

Análisis del rendimiento de TEG's utilizando una teoría de circuitos térmicos y eléctricos

Vargas Almeida Alexander

Departamento de Termofluidos, Facultad de Ingeniería, UNAM, C.P. 04510, México
alexvargas.almeida@gmail.com

Olivares Robles Miguel Ángel

SEPI, ESIME-CUL, Instituto Politécnico Nacional, Av. Santa Ana 1000, Culhuacán, Coyoacán
C.P. 04430, México
molivares67@gmail.com

Resumen

En este trabajo se muestra el estudio de dos sistemas compuestos por dos módulos termoeléctricos, uno en serie y otro en paralelo, nosotros mostramos cálculos de la potencia eléctrica; para estos resultados se ha aplicado una teoría de circuitos térmicos y eléctricos. Se da a conocer la física y el desarrollo matemático para obtener cantidades importantes como la termopotencia, la resistencia eléctrica, la conductancia térmica y la figura de mérito de estas configuraciones. Realizamos un estudio de la potencia eléctrica y analizamos su comportamiento como función del cociente de resistencia eléctrica interna y la resistencia eléctrica de carga de cada módulo, bajo la condición de que cada módulo está echo de un material distinto al otro; nuestros resultados muestran que la conexión térmica y eléctrica en paralelo entrega una potencia eléctrica mayor que la de módulos conectados térmicamente y eléctricamente en serie.

Palabra(s) Clave(s): coeficiente Seebeck, figura de mérito, generador termoeléctrico, potencia eléctrica entregada.

1. Introducción

Un módulo termoelectrico es un dispositivo de estado sólido que presenta básicamente dos fenómenos[1,2], el efecto Peltier que consiste en un efecto de bombeo de calor cuando por el módulo circula una corriente eléctrica (lo cual es aprovechado en aplicaciones de enfriamiento o refrigeración), el siguiente efecto se conoce como Seebeck y consiste en la generación de una corriente eléctrica cuando el módulo es sometido a una fuente calor en una de sus caras (se somete a una diferencia de temperatura) es fenómeno es utilizado para producción de potencia eléctrica y es el tópico principal de este trabajo[3].

Debido a que un TEG cuenta con ciertas ventajas como: no necesitan de algún combustible para generar potencia, no contienen partes móviles, no emiten gases contaminantes, se pueden colocar en cualquier posición sin que afecte su desempeño, son resistentes a condiciones extremas del ambiente, necesitan un mínimo mantenimiento (en promedio 1 a 2 horas anuales), larga vida útil de hasta 20 años sin recambio de componentes importantes, fácil instalación y la principal de todas es que representan una gran vía para el aprovechamiento del calor que se emite en diversos procesos o equipos industriales. Sin embargo debido a que aún presentan una baja eficiencia. Su aplicación aún no se ha logrado llevar a gran escala (es decir no pueden competir con máquinas térmicas como un motor de combustión) sin embargo a pequeñas escalas (dispositivos electrónicos) están siendo bien explotados para operar con pequeñas diferencias de temperaturas [3,4].

La eficiencia de un generador termoelectrico que convierte una cantidad de calor (Q) en una potencia eléctrica (P), está dada por [5],

$$\eta = \frac{P}{Q} \quad (1)$$

Sin embargo es más práctico y útil utilizar la eficiencia de un TEG como,

$$\eta = \frac{\Delta T \sqrt{1 + ZT} - 1}{T_h \sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (2)$$

En la ec. (2) se puede observar que $(\Delta T = T_h - T_c)$ es la diferencia de las temperaturas entre los focos frío y caliente en el dispositivo, T es la temperatura promedio y Z es la figura de mérito, la cual es una cantidad que mide el rendimiento de un TEG directamente en función de los materiales termoeléctricos y está dada por,

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \kappa} \quad (3)$$

Donde α , ρ y κ son el coeficiente Seebeck, resistividad eléctrica y conductividad térmica respectivamente, (propiedades de los materiales que componen al TEG).

