij} , τ_{ij} , respectivamente, con $i = 1$ y $j = 1,2$ para la primera etapa y con $i = 2$ y $j = 1,2$ para la segunda etapa. Los elementos de la primera etapa y de la segunda están aislados, eléctrica y térmicamente, de los alrededores, excepto en la unión de contacto, donde tenemos el calor Q_c absorbido en la primera etapa, y Q_m absorbido por la segunda etapa.

A partir de la ecuación (1), cuando una corriente I fluye por el sistema tenemos que la ecuación de conducción de calor en los elementos semiconductores tipo N y P respectivamente, está dada para la primera etapa con $i = 1$ y $j = 1,2$ como

$$K_{ij}L_{ij} \frac{d^2T_{ij}}{dx^2} + \tau_{ij}I \frac{dT_{ij}}{dx} + \frac{R_{ij}I^2}{L_{ij}} = 0 \quad 0 \leq x \leq L_{ij} \quad (2)$$

Y en la segunda etapa para $i = 2$ y $j = 1,2$ como,

$$K_{ij}L_{ij} \frac{d^2T_{ij}}{dx^2} + \tau_{ij}I \frac{dT_{ij}}{dx} + \frac{R_{ij}I^2}{L_{ij}} = 0 \quad L_{11} \leq x \leq L_{ij} \quad (3)$$

con condiciones de frontera,

$$T_{11}(0) = T_{12}(0) = T_c \quad (4)$$

$$T_{11}(L_{11}) = T_{12}(L_{12}) = T_m \quad (5)$$

$$T_{21}(L_{11}) = T_{22}(L_{12}) = T_m \quad (6)$$

$$T_{21}(L_{21}) = T_{22}(L_{22}) = T_h \quad (7)$$

Las ecuaciones de balance para el flujo de calor son

$$Q_c = (\alpha_{12}^c - \alpha_{11}^c)T_c I - K_{11}L_{11} \frac{d^2 T_{11}}{dx^2} - K_{12}L_{12} \frac{d^2 T_{12}}{dx^2} \quad (8)$$

$$Q_{m1} = (\alpha_{12}^{m1} - \alpha_{11}^{m1})T_m I - K_{11}L_{11} \frac{d^2 T_{11}}{dx^2} - K_{12}L_{12} \frac{d^2 T_{12}}{dx^2} \quad (9)$$

$$Q_{m2} = (\alpha_{22}^{m2} - \alpha_{21}^{m2})T_m I - K_{21}L_{21} \frac{d^2 T_{21}}{dx^2} - K_{22}L_{22} \frac{d^2 T_{22}}{dx^2} \quad (10)$$

$$Q_h = (\alpha_{22}^h - \alpha_{21}^h)T_h I - K_{21}L_{21} \frac{d^2 T_{21}}{dx^2} - K_{22}L_{22} \frac{d^2 T_{22}}{dx^2} \quad (11)$$

donde: $K_{ij} = \frac{\lambda_{ij} S_{ij}}{L_{ij}}$, $R_{ij} = \frac{L_{ij}}{\sigma_{ij} S_{ij}}$, cuando $i = 1,2$ y $j = 1,2$ para $i \geq j$, son las conductividades térmicas y resistencias eléctricas. Los subíndices c y h denotan las temperaturas baja y alta de las uniones respectivamente, y m_1 y m_2 denotan la temperatura media para la primer etapa y la segunda, respectivamente.

