

Efecto del coeficiente convectivo y Thomson sobre un TEC en estado transitorio

M. en C. Olao Yair Enciso Montes de Oca¹, Dr. Miguel Ángel Olivares Robles², Dr. Pablo Eduardo Ruiz Ortega³, M. en C. Cristian Francisco Ramos Castañeda⁴

Resumen: Los enfriadores termoelectricos (TEC) son dispositivos que operan al aplicar un flujo de corriente eléctrica para generar una absorción de calor en un extremo y rechazarlo en el otro. El efecto Thomson se da en un material cuando se hace pasar una corriente eléctrica y existe un gradiente de temperatura; este absorberá o disipará calor dependiendo de la dirección de la corriente eléctrica. En este trabajo se optimiza la capacidad de enfriamiento de un TEC mediante la relación geométrica, $\frac{A}{L}$, pulsos de corriente eléctrica, coeficiente convectivo y considerando el coeficiente Thomson en las ecuaciones que gobiernan el comportamiento térmico del enfriador. También se desarrolla un modelo numérico para el sistema de enfriamiento termoelectrico tomando en cuenta la transferencia de calor en estado transitorio unidimensional y utilizando el material semiconductor Bi_2Te_3 . Los resultados de este análisis ayudan a comprender en qué condiciones específicas el enfriador termoelectrico presenta la potencia de enfriamiento más alta y la temperatura mínima más baja.

Palabras clave: Transitorio, coeficiente convectivo, pulsos eléctricos, efecto Thomson, configuración geométrica.

Introducción

Tanto los generadores termoelectricos (TEG) como los enfriadores termoelectricos (TEC) están conformados por varios pares de elementos semiconductores tipo p y tipo n conectados eléctricamente en serie por una lámina de cobre y sellado por un material cerámico de alúmina en los lados superior e inferior. La configuración geométrica de los termoelementos semiconductores es un parámetro importante para tener la temperatura mínima más baja y una buena absorción de la carga enfriamiento por parte un enfriador termoelectrico. Otros factores que influyen en el enfriamiento y la potencia, son el coeficiente de convección, la intensidad de corriente optima de trabajo y las propiedades de los materiales utilizados. Es por ello, que también es importante analizar la temperatura mínima alcanzada por parte de un enfriador termoelectrico controlando u obtenido los valores óptimos de parámetros como el coeficiente convectivo y la intensidad de corriente, tal como lo reportan Manikandan et al.

En este trabajo tomaremos en consideración el coeficiente Thomson del material, y compararemos nuestros resultados cuando es tomado en cuenta y cuando no. Nuestra teoría se basa a que posiblemente haya una disminución en la temperatura mínima alcanzada en el lado frio del TEC. Esto se debe a que cuando se hace pasar una corriente eléctrica a través de los semiconductores y existe un gradiente de temperatura, estos absorben o liberan calor. El superenfriamiento es una forma de disminuir la temperatura mínima en el lado frio alcanzada por un TEC, al aplicar un pulso de corriente y fijar un coeficiente de convección adecuado para disipar el calor, la temperatura del lado frio disminuye rápidamente debido al efecto Peltier y posteriormente aumenta hasta un determinado valor debido a la conducción de calor por Fourier y a la acumulación del calor debido al efecto Joule. Snyder et al. (2002) demostró, numérica y experimentalmente que, aplicar pulsos de corriente eléctrica sobre un TEC, la temperatura en la unión fría decrece exponencialmente, las temperaturas alcanzadas son comparables a las obtenidas en sistemas de dos etapas. Estudios previos (Shen et al., 2012) se han enfocado en mejorar la relación geométrica, $\frac{A}{L}$, de los termoelementos para optimizar la potencia de enfriamiento. Nuevas geometrías han sido analizadas para optimizar el desempeño y la eficiencia de estos sistemas (Badillo-Ruiz, C. A. et al., 2018). Actualmente algunos estudios (C. Selvam, S.

¹ El M. en C. Olao Yair Enciso Montes de Oca es actualmente estudiante de doctorado en Nanociencias y Micro-nanotecnologías en la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas Unidad Zacatenco (ENCB Zacatenco) Instituto Politécnico Nacional (IPN) olaoyairenciso1991@gmail.com

² El Dr. Miguel Ángel Olivares Robles recibió el grado de Maestro en Ciencias en Física y el Grado de Doctor en Ciencias en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-Iztapalapa), actualmente es Profesor Investigador Titular, definitivo y de tiempo completo en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Culhuacán del IPN olivares@ipn.mx (autor correspondiente)