1.1. Estado del arte

En 2012 Apertet y colaboradores [6] mostraron una primera guía para la aplicación de una teoría de circuitos en el análisis de un módulo termoeléctrico segmentado, en tal estudio realizaron una simplificación del modelo analizándolo como una conexión eléctrica y térmica en serie, una clave en este trabajo es la deducción de la temperatura intermedia T_m que existe en la unión de los segmentos. Posteriormente en el mismo año este autor extendió su análisis para un sistema compuesto de módulos termoeléctricos conectados térmicamente y eléctricamente en paralelo [7] uno de sus principales resultados es que las inhomogeneidades de las propiedades termoeléctricas generan una corriente dentro del sistema. En [8] se realiza el estudio de la eficiencia de máquinas térmicas acopladas en particular se derivan condiciones que permiten que el conjunto de máquinas alcance su eficiencia a la máxima potencia. En tanto en [9] se muestra un estudio con mejor aproximación a la realidad ya que se introducen en el análisis del desempeño del sistema termoeléctrico el efecto de intercambiadores de calor acoplados a los puntos frío y caliente del generador. Con base en los trabajos mencionados anteriormente, nosotros hemos aplicado tal esquema de análisis sobre

una teoría de circuitos térmicos y eléctricos para estudiar el rendimiento de sistemas compuestos de generadores termoeléctricos

1.2. Estructura del trabajo

En la sección dos mostramos el modelo físico para el análisis del sistema termoeléctrico dando a conocer los aspectos principales de la teoría de circuitos aplicada y se derivan las cantidades equivalentes para cada una de las dos conexiones (en serie y en paralelo). En la sección tres se dan a conocer los resultados para el cálculo de la potencia generada por cada una de estas configuraciones, mientras que en las secciones cuatro y cinco mostramos la discusión de resultados y conclusiones respectivamente.

2. Desarrollo

2.1 Modelo físico

El modelo que asociamos a un generador termoeléctrico es el que se muestra (ver Fig.1).