El coeficiente del calor Thomson viene dado por

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (12)$$

3. Coeficiente de desempeño (COP) y Carga Térmica (Q_c)

Resolviendo las ecuaciones (2) a (7), obtenemos la distribución de temperaturas, T_{11} y T_{12} , para cada elemento de la termocupla en la etapa 1,

$$T_{1(1,2)} = T_{(c,m)} \mp A_{1(1,2)} x + \frac{\Delta T \pm A_{1(1,2)} L_{1(1,2)}}{1 - e^{\mp \omega_{1(1,2)} L_{1(1,2)}}} (1 - e^{\mp \omega_{1(1,2)} x}) \quad 0 \leq x \leq L_{1(1,2)} \quad (13)$$

y las correspondientes temperaturas, T_{21} y T_{22} , para la etapa 2,

$$T_{2(1,2)} = T_{(m,h)} \mp A_{2(1,2)}x + \frac{\Delta T \pm A_{2(1,2)}L_{2(1,2)}}{1 - e^{\mp\omega_{2(1,2)}x}} L_{1(1,2)} \leq x \leq L_{2(1,2)} \quad (14)$$

Donde $\omega_{ij} = \frac{\tau_{ij}l}{K_{ij}L_{ij}}$, $A_{ij} = \frac{R_{ij}l}{\tau_{ij}L_{ij}}$, cuando $i = 1,2$ y $j = 1,2$ para $i \geq j$, sustituyendo las ecuaciones (13) y (14) en las ecuaciones de flujo de calor, (8)-(11), obtenemos que,

$$Q_c = \alpha_1^c T_c I - K_1^*(T_m - T_c) - (R_1^* + R_1)I^2 \quad (15)$$

$$Q_{m1} = \alpha_1^m T_m I - K_1^*(T_m - T_c) - \tau_1(T_m - T_c) - R_1^*I^2 \quad (16)$$

$$Q_{m2} = \alpha_2^m T_m I - K_2^*(T_h - T_m) - (R_2^* + R_2)I^2 \quad (17)$$

$$Q_h = \alpha_2^h T_h I - K_2^*(T_h - T_m) - \tau_2(T_h - T_m) - R_2^*I^2 \quad (18)$$

Donde $\alpha_1^k = \alpha_{12}^k - \alpha_{11}^k$ para $k = c, m$ y $\alpha_2^l = \alpha_{22}^l - \alpha_{21}^l$ para $l = m, h$; $R_j = R_{j1} + R_{j2}$; $\tau_j = \tau_{j2} - \tau_{j1}$; $R_j^* = [R_{j1}^* + R_{j2}^* - (R_{j1} + R_{j2})]$ con $j = 1,2$.

Para calcular el coeficiente de desempeño del sistema,

$$\psi = \frac{Q_h}{Q_h - Q_c} \quad (19)$$

en función de las temperaturas, T_h y T_c , igualamos las ecuaciones (16) y (17) para obtener el valor de T_m

$$T_m = \frac{I^2(R_1^* - R_2^* - R_2) - T_c(K_1^* + \tau_1 I) - K_2^* T_h}{I(\alpha_1^m - \alpha_2^m - \tau_1) - (K_1^* + K_2^*)} \quad (20)$$

donde

$$K_j^* = K_{j1}^* + K_{j2}^*, K_{j1}^* = \frac{\tau_{j1}l}{1 - e^{-\omega_{j1}L_{j1}}}, K_{j2}^* = \frac{\tau_{j2}l}{e^{\omega_{j2}L_{j2}-1}}, R_{j1}^* = R_{j1} \left(\frac{1}{1 - e^{-\omega_{j1}L_{j1}}} - \frac{1}{\omega_{j1}L_{j1}} \right)$$

$$R_{j2}^* = R_{j2} \left(\frac{1}{\omega_{j2} L_{j2}} - \frac{1}{e^{\omega_{j2} L_{j2} - 1}} \right) \text{conj} = 1,2$$

Sustituyendo el valor de la temperatura T_m dada por la ecuación (20) en las ecuaciones (15) y (18), obtenemos los flujos de calor, Q_h , y Q_c , de función de las temperaturas, T_h y T_c .