³ El Dr. Pablo Eduardo Ruiz Ortega recibió el grado de doctor en Nanociencias y Micro-nanotecnologías por parte de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas Unidad Zacatenco (ENCB Zacatenco) Instituto Politécnico Nacional (IPN), eduardo29491@gmail.com

⁴ El M. en C. Cristian Francisco Ramos Castañeda es actualmente estudiante de doctorado en Nanociencias y Micro nanotecnologías en la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas Unidad Zacatenco (ENCB Zacatenco) Instituto Politécnico Nacional (IPN), crisur1393@gmail.com

Manikandan et al., 2019) han presentado una técnica nueva para optimizar el rendimiento de los TEC's bajo pulsos eléctricos variables utilizando material con cambio de fase (PCM) en el lado del dissipador de calor. Estos estudios han concluido que el uso de materiales con cambio de fase, junto con un buen coeficiente de convección, incrementan el coeficiente de desempeño en enfriadores y la eficiencia en generadores.

Descripción del Método

Composición del modelo de un Enfriador Termoeléctrico

La composición estructural de un enfriador termoeléctrico (TEC) consta de una cerámica y una placa en el lado frío, mientras que el lado caliente del dispositivo consta de un dissipador de calor sobre una placa cerámica. La figura 1 ilustra los componentes que conforman un enfriador termoeléctrico con los termoelementos p y n conectados en eléctricamente en serie. Las propiedades del material utilizado no son dependientes de la temperatura y se pueden observar en la tabla 1. El material usado en este análisis numérico es Bi_2Te_3 debido a que los módulos termoeléctricos presentan un alto desempeño.

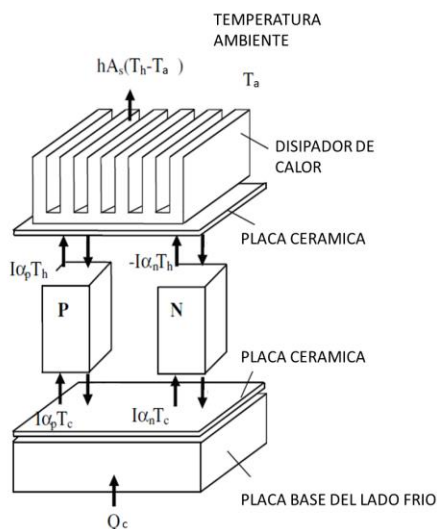


Figura 1. Elementos que Conforman a un TEC.

Parametro del Material	Valor
$C_p, C_n (J Kg^{-1}K^{-1})$	200
$C_{c,c}, C_{c,h} (J Kg^{-1}K^{-1})$	419
$C_{b,c}, C_{b,h} (J Kg^{-1}K^{-1})$	400, 850
$m_{c,c}, m_{c,h} (Kg)$	2.95×10^{-5}
$m_{b,c}, m_{b,h} (Kg)$	8.64×10^{-5}
$D_p, D_n (Kg m^{-3})$	10922.08
$T_a (K)$	300
$k_p + k_n (W m^{-1}K^{-1})$	3.363
$\rho_p + \rho_n (\Omega m)$	2.10×10^{-5}
$\alpha_p - \alpha_n (V K^{-1})$	420×10^{-6}
$\tau_p - \tau_n (V K^{-1})$	120×10^{-6}
$A_p, A_n (m^2)$	12.25×10^{-6}
$L_p, L_n (m)$	4.25×10^{-3}
N	24

Tabla 1. Tabla de Propiedades de los Termoelementos.

Ecuaciones de Balance de Energía y Efecto Thomson

El número total de módulos de enfriadores termoeléctricos usados en este estudio es 24 y cada enfriador termoeléctrico tiene 127 termopares. Para simplificar el modelado numérico, se ha asumido un modelo unidimensional de transferencia de calor en estado transitorio y se ha establecido el balance de energía en el lado caliente, lado frío y en los termoelementos. El balance de energía de los termoelementos en el lado frío, está dado por la siguiente ecuación:

$$(m_{b,c}C_{b,c} + m_{c,c}C_{c,c}) \frac{dT_c}{dt} = Q_c + \kappa A \frac{dT}{dx} - I\alpha T_c \quad (1)$$

donde $m_{b,c}$ y $m_{c,c}$ son la masa de la placa base y el cerámico en el lado frío respectivamente y, $C_{b,c}$ y $C_{c,c}$, son el calor específico de la placa base y la placa cerámica en el lado frío respectivamente. Los términos Q_c , $\kappa A \frac{dT}{dx}$ y $I\alpha T_c$ son la carga de enfriamiento, la conducción de calor debido a la ley de Fourier y calor de Peltier, respectivamente. La ecuación de balance de energía en el lado caliente del TEC es:

$$(m_{b,c}C_{b,c} + m_{c,c}C_{c,c}) \frac{dT_h}{dt} = I\alpha T_h - \kappa A \frac{dT}{dx} - hA_s(T_h - T_a) \quad (2)$$

donde κ , α , A_s , I y h son la conductividad térmica, el coeficiente Seebeck, el área superficial de la placa cerámica, la intensidad de corriente y el coeficiente de convección. La ecuación de balance de energía para los elementos tipo p y tipo n , es la siguiente:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \left(\frac{\tau I}{kA}\right) \frac{dT}{dx} + \frac{I^2 \rho}{kA^2} = \left(\frac{DC_p}{k}\right) \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

donde T , A , τ y t son la temperatura, el área de sección transversal de los termoelementos, el coeficiente Thomson y el tiempo, respectivamente. La consideración del efecto Thomson nos ayudara a entender de qué manera la distribución de temperatura en el lado frio y a la carga de enfriamiento que puede absorber el TEC, sin presentar un sobrecalentamiento, se ven afectadas. El resultado esperado al considerar este efecto, es una disminución de la temperatura mínima T_c y un aumento en la carga de enfriamiento absorbida por el TEC.

Se ha utilizado el método de diferencias finitas implícitas simples para proceder con la discretización de las ecuaciones diferenciales, ya que siempre es estable y más preciso en comparación con el método explícito simple. Primeramente se divide a los termoelementos tipo p y tipo n en M número de partes iguales con una longitud Δx y luego se enumeran los nodos desde $i = 0$ hasta $i = M + 1$, donde Δx está definida como $\Delta x = L/M$, y L es la longitud total de los termoelementos. Aplicando este método para aproximar las ecuaciones de balance de energía, obtenemos las ecuaciones discretas para cada parte del dispositivo termoelectrico. La siguiente ecuación es la forma discreta del lado frio de los termoelementos, el nodo $i = 0$:

$$\begin{aligned}
 -T_o^{n+1} \left[\left(\frac{M_c C_c 2\Delta x}{kA\Delta t} \right) \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{a}{2\Delta x} \right) + \left(\frac{I\alpha 2\Delta x}{kA} \right) \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{a}{2\Delta x} \right) + \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{1}{F\Delta t} \right) \right] \\
 + T_1^{n+1} \left[\frac{2}{\Delta x^2} \right] + T_o^n \left[\left(\frac{M_c C_c 2\Delta x}{kA\Delta t} \right) \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{a}{2\Delta x} \right) + \frac{1}{F\Delta t} \right] \\
 + \left[\left(\frac{Q_c 2\Delta x}{kA} \right) \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{a}{2\Delta x} \right) + b \right] = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

El subíndice i indica el número de nodo y el superíndice n indica el incremento en el tiempo. La versión discreta de la ecuación para la temperatura en el lado caliente se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 -T_M^{n+1} \left[\left(\frac{M_h C_h 2\Delta x}{kA\Delta t} \right) \left(\frac{1}{\Delta x^2} - \frac{a}{2\Delta x} \right) - \left(\frac{I\alpha 2\Delta x}{kA} \right) \left(\frac{1}{\Delta x^2} - \frac{a}{2\Delta x} \right) + \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{1}{F\Delta t} \right) \right] \\
 + \left(\frac{hA_s 2\Delta x}{kA} \right) \left(\frac{1}{\Delta x^2} - \frac{a}{2\Delta x} \right) + T_{M-1}^{n+1} \left[\frac{2}{\Delta x^2} \right] + \\
 T_M^n \left[\left(\frac{M_h C_h 2\Delta x}{kA\Delta t} \right) \left(\frac{1}{\Delta x^2} - \frac{a}{2\Delta x} \right) + \frac{1}{F\Delta t} \right] + \left[\left(\frac{T_a U A 2\Delta x}{kA} \right) \left(\frac{1}{\Delta x^2} - \frac{a}{2\Delta x} \right) + b \right] = 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

La ecuación discretizada para la temperatura de los nodos internos de los termoelementos, considerando $i = 1$ hasta $i = M - 1$, es la siguiente:

$$-T_i^{n+1} \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{1}{F\Delta t} \right) + T_{i-1}^{n+1} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{a}{2\Delta x} \right) + T_{i+1}^{n+1} \left(\frac{1}{\Delta x^2} - \frac{a}{2\Delta x} \right) + \frac{T_i^n}{F\Delta t} + b = 0 \tag{6}$$

donde $b = \frac{l^2 \rho}{kA^2}$, $F = \frac{k}{DC_p}$ y $a = \frac{\tau l}{kA}$

Parámetro Geométrico

La relación geométrica $\omega = \frac{A}{L}$, tal como se observa en la figura 2, analiza el impacto que tiene la longitud y el área de sección transversal de los termoelementos sobre el desempeño, la potencia de enfriamiento y la temperatura del lado frio del sistema (Ruiz-Ortega y Olivares-Robles, 2018). Este parámetro junto con el coeficiente convectivo se presentan optimizados para los distintos valores de ω y se analiza la influencia que tiene el coeficiente Thomson en la evolución de la temperatura en el lado frio considerando los parámetros optimizados ya mencionados.