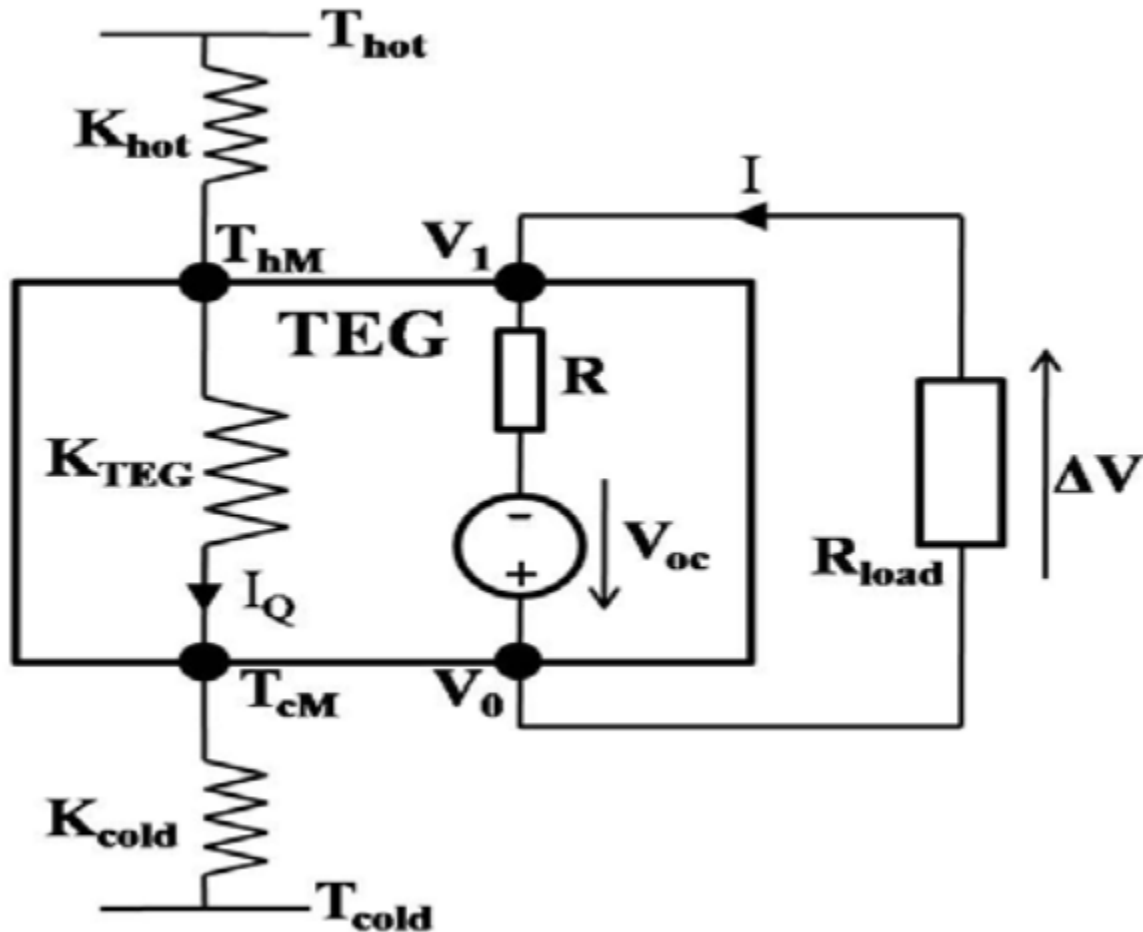


Fig. 1. Modelo de un TEG, el cual asocia al sistema un circuito térmico (izquierda) y un circuito eléctrico (derecha).

En este esquema T_{hot} y T_{cold} son las temperaturas de la fuente y del sumidero respectivamente, K_{TEG} es la conductancia térmica del generador, R es la resistencia eléctrica propia del TEG, I es la corriente generada, ΔV es el voltaje generado y R_{load} es la resistencia de carga del sistema al cual se le entrega la corriente generada. En este trabajo hemos aplicado el modelo para el estudio de dos sistemas: dos TEG's conectados térmicamente y eléctricamente en serie y dos TEG's térmicamente y eléctricamente en paralelo [10].

2.2. Dos TEG's conectados térmicamente y eléctricamente en serie

El modelo que corresponde a este sistema es el que se muestra en la figura, (ver Fig. 2) como puede observarse cada uno de los módulos está caracterizado por su conductancia térmica, resistencia eléctrica y coeficiente Seebeck y cada uno está bajo diferentes diferencias de temperaturas, para el TEG 1 corresponde ($\Delta T_{TEG1} = T_{hot} - T_i$) y para el TEG 2 corresponde ($\Delta T_{TEG2} = T_i - T_{cold}$), la temperatura intermedia T_i se genera en la unión de los generadores y está relacionada a la corriente eléctrica que se genera en el TEG.