4. Corrientes Distintas en Cada Etapa: Relación de Corrientes I_r

Ahora consideramos el caso cuando en el sistema fluyen dos corrientes de entrada, una para cada etapa del sistema (ver Fig. 2). Nuestro objetivo es analizar el comportamiento del COP del sistema. En nuestros cálculos numéricos usaremos la relación entre corrientes,

$$I_r = \frac{I_1}{I_2} \quad (21)$$

En el caso de corrientes distintas, I_1 y I_2 , para cada etapa (ver Fig. 2), se tienen las siguientes ecuaciones para los flujos de calor

$$Q_c = \alpha_1^c T_c I_1 - K_1^* (T_m - T_c) - (R_1^* + R_1) I_1^2 \quad (22)$$

$$Q_{m1} = \alpha_1^m T_m I_1 - K_1^* (T_m - T_c) - \tau_1 (T_m - T_c) - R_1^* I_1^2 \quad (23)$$

$$Q_{m2} = \alpha_2^m T_m I_2 - K_2^* (T_h - T_m) - (R_2^* + R_2) \quad (24)$$

$$Q_h = \alpha_2^h T_h I_2 - K_2^* (T_h - T_m) - \tau_2 (T_h - T_m) - R_2^* I_2^2 \quad (25)$$

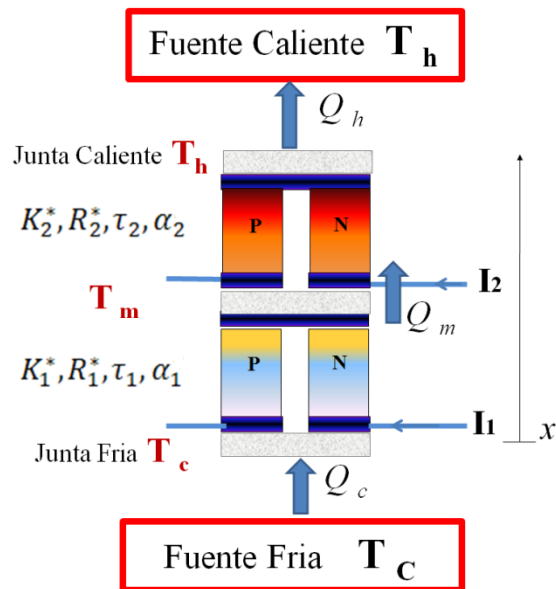


Fig. 2. Sistema termoelectrico de dos etapas con corrientes diferentes I_1 y I_2 .

A partir de las ecuaciones (23) y (24), haciendo uso de la continuidad del flujo de calor entre ambas etapas, $Q_{m1} = Q_{m2}$, obtenemos la temperatura media, T_m , entre las etapas del sistema,

$$T_m = \frac{R_1^* I_1^2 - \tau_1 T_c I_1 - K_1^* T_c - K_2^* T_h - (R_2^* + R_2) I_2^2}{I_1 (\alpha_1^m - \tau_1) - (K_1^* + K_2^*) - \alpha_2^m I_2} \quad (26)$$

Sustituyendo este resultado en las ecuaciones (22) y (25), obtenemos los flujos de calor en función de las corrientes I_1 y I_2 . Estos resultados nos permiten calcular el COP del sistema como función del cociente, I_r , de las corrientes eléctricas.

5. Resultados

Cociente de los Coeficientes de Thomson $\tau_r = \tau_1/\tau_2$.

Nuestro interés es comparar que el efecto tiene el calor de Thomson en el sistema termoelectrico de dos etapas y el sistema de una sola etapa [3]. La Fig. 3 y Fig.4 muestran

el comportamiento del COP en una etapa y en dos etapas, respectivamente. Los materiales Bi_2Te_3 y $(Bi_{0.5}Sb_{0.5})Te_3$ [4] se utilizan como elementos tipo N y P . Consideramos elementos tipo N y P con longitudes y áreas transversales iguales.