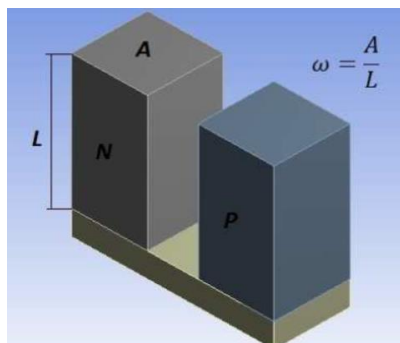


Figura 2. Representación de la Relación Área/Longitud.

Densidad de Corriente

S. Manikandan et al. (2017) establecieron la intensidad de corriente óptima para un área de sección transversal de los termoelementos constante. A partir de ese aporte es posible conocer la densidad de corriente óptima para termoelementos con un área de sección transversal determinada, por lo tanto, la ecuación establecida es:

$$j_{opt} = \frac{I_{opt}}{A} \quad (7)$$

donde I_{opt} , j_{opt} y A son la intensidad y la densidad de corriente óptimas y el área de sección transversal de los termoelementos, respectivamente. Una vez determinada la densidad de corriente óptima se calcula la intensidad de corriente para distintos valores la relación geométrica, $\omega = \frac{A}{L}$, mediante la ecuación (8):

$$I_{opt} = A * j_{opt} \quad (8)$$

La intensidad de corriente óptima es calculada para la corriente aplicada antes del pulso y después del pulso.

Resultados y Análisis

En esta investigación se analiza y compara la temperatura de enfriamiento mínima de un TEC para los siguientes casos: (I) cuando se considera el coeficiente Thomson del material y (II) cuando no se considera el coeficiente Thomson del material. También se toman en cuenta los siguientes parámetros para ambos casos: la relación geométrica de los termoelementos, $\omega = \frac{A}{L}$, la intensidad de corriente, el coeficiente convectivo y valor del coeficiente Thomson de material. El sistema opera aplicando un pulso de corriente eléctrica y se consideran las propiedades de los materiales constantes. Los resultados del análisis numérico, de acuerdo con las ecuaciones (4, 5 y 6), utilizando una corriente eléctrica estacionaria $I_{est,opt}$ y una corriente de pulso de $I_{pul,opt}$ para los diferentes valores de la relación ω y para los casos (I) y (II), se observan en las gráficas de enfriamiento obtenidas en el lado frío del sistema.

En la figura 3 se observa la temperatura mínima alcanzada y la carga de enfriamiento durante el pulso, $Q_{c,pul}$, por los distintos valores de la relación ω . En estas graficas el coeficiente convectivo ha sido optimizado para cada una de las relaciones de ω , por lo tanto, la carga de enfriamiento absorbida que se observa en la figura 3, $Q_{c,pul}$, es el valor óptimo alcanzado por cada uno de los valores de ω . En esta evolución de temperaturas, T_c , no se ha considerado la absorción de calor por efecto Thomson y el valor de temperatura mínima alcanzada durante el pulso de corriente eléctrica por la relación $\omega = 5.70 * 10^{-3}$ es de 277.7 K.

Las densidad de corriente con la que operan cada una de estas relaciones de ω antes y después del pulso de corriente es de: $j_{est,opt} = 3.2653 * 10^5 \frac{A}{m^2}$. Mientras que el valor de la densidad de corriente durante el pulso para cada una de las relaciones de ω es de: $j_{pul,opt} = 6.5306 * 10^5 \frac{A}{m^2}$.