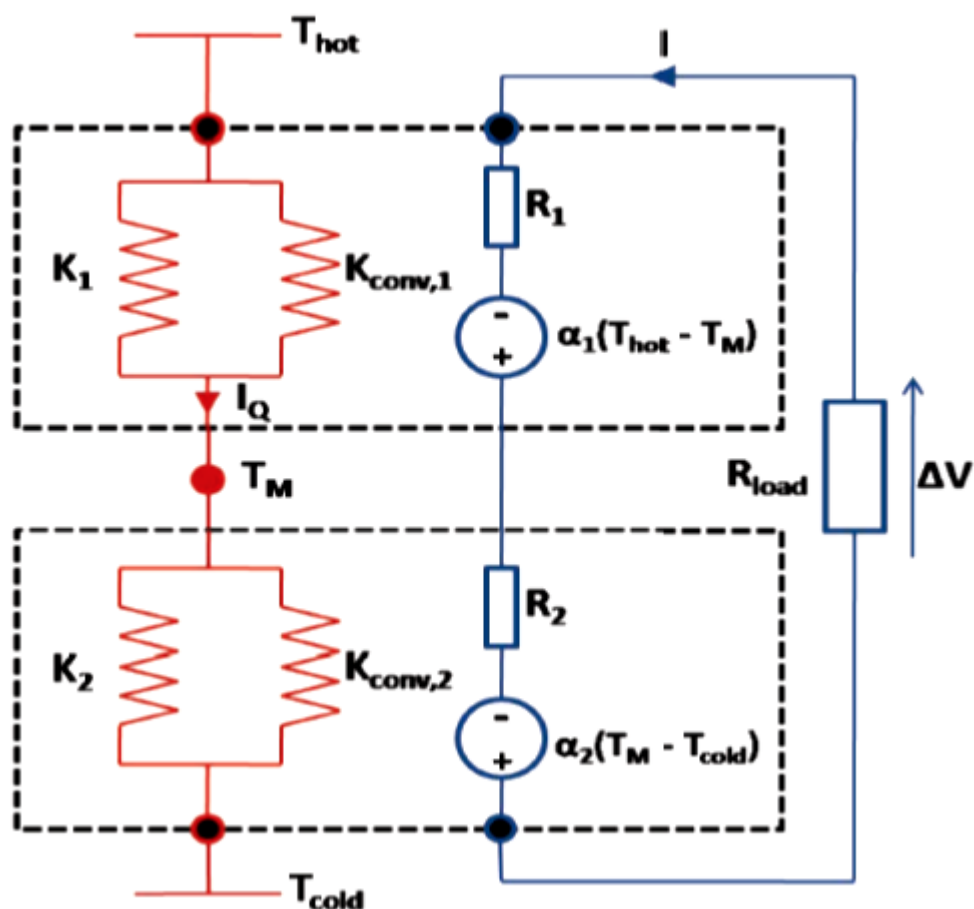


Fig. 2. Modelo correspondiente a dos TEG's, conectados térmicamente en serie (circuito en color rojo) y eléctricamente en serie (circuito en color azul).

Aplicando el análisis propuesto por [11] hemos derivado las cantidades equivalentes para este sistema las cuales son,

Coeficiente Seebeck equivalente

$$\alpha_{eq-serie} = \frac{k_2 \alpha_1 + k_1 \alpha_2}{k_1 + k_2} \quad (4)$$

Conductancia térmica equivalente,

$$k_{eq-serie} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (5)$$

Resistencia eléctrica equivalente

$$R_{eq-serie} = R_1 + R_2 + \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 T}{k_1 + k_2} \quad (6)$$

Entonces su figura de mérito equivalente está dada por la siguiente ecuación,

$$Z_{eq} = \frac{\alpha_{eq}^2}{k_{eq} R_{eq}} \quad (7)$$

$$Z_{eq-serie} = \frac{\left(\frac{k_2 \alpha_1 + k_1 \alpha_2}{k_1 + k_2} \right)^2}{\left(\frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \right) \left(R_1 + R_2 + \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 T}{k_1 + k_2} \right)} \quad (8)$$

2.3. Dos TEG's conectados térmicamente y eléctricamente en paralelo

En este sistema los dos TEG's se encuentran sometidos a la misma diferencia de temperatura estando térmicamente y eléctricamente en paralelo, como se muestra en la figura (ver Fig. 3)