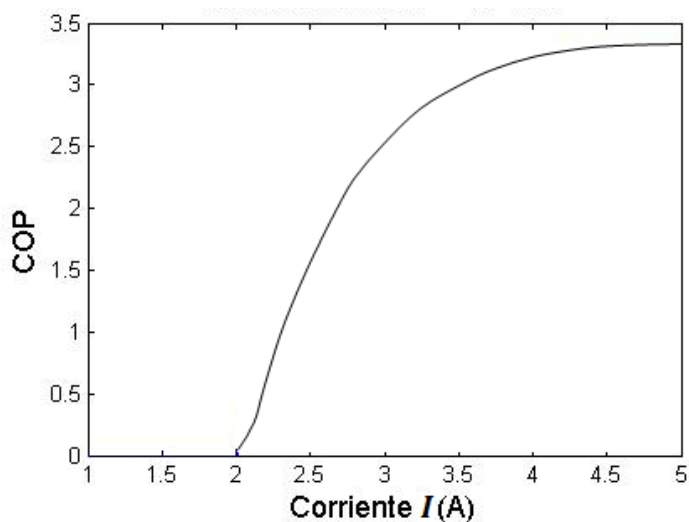


Fig. 3. Variación del COP con respecto de la corriente I en el sistema termoelectrico de una sola etapa. $COP_{max} = 3.2845$ cuando la corriente $I = 4.9$. Para un $\tau = 6.7 \times 10^{-5} \frac{V}{K}$.

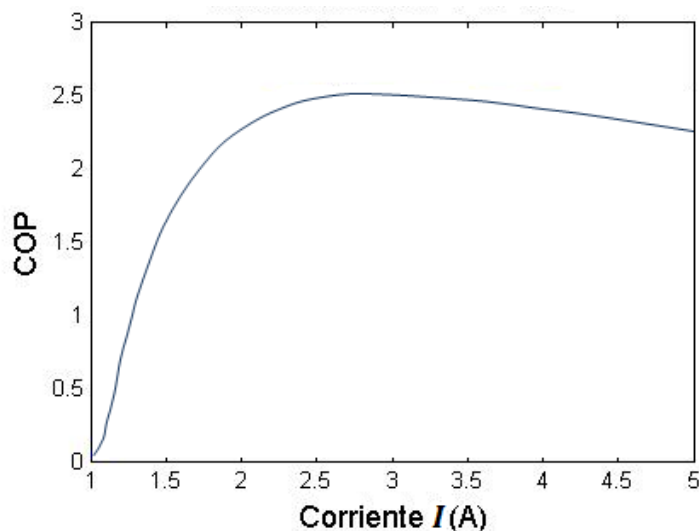


Fig. 4. Variación del COP con respecto de la corriente I en el sistema termoelectrico de dos etapas. $COP_{max} = 2.8$ cuando la corriente $I = 2.8$. Para una relación $\tau_r = \frac{\tau_1}{\tau_2} = 0,5583$.

Los resultados obtenidos en la Fig. 3 y Fig. 4 muestran una variación importante en el comportamiento del COP del sistema termoelectrico de una y dos etapas. Definimos la relación de coeficientes de Thomson de la primera y segunda etapa,

$$\tau_r = \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad (27)$$

Donde $\tau_1 = \tau_{12} - \tau_{11}$ y $\tau_2 = \tau_{22} - \tau_{21}$. A partir de la ecuaciones (27) y (19), obtenemos el comportamiento del COP en función del coeficiente Thomson, τ_r , mostrado en la Fig. 5. Usando la ecuación (15) obtenemos el flujo de calor Q_c en función del cociente, τ_r (ver Fig. 6). La Fig. 5 y Fig. 6 muestran el comportamiento del COP y el calor Q_c , en términos de τ_r para diferentes valores de la corriente I , que fluye en ambas etapas del sistema.