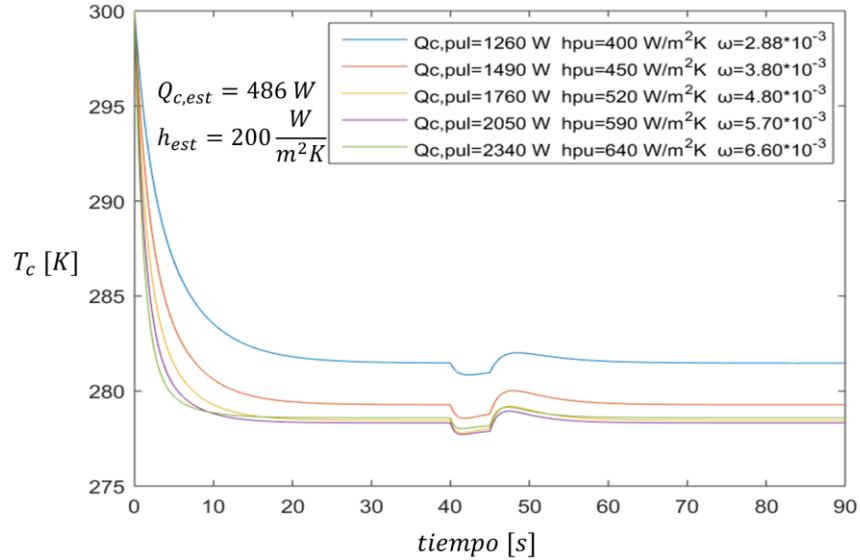


Figura 3. Temperatura en el lado frío del TEC para los distintos valores de la relación $\omega = \frac{A}{L}$, ajustando la potencia de enfriamiento durante el pulso (sin efecto Thomson).

En la figura 4 se puede observar la distribución de temperatura en el lado frío del sistema, considerando la absorción de calor por efecto Thomson para los distintos valores de ω , usando con un coeficiente de convección óptimo para evitar el incremento de temperatura en el lado frío ocasionado por el calor acumulado del efecto Joule. Las gráficas muestran, en comparación con la figura 3, que la carga de enfriamiento ha incrementado y la temperatura mínima de enfriamiento también ha disminuido, para todos los valores de ω , cuando tomamos en cuenta en coeficiente Thomson del material. Además, se observan 2 casos particulares, cuando a) $\omega = 5.70 \cdot 10^{-3}$ durante el pulso el sistema alcanza la temperatura mínima más baja, la cual es de 276.2 K, y cuando b) $\omega = 6.60 \cdot 10^{-3}$ el sistema es capaz de absorber una carga de enfriamiento de $Q_{c,pul} = 2090 W$, aunque la temperatura mínima durante el pulso es de 276.4 K.

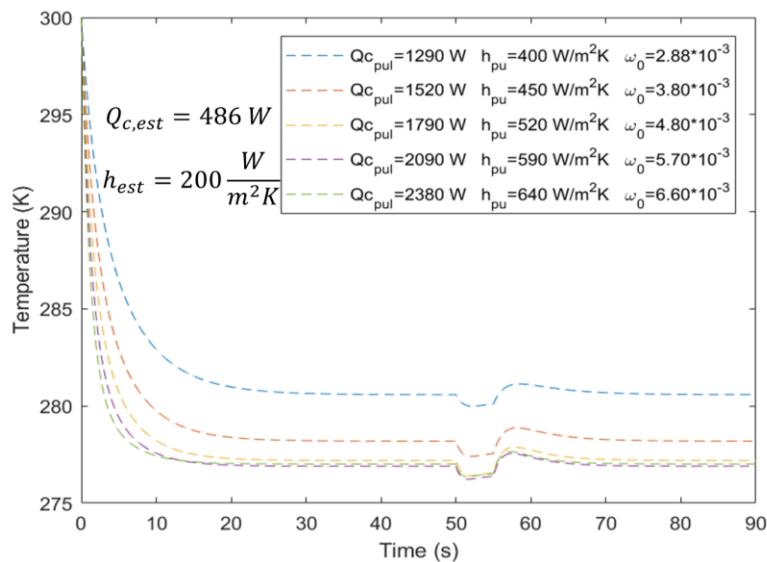


Figura 4. Temperatura T_c para diferentes valores de ω , considerando el efecto Thomson, ajustando para diferentes valores la potencia de enfriamiento durante el pulso.

En la figura 5 se observan las distribuciones de temperatura de T_c para los casos cuando (I) se considera el efecto Thomson y cuando (II) no se considera el efecto Thomson. La carga de enfriamiento durante el pulso a la cual operan ambos casos es de $Q_{c,pul} = 1260 \text{ W}$, sin embargo, se observa que para el caso (I) la diferencia de temperatura entre la temperatura estacionaria, T_{est} , y la temperatura mínima alcanzada durante el pulso es de 0.7 K . Esto también se ve reflejado en la diferencia de temperatura, $\Delta T = 0.7 \text{ K}$, que existe entre la temperatura estacionaria y la temperatura máxima alcanzada por el calentamiento debido al efecto Joule (después que se deja de aplicar el pulso). Este criterio es considerado para establecer una carga de enfriamiento óptima durante el pulso y pueda ser absorbida sin presentar sobrecalentamiento en el lado frío del sistema. Resumiendo lo anteriormente dicho, debe existir una diferencia de temperatura de 0.6 K ó 0.7 K entre la temperatura estacionaria y la temperatura mínima más baja durante el pulso; esto también incluye la diferencia que existe entre la temperatura estacionaria del sistema y la temperatura máxima alcanzada por calentamiento debido al efecto Joule.