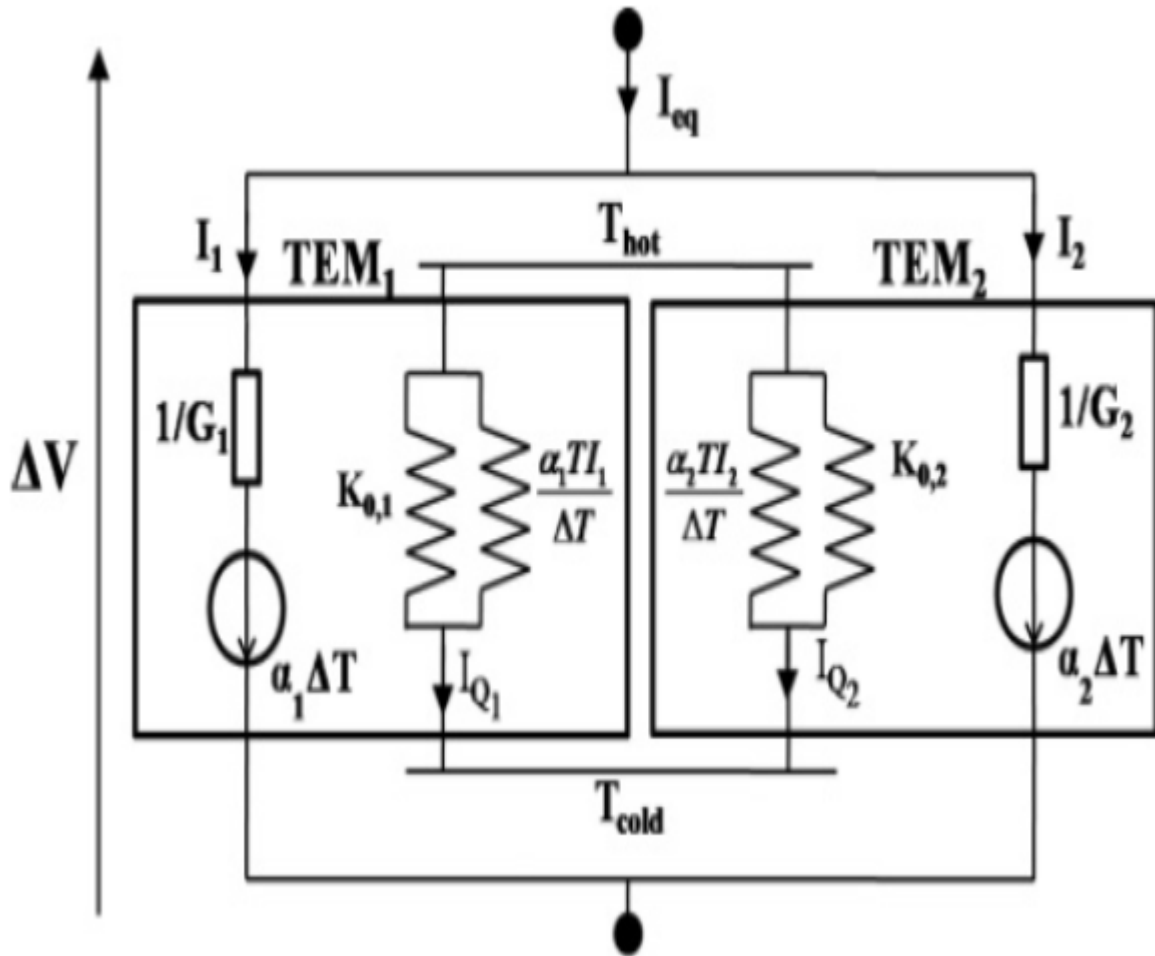


Fig. 3. Modelo de correspondiente a dos TEG's, conectados térmicamente y eléctricamente en paralelo.

Las cantidades equivalente para este sistema son,

Coefficiente Seebeck equivalente,

$$\alpha_{eq-paralel} = \frac{\alpha_1 R_2 + \alpha_2 R_1}{R_2 + R_1} \quad (9)$$

Resistencia eléctrica equivalente,

$$R_{eq-paralel} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (10)$$

Conductancia térmica equivalente,

$$k_{eq-paralel} = k_1 + k_2 + \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2}{R_1 + R_2} T \quad (10)$$

Entonces la figura de mérito equivalente está dada por la siguiente ecuación,

$$Z_{eq-paralel} = \frac{\left(\frac{\alpha_1 R_2 + \alpha_2 R_1}{R_2 + R_1} \right)^2}{\left(k_1 + k_2 + \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2}{R_1 + R_2} T \right) \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)} \quad (11)$$

3. Resultados

3.1. Potencia generada por los TEG's compuestos

Cuando un TEG genera un voltaje por acción del efecto Seebeck, la potencia asociada a tal voltaje es aprovechada por algún sistema el cual tiene una resistencia de carga (R_{load}), entonces la potencia entregada por el TEG está dada por,

$$P_{out} = \frac{[\alpha(T_H - T_C)]^2 m}{(m + 1)^2 R} \quad (12)$$

Donde $m = R_{load}/R$. En este trabajo nos interesa determinar la potencia máxima (P_{max}) entregada por el generador, la cual se alcanza para la condición $R_{load} = R$. Entonces P_{max} está dada por,

$$P_{max} = \frac{\alpha^2 (T_H - T_C)^2}{4 R} \quad (13)$$

La ec.(13) para el caso de un generador termoeléctrico compuesto queda de la siguiente forma,

$$P_{ma} = \frac{\alpha_{eq}^2 (T_H - T_C)^2}{4 R_{eq}} \quad (14)$$

Ahora escribimos la ec.(14) para los sistemas en serie y en paralelo, utilizando las cantidades equivalentes que se obtuvieron en las secciones anteriores.