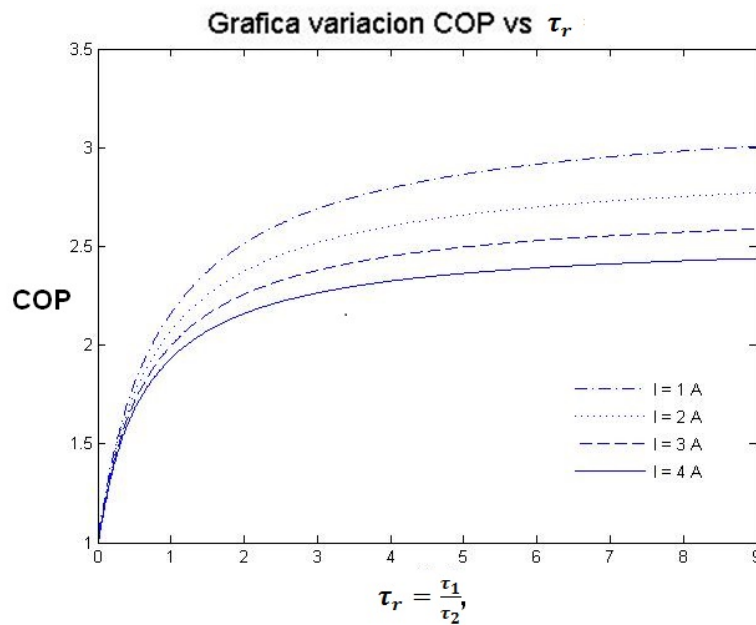


Fig. 5. Variación del COP con respecto de la relación $\tau_r = \frac{\tau_1}{\tau_2}$, para diferentes valores de la la corriente I , que fluye en ambas etapas del sistema.

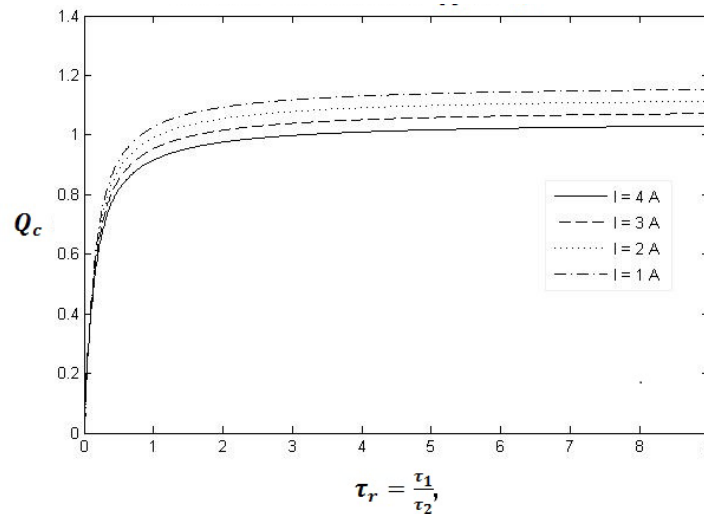


Fig. 6. Gráfica Variación de Q_c vs con respecto de la relación $\tau_r = \frac{\tau_1}{\tau_2}$, para diferentes valores de la corriente I , que fluye en ambas etapas del sistema.

Relación de Corrientes Diferentes $I_r = I_1/I_2$.

Finalmente, la Fig. 7 y Fig. 8 muestran el comportamiento del COP del sistema, para el caso cuando las corrientes eléctricas que fluyen en cada etapa son diferentes.