En el caso (II) se observa que la carga de enfriamiento durante el pulso puede ser mejorada ya que no cumple con el criterio anteriormente mencionado. La diferencia de temperatura que existe entre la temperatura estacionaria y la temperatura mínima más baja es de $\Delta T = 1.1 \text{ K}$, mientras que la diferencia de temperatura que hay entre la temperatura estacionaria y la temperatura máxima alcanzada por el efecto Joule es de $\Delta T = 0.3 \text{ K}$.

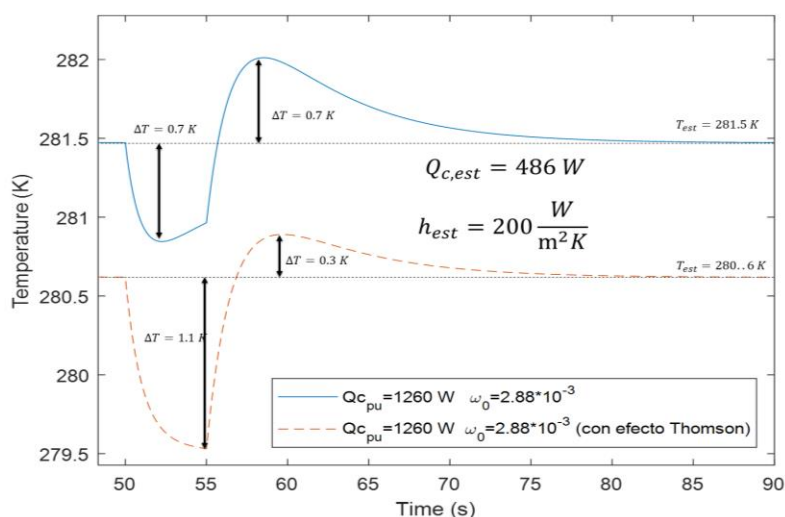


Figura 5. Evolución de la temperatura en el lado frío del TEC, para la relación $\omega = 2.88 * 10^{-3}$, en el caso cuando (I) se considera el efecto Thomson (línea discontinua) y cuando (II) no es considerado el efecto Thomson (línea continua).

En la figura 6 podemos observar que para el caso (I), la temperatura mínima mas baja del sistema, cuando $\omega = 5.70 * 10^{-3}$, es de 276.2 K . Además, la carga de enfriamiento fue reajustada para que la temperatura en el lado frío del TEC mostrara la mismo comportamiento cualitativo reportado por Manikandan et al. Para el caso (II), la temperatura mínima alcanzada por el sistema durante el pulso para el mismo valor de la relación ω es de 277.7 K . Los resultados obtenidos nos muestran que el efecto Thomson tiene gran repercusión sobre la carga de enfriamiento y la temperatura mínima alcanzada por el sistema, ya que estos parametros mejoraron al ser tomado en cuenta este efecto. Se escogio en particular este valor de ω , debido al hecho de que este alcanza la temperatura mínima mas baja en comparación con los otros valores de ω .

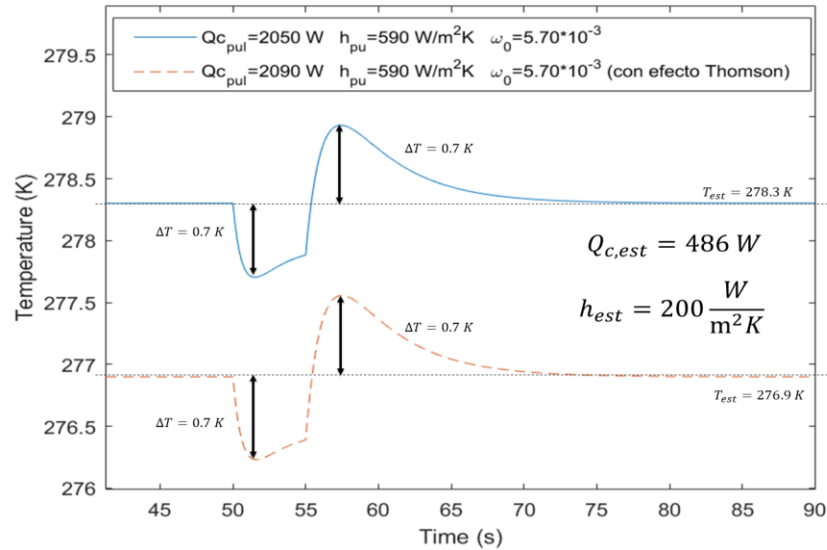


Figura 6. Temperatura, T_c , para el caso cuando (I) se considera efecto Thomson (línea discontinua) y cuando (II) no es considerado el efecto Thomson (línea continua), para la relación $\omega = 5.70 * 10^{-3}$.