$$P_{Out-eq-serie} = \frac{\left(\frac{k_2 \alpha_1 + k_1 \alpha_2}{k_1 + k_2} \right)^2 (T_H - T_C)^2 m}{\left(R_1 + R_2 + \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 T}{k_1 + k_2} \right) (m + 1)^2} \quad (15)$$

$$P_{Out-eq-paralelo} = \frac{\left(\frac{\alpha_1 R_2 + \alpha_2 R_1}{R_2 + R_1} \right)^2 (T_H - T_C)^2 m}{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) (m + 1)^2} \quad (16)$$

Ahora se valúa la potencia de estos sistemas con la condición de que se tienen dos materiales distintos, uno para cada TEG. Los resultados se muestran en la gráficas (ver Figs. 4 y 5), los valores numéricos de las propiedades (α , R y k) corresponden a los materiales BiTe y PbTe, (ver Tabla 1).

Material	α	R	k
BiTe	2.15×10^{-4}	1.04×10^{-5}	1.456
PbTe	262.87×10^{-6}	5.94×10^{-5}	1.77

Tabla 1. Valores numéricos de las propiedades termoeléctricas de los materiales (coeficiente Seebeck, resistencia eléctrica y conductancia térmica).

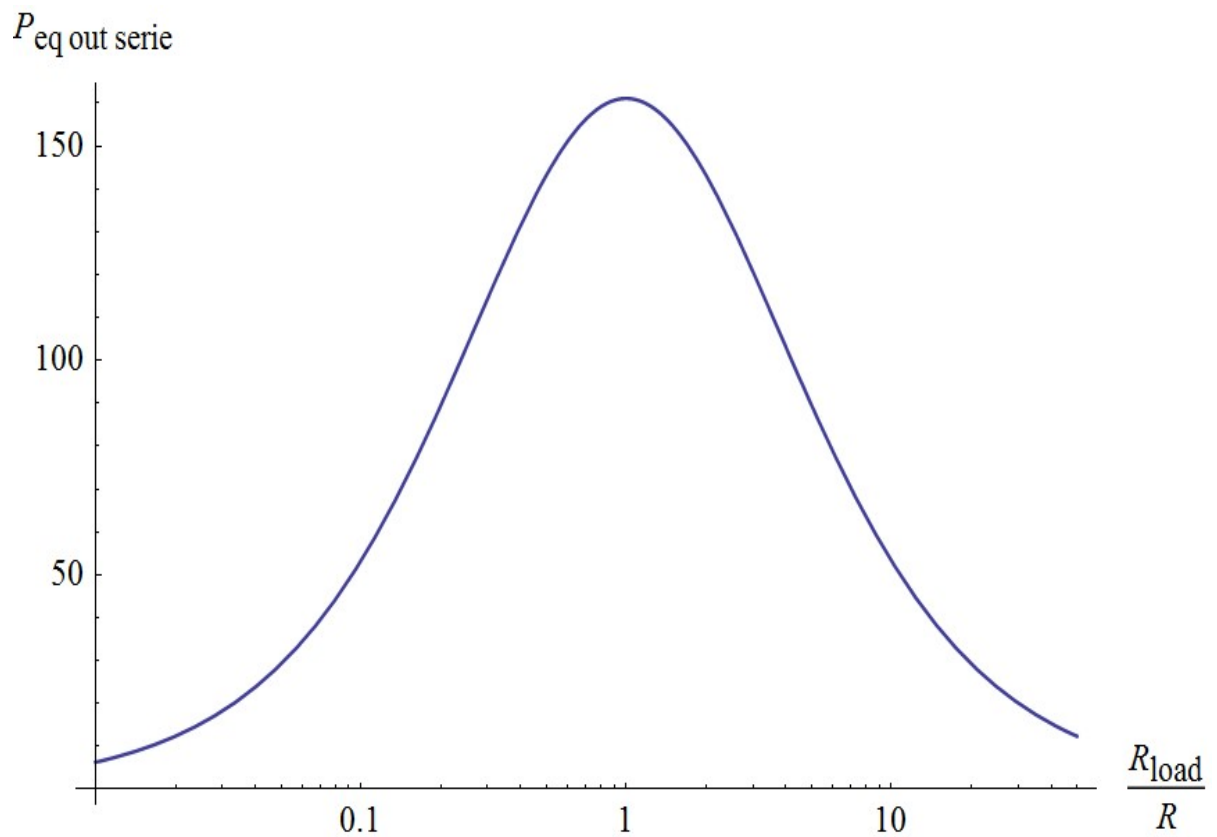


Fig. 4. Gráfica que muestra la potencia entregada por el sistema de TEG's en serie, como función del cociente entre la resistencia de carga del elemento externo y de la resistencia propia del TEG.