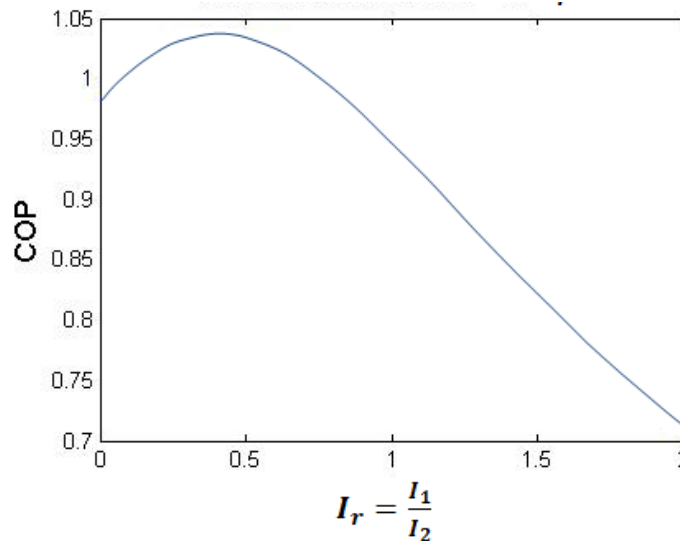


Fig. 7. Variación del COP con respecto de la relación $I_r = \frac{I_1}{I_2}$. $COP_{max} = 1.043$ cuando la corriente $I_r = 0.42$, para un valor de $\tau_r = \frac{\tau_1}{\tau_2} = 0.5583$.

En la Fig. 8, los valores de COP_{max} para diferentes valores de τ_r se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de COP_{max} y de I_r .

τ_r	COP_{max}	I_r
0.55	1.23	0.49
1.1	1.227	$I_r = 0.51$
1.65	1.228	0.513

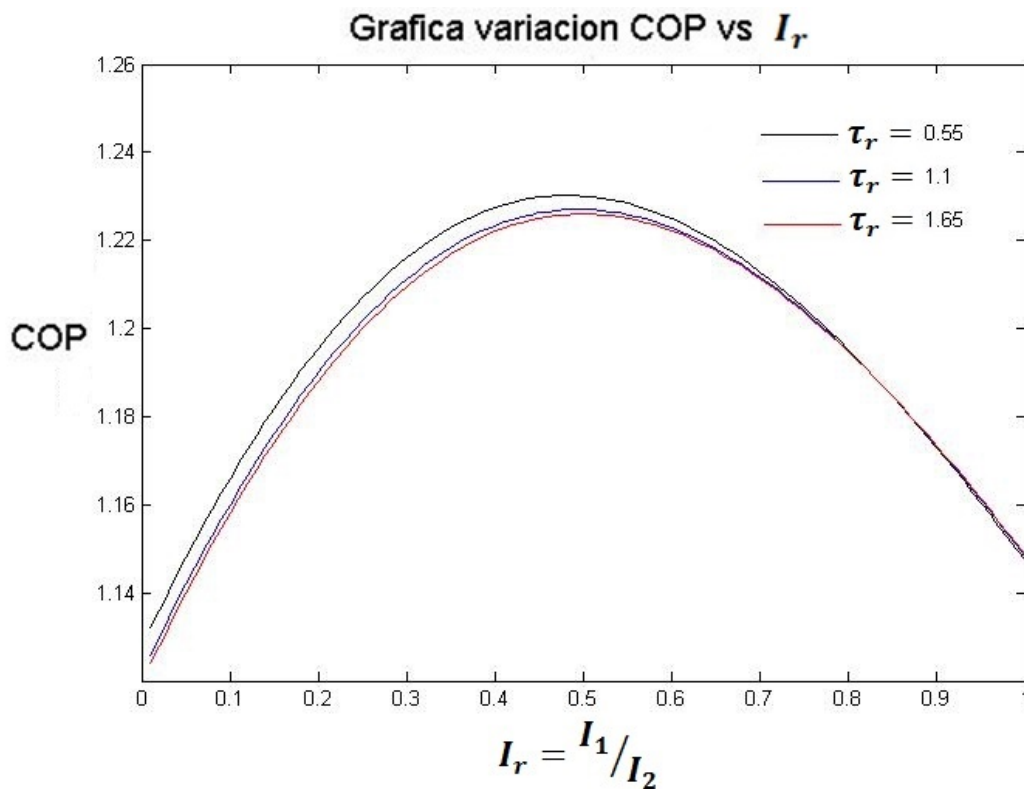


Fig. 8. Variación del COP con respecto de la relación I_r para diferentes valores de τ_r .