La figura 7 muestra, al igual que la gráfica anterior, la distribución de temperatura del lado frío para el valor de la relación $\omega = 6.60 * 10^{-3}$ considerando 2 casos diferentes, cuando (I) se considera el efecto Thomson y cuando (II) el efecto Thomson no es considerado. En el caso (I), la temperatura mínima más baja alcanzada por el sistema es de 276.4 K. Por otra parte, la carga de enfriamiento fue reajustada, aumentando a 40 W, para que tuvieses el mismo comportamiento cualitativo reportado por Manikandan et al. Mientras que para el caso (II), la que la temperatura mínima, T_c , alcanzada es de 278 K. Esto nos lleva al mismo criterio establecido en la gráfica anterior, la consideración del coeficiente Thomson dentro de nuestro TEC es de vital importancia para que pueda haber una absorción de la carga de enfriamiento más alta y exista una temperatura mínima de enfriamiento más baja.

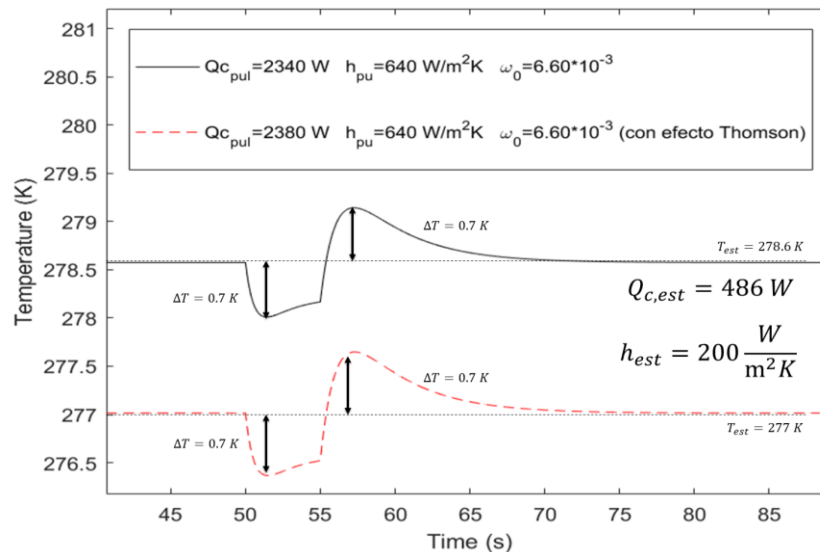


Figura 7. Temperatura, T_c , para el caso cuando (I) se considera efecto Thomson (línea discontinua) y cuando (II) no es considerado el efecto Thomson (línea continua), para la relación $\omega = 6.60 * 10^{-3}$.

Conclusiones

Establecer un coeficiente de convección adecuado permite el sobrecalentamiento generado por el efecto Joule sea apenas de 0.7 K en el lado frío del TEC. Por otra parte, la densidad de corriente óptima permitió alcanzar la temperatura más baja en el sistema para los distintos valores de la relación ω . Los valores de la relación ω más altos mejoraron notablemente carga de enfriamiento que el sistema puede absorber sin presentar un sobrecalentamiento excesivo, para ambos casos. Sin embargo, el sistema que mostró mejores condiciones de operación fue aquel donde se considera la absorción de calor por efecto Thomson. Por lo tanto, se puede concluir lo siguiente: El valor de la relación $\omega = 5.70 * 10^{-3}$ provee la temperatura mínima más baja en el lado frío del sistema con respecto a las demás relaciones de ω en las cuales se considera el efecto Thomson, ya que la temperatura alcanzada durante el pulso por esta relación es de 276.2 K. También cabe mencionar que la carga de enfriamiento, que es capaz de absorber el sistema, se optimizó debido a que aumentó 40 W con respecto al caso donde se consideró el efecto Thomson. También se puede concluir lo siguiente: Mientras que para el valor de $\omega = 6.60 * 10^{-3}$ aumenta la carga de enfriamiento, durante el pulso de corriente eléctrica, con respecto a los otros valores de ω en las que se considera el efecto Thomson. La carga de enfriamiento máxima absorbida fue de 2380 W, la cual es 40 W más grande en comparación con el sistema en el que no se considera este efecto.