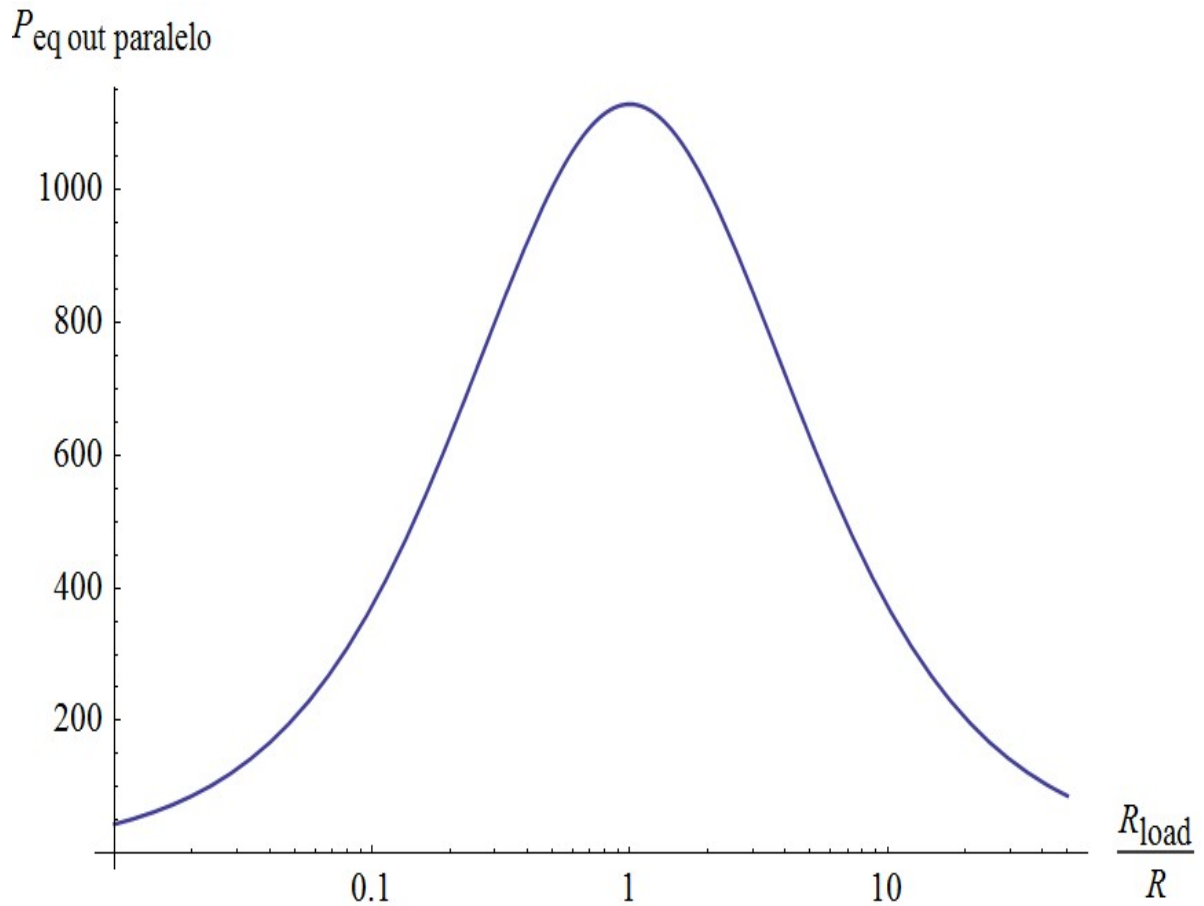


Fig. 5. Gráfica que muestra la potencia entregada por el sistema de TEG's en paralelo, como función del cociente entre la resistencia de carga del elemento externo y de la resistencia propia del TEG.