6. Discusión

La Fig. 3 y Fig. 4 muestran el comportamiento del COP en función de la corriente, I , que fluye en los sistemas de una y dos etapas. Nótese que ambos casos es posible alcanzar el valor para el $COP \approx 3$ pero con un valor de la corriente de $I \approx 5$ en el sistema de una sola etapa y $I \approx 3$ en el sistema de dos etapas. Este comportamiento se obtiene para valores fijos del calor de Thomson, τ_1 y τ_2 , para la primera y segunda etapa, respectivamente. La importancia de este resultado que con el sistema de dos etapas es posible alcanzar un COP cercano al sistema de una sola etapa, en el sistema de dos etapas pero con la mitad del valor de la corriente correspondiente al sistema de una sola etapa.

Para analizar el efecto del calor de Thomson, a pesar de ser un valor pequeño, en el COP del sistema definimos la relación $\tau_r = \frac{\tau_1}{\tau_2}$. Las Fig. 5 y 6 muestran el valor del COP y de Q_c para el sistema de dos etapas para diferentes valores de la corriente fluyen en ambas etapas. Nótese que conforme aumenta la corriente eléctrica en el sistema el desempeño del sistema disminuye. Sin embargo, las Fig. 7 y 8 muestran que el desempeño del sistema mejora en el caso cuando la relación de calor de Thomson $\tau_r = \tau_1/\tau_2$ aumenta, conforme variamos la relación de corrientes diferentes que fluyen en cada etapa del sistema.

Nuestros resultados son útiles como guía en el diseño de módulos termoeléctricos de diferentes etapas (véase Fig. 9). Por ejemplo, dispositivos de películas delgadas que tienen material termoeléctrico muy delgado que van desde 0.0005 a 0.0004 cm [13]. Finalmente nuestro análisis puede ser generalizado para múltiples etapas como los sistemas mostrados en la Fig. 11. Los dispositivos de varias etapas son utilizados cuando los usuales de una etapa no son capaces de proveer la diferencia de temperatura requerida, además las múltiples etapas incrementan la ΔT alcanzable además conduce a mas poder de consumo.

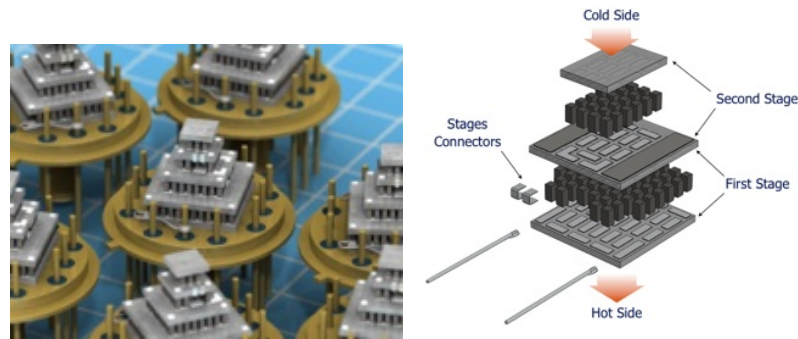


Fig. 9. Módulos termoelectricos de múltiples etapas.

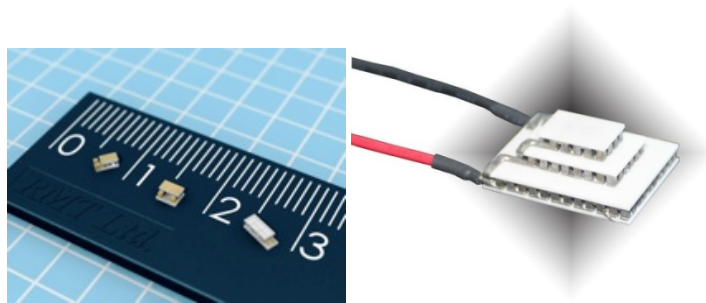


Fig. 11. Tamaño real de los módulos termoelectricos.