El sistema fue optimizado al encontrar la geometría adecuada para conseguir máxima diferencia de temperatura y máxima absorción de la carga de enfriamiento. Esto fue logrado al considerar el efecto Thomson y al obtener un coeficiente convectivo adecuado para optimizar el sistema. Estos resultados contribuirán a futuros diseños de enfriadores termoeléctricos basados en optimización geométrica.

Limitaciones

Los resultados obtenidos en investigaciones previas, mostrados en las referencias, no esclarecían la optimización geométrica de los TEC, lo cual nos llevó a establecer un nuevo método de optimización geométrica que además considera el efecto convectivo. Aun con los avances aquí presentados falta hacer algunas consideraciones importantes tales como: considerar propiedades de los materiales dependientes de la temperatura, segmentación de los elementos semiconductores y diseño de disipador de calor, por citar algunos. Dichas consideraciones pueden llevar a un mejor diseño y por lo tanto establecemos las bases para futuras investigaciones en busca de la optimización de los TEC.

Recomendaciones

Observamos que, al usar la geometría y coeficiente convectivo óptimos para los termoelementos, la potencia de enfriamiento aumenta. Además, el coeficiente Thomson también contribuyó significativamente a aumentar la potencia de enfriamiento del sistema. Por tanto, se recomienda realizar un análisis sobre la temperatura mínima y la potencia máxima de enfriamiento que este dispositivo pueden alcanzar usando materiales con cambio de fase en el disipador y considerando un enfriador termoeléctrico de dos etapas. Con esto se podría conseguir un nuevo diseño capaz de lograr temperaturas de enfriamiento más bajas.

Referencias

- Badillo-Ruiz, C. A., Olivares-Robles, M. A., & Chanona-Perez, J. J. (2019). Design of Nano-Structured Micro-Thermoelectric Generator: Load Resistance and Inflections in the Efficiency. *Entropy*, 21(3), 224.
- Badillo-Ruiz, C. A., Olivares-Robles, M. A., & Ruiz-Ortega, P. E. (2018). Performance of segmented thermoelectric cooler micro-elements with different geometric shapes and temperature-dependent properties. *Entropy*, 20(2), 118.
- Mandikan, S., Kaushik, S.C. y Yang, R. "Modified pulse operation of thermoelectric coolers for building cooling applications," *Energy Conversion and Management*, Vol. 140 (2017), Pags. 145–156.
- Ming, M., Jianlin, Y. y Jiaheng, C. "An investigation on thermoelectric coolers operated with continuous current pulses", *Energy Conversion and Management*, Vol. 98 (2015), Pags. 275–281.
- Ruiz-Ortega, P.E., Olivares-Robles, M.A. y Garcia-Ruiz, A.F. "Thermoelectric Cooling: The Thomson Effect in Hybrid Two-Stage Thermoelectric Cooler Systems with Different Leg Geometric Shapes", *Bringing Thermoelectricity into Reality*, Capítulo 14, 2018. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75440>
- Selvam, C., Manikandan, S., Kaushik, S. C., Lamba, R., & Harish, S. (2019). Transient performance of a Peltier super cooler under varied electric pulse conditions with phase change material. *Energy Conversion and Management*, 198, 111822.
- Snyder, G. J., Fleurial, J. P., Caillat, T., Yang, R., & Chen, G. (2002). Supercooling of Peltier cooler using a current pulse. *Journal of Applied Physics*, 92(3), 1564-1569.
- Shen, L. M., Xiao, F., Chen, H. X., & Wang, S. W. (2012). Numerical and experimental analysis of transient supercooling effect of voltage pulse on thermoelectric element. *international journal of refrigeration*, 35(4), 1156-1165.

Notas Biográficas

El M. en C. Olao Yair Enciso Montes de Oca es actualmente estudiante de doctorado en Nanociencias y Micro-nanotecnologías en la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas Unidad Zacatenco (ENCB Zacatenco) Instituto Politécnico Nacional (IPN).

El Dr. Miguel Ángel Olivares Robles recibió el grado de Maestro en Ciencias en Física y el Grado de Doctor en Ciencias en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-Iztapalapa), actualmente es Profesor Investigador Titular, definitivo y de tiempo completo en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Culhuacán del IPN y pertenece al sistema nacional de investigadores.

El Dr. Pablo Eduardo Ruiz Ortega recibió el grado de doctor en Nanociencias y Micro-nanotecnologías por parte de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas Unidad Zacatenco (ENCB Zacatenco) Instituto Politécnico Nacional (IPN) y pertenece al sistema nacional de investigadores.

El M. en C. Cristian Francisco Ramos Castañeda es actualmente estudiante de doctorado en Nanociencias y Micro-nanotecnologías en la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas Unidad Zacatenco (ENCB Zacatenco) Instituto Politécnico Nacional (IPN).