4. Discusión

De los resultados mostrados en la sección anterior es notable que el sistema de generadores termoeléctricos conectados térmicamente y eléctricamente en paralelo produce una mayor potencia que el sistema de TEG's conectados térmicamente y eléctricamente en serie. En principio consideramos que esta gran diferencia puede deberse a que en el sistema de TEG's en serie aparece un tipo de resistencia extra generada en la unión de los materiales, nos referimos al término $\left(\frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 T}{k_1 + k_2}\right)$ que

aparece en la ec. (15) y que ha sido referido por [6] como una resistencia de relajación la cual está relacionada a los efectos de interface sobre la corriente que circula en el sistema.

5. Conclusiones

Por medio de este primer análisis se ha comprobado el alcance del modelo utilizado, el cual asocia un circuito térmico y un circuito eléctrico para un sistema compuesto de generadores, una de sus ventajas es que muestra una influencia directa de las propiedades de los materiales que componen a un generador sobre el desempeño de tal sistema. También hemos mostrado que hasta el momento el sistema de TEG's conectados en paralelo ha resultado ser el que entrega mayor potencia, sin embargo consideramos que otras conexiones pueden ser analizadas y que cuenten con un mayor número de módulos, otro aporte del presente trabajo es que también muestra la influencia de tener distintos materiales (uno para cada módulo),

6. Referencias

- [1] Thermoelectrics. <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/index.html>.
- [2] Terry M. Tritt, "Thermoelectric Phenomena, Materials, and Applications". *Annu. Rev. Mater. Res.* No. 41. 2011. 433-448 pp.
- [3] E. Bollati, Generadores termoeléctricos Generación de energía sin partes móviles. *Petrotecnica*. Abril, 2007. 84-91 pp.
- [4] S.B. Riffat, Xiaoli Ma, "Thermoelectrics: a review of present and potential applications". *Applied Thermal Engineering*. Vol. 23. 2003. 913-935 pp.
- [5] G. Snyder, "Small Thermoelectric Generators". *The Electrochemical Society Interface* Fall. 2008. 54-56 pp.

- [6] Y. Apertet, H. Ouerdane, C. Goupil, and Ph. Lecoeur, "Segmented thermoelectric generators: Impact of junction temperature variation on the series circuit's properties". *Cond-mat.mtrl-sci*. No. arXiv:12065649v1. 25 Jun 2012.
- [7] Y. Apertet, H. Ouerdane, C. Goupil, Ph. Lecoeur, "Thermoelectric internal current loops inside inhomogeneous systems". *Phys. Rev. Vol. B* 85. No. 033201. 2012.
- [8] Y. Apertet, H. Ouerdane, C. Goupil, Ph. Lecoeur, "Efficiency at maximum power of thermally coupled heat engines". *Phys. Rev. Vol. E* 85. No. 041144 2012.
- [9] Y. Apertet, H. Ouerdane, C. Goupil, Ph. Lecoeur, "Optimal working conditions for thermoelectric generators with realistic thermal coupling". No. arXiv:1108.6164v3. 17 Dec 2011.
- [10] Y. Apertet., H. Ouerdane. C. Goupil, Ph. Lecoeur, "Irreversibilities and efficiency at maximum power of heat engines: The illustrative case of a thermoelectric generator". *Physical Review. Vol. E* 85. No. 031116. 2012. 1-5 pp.
- [11] Y. Apertet., H. Ouerdane. C. Goupil, Ph. Lecoeur, "Segmented thermoelectric generators: Impact of junction temperature variation on the series circuit's properties". *Cond-mat.mtrl-sci*. No. arXiv:1206.5649v1. 25 Jun 2012. 1-7 pp.

7. Autores

M.c. Alexander Vargas Almeida, obtuvo su grado de Maestría por el Instituto Politécnico Nacional, actualmente se encuentra en estudios de doctorado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Doctor Miguel Ángel Olivares 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). Su línea de investigación es sobre Autenticación y Protección de la Información, Análisis de Series de Tiempo y Criptografía Cuántica. En 1994 recibió la Medalla al Merito Universitario por parte de la UAM-Iztapalapa. El Dr. Olivares-Robles es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) ininterrumpidamente desde 1997 a la fecha.