Finalmente, nos permitimos mencionar una aplicación industrial sencilla, de sistemas termoelectricos pequeños, en la que en un reloj se aprovecha el calor del cuerpo humano y transfórmalo en energía eléctrica para su funcionamiento evitando de esta manera el uso de baterías [15]. Mientras estas tecnologías progresan podremos empezar a ver, en pocos años, que los generadores termoelectricos se usaran más en nuestra vida diaria.



Fig. 11. Termoelectricos en dispositivos de uso común.

7. Conclusiones

En este trabajo obtenemos las curvas del COP del sistema, en función de la relación $\tau_r = \frac{\tau_1}{\tau_2}$ del calor de Thomson, observando que el desempeño del sistema aumenta al incrementar la relación τ_r . Nuestros resultados muestran la dependencia que tiene el COP con el calor de Thomson. Además el comportamiento del COP en el caso de corrientes distintas para la primera y segunda etapa muestra el valor de corrientes óptimo del sistema.

6. Referencias

- [1] A. Abdelkefi, A. Nuhait, "Modeling and performance analysis of cambered wing-based piezoaeroelastic energy harvesters". *Smart Mater. Struct.* 22. 2013. 095029.
- [2] A. Bitschi, "Direct Heat to Electricity Conversion". *Modelling of thermoelectric devices for electric power generation*, 1a Ed. 2009. ETH Zurich. Suiza. Cap. 1, pp. 13.
- [3] G.J. Snyder, "Thermoelectric Energy Harvesting". *Energy Harvesting Technologies*. 1a Ed. 2009. Springer. New York. USA. Cap. 11. 325.
- [4] W. Seifert, M. Ueltzen, E. Muller, "One-dimensional Modelling of Thermoelectric Cooling". *Phys. Stat. Sol. (a)*. 194.2002. 277-290.
- [5] M. Freunek, M. Mueller, T. Ungan, W. Walker, L. Reind, "New Physical Model for Thermoelectric Generators". *Journal of Electronic Materials*. 38. 2009. 1214-1220.
- [6] J. Chen, Z. Yan, L. Wu, "Non-equilibrium Thermodynamic Analysis of a Thermoelectric Device". *Energy*. 22. 1997. 979-985.
- [7] M. W. Zemansky, *Heat and Thermodynamics*. 5 Ed. 1968. McGraw-Hill. New York.
- [8] Lampinen, M. J., *Journal of Applied Physics*, 1991, 69, 4318.
- [9] W. A. Kaysser, "Functionally Graded Materials", Vols. 308-311, 1999.
- [10] G. J. Snyder. "Small Thermoelectric Generators", *The Electrochemical Society Interface*, pp. 54-56, 2008
- [11] H. J. Goldsmith, *Introduction to Thermoelectricity*, 1a Ed. 2009. Interscience Publishers.

- [12] Centrodeartigos.com/articulos-noticias-consejos/article_142698.html
- [13] http://www.tec-microsystems.com/EN/Intro_Thermoelectric_Coolers.html
- [14] http://www.deltron.ch/pdf/produkte/peltier/multistage_tems.pdf
- [15] <http://www.bitrebels.com/technology/watch-powered-by-body-heat/>

7. Autores

Ing. Pablo Eduardo Ruiz Ortega es Ingeniero Mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez, actualmente estudiante de Maestría de Ingeniería en Sistemas Energéticos en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) unidad Culhuacán, del IPN.

Dr. Miguel Angel Olivare Robles, 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 Unidad Culhuacan (ESIME-Culhuacan) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) ininterrumpidamente desde 1997 a la fecha.

Dra. Linda Karina Toscano Medina, Recibió el Título de Ingeniero en Computación y Doctor en Comunicaciones y Electrónica, en el Instituto Politécnico Nacional, Miembro del Sistema Nacional de Investigadores SNI.