

Aprovechamiento del Calor de Desecho en Gases de Combustión a través de Dispositivos Termoeléctricos

Gerardo Plata Medina

Instituto Politécnico Nacional, Av. Santa Ana 1000, San Francisco Culhuacán, Coyoacán, 04430 Ciudad de México, Distrito Federal
gerardo.plata.medina@hotmail.com

Carlos Alberto Badillo Ruiz

Instituto Politécnico Nacional, Av. Santa Ana 1000, San Francisco Culhuacán, Coyoacán, 04430 Ciudad de México, Distrito Federal
cbadillor@gmail.com

Miguel Ángel Olivares Robles

Instituto Politécnico Nacional, Av. Santa Ana 1000, San Francisco Culhuacán, Coyoacán, 04430 Ciudad de México, Distrito Federal
molivares67@gmail.com

Resumen

Un generador termoeléctrico funciona con una diferencia de temperatura (efecto Seebeck) produciendo energía eléctrica (termoelectricidad). En este trabajo se revisa la propuesta de utilizar el gradiente de temperatura generado por los gases de combustión en el tubo de escape de un motor de combustión interna con respecto a la temperatura ambiente. A su vez la energía eléctrica obtenida por el generador termoeléctrico se utiliza para alimentar un módulo Peltier para la refrigeración de bebidas u otras aplicaciones dentro del auto móvil. Se reportan los resultados preliminares para este sistema compuesto generador-enfriador termoeléctrico.

Palabras Claves: Aprovechamiento, Dispositivos Termoeléctricos, Efecto Seebeck, Termoelectricidad, Gases residuales.

1. Introducción

La obtención de energía por medios no convencionales, es un tema de alto impacto en la actualidad. Los dispositivos termoeléctricos son utilizados como recolectores de energía [1]. En la actualidad existe una amplia gama de aplicaciones en base a tecnología termoeléctrica por ejemplo, aquellos utilizados por la milicia para equipos de visión nocturna, el enfriamiento de equipos electrónicos y sistemas de guía inercial. En el área médica también se utilizan aplicaciones termoeléctricas para las mantas de hipotermia, analizadoras de sangre, la preparación del tejido y almacenamiento. Estos productos son útiles, pequeños, sin partes móviles y se utilizan para generar electricidad, controlar la temperatura, así como para refrigeración y calefacción.

Es conocido a partir de la segunda ley de la termodinámica que toda transformación cíclica cuya única finalidad sea absorber calor de un cuerpo o fuente térmica a una temperatura dada y convertirlo íntegramente en trabajo, es imposible [2]. En consecuencia, sólo alrededor del 30% de la energía liberada por el combustible en un motor de combustión interna, se convierte en energía mecánica, el otro 70% de la energía se halla en los gases de desecho, y por otras fugas de calor [3].

La aplicación de los dispositivos termoeléctricos (TE) en la industria se encuentra aún en desarrollo, pero la aplicación de estos dispositivos es prometedora en el futuro. La recuperación del calor desecho de un motor de combustión interna nos permite ver la posibilidad de aplicación de los dispositivos TE para su aprovechamiento [4] y conversión en energía eléctrica. El aprovechamiento de la energía eléctrica generada puede utilizarse para enfriar bebidas o en un sistema de ventilación, etc.

En este trabajo analizamos la implementación de los dispositivos termoeléctricos para el aprovechamiento del calor de desecho en los gases de combustión de un automóvil, a través de un sistema TE combinado de un generador termoeléctrico (TEG) y un enfriador

termoeléctrico (TEC). La organización de este trabajo es como sigue. En la sección 2, describimos el sistema TE combinado y las ecuaciones que gobiernan al sistema. En la sección 3, presentamos nuestros resultados obtenidos a partir de las temperaturas en distintos puntos del tubo de escape. En la sección 4, discutimos nuestros resultados. Finalmente en la sección 5 presentamos nuestras conclusiones.

2. Dispositivo termoeléctrico combinado: Generador- Enfriador

En trabajos recientes, se han estudiado dispositivos TE combinados formados por un generador y un refrigerador termoeléctrico ambos de dos etapas y conectados en serie [5], como se muestra en la Fig. 1.

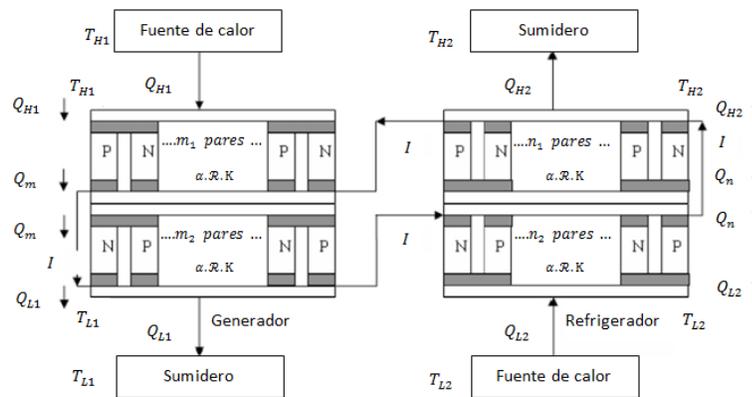


Fig. 1. Diagrama del dispositivo termoeléctrico combinado [5].

El generador TE consta de dos etapas, una etapa superior con pares m_1 y una etapa inferior con pares m_2 de elementos termoeléctricos. Cada elemento semiconductor se compone de termocuplas de tipo P y N. La irreversibilidad interna es causada por la pérdida Joule y la pérdida por conducción de calor a través del semiconductor entre las uniones calientes y frías. Las tasas de flujo de calor en el generador termoeléctrico son Q_{H1} , es el calor absorbido de la fuente térmica caliente a temperatura T_{H1} ; Q_m , es el calor en la unión de las dos etapas a temperatura T_m y Q_{L1} , es el calor rechazado por la etapa inferior a temperatura T_{L1} .

El refrigerador TE, se compone de una etapa superior con pares n_1 y una etapa inferior con pares n_2 de elementos termoeléctricos. Cada elemento semiconductor se compone de pares de termocuplas de tipo P y N. Las tasas de flujo de calor del refrigerador termoeléctrico son Q_{H2} , es el calor de rechazo por la fuente térmica superior a temperatura T_{H2} ; Q_n , es el calor en la unión de las dos etapas a temperatura T_n y Q_{L2} , es el calor absorbido de la fuente de calor a temperatura T_{L2} .

Chen et al. [5], analizó el rendimiento del refrigerador impulsado por el generador termoeléctrico ambos de dos etapas. El número total de pares de elementos termoeléctricos es finito, es decir, $M = m_1 + m_2 + n_1 + n_2$. Chen determina los valores óptimos de elementos termoeléctricos y la corriente de trabajo eléctrica, $I_{opt,QL2}$, para una carga de enfriamiento máxima, Q_{L2} , utilizados en el coeficiente de desempeño del sistema combinado, COP, o rendimiento del sistema ε .

Por otra parte Zhai et al. [4], establecieron un modelo de elementos finitos, térmico-eléctrico-mecánico acoplado de materiales termoeléctricos (MTE) para su uso en aplicaciones de calor residual de un motor de combustión interna. Estos autores estudian la eficiencia de conversión y los esfuerzos térmicos a los que están sometidos los dispositivos termoeléctricos (TE). La temperatura en el tubo de escape oscila entre 107 °C a 500 °C y se distribuye a lo largo del tubo [4], como se muestra en la Fig. 2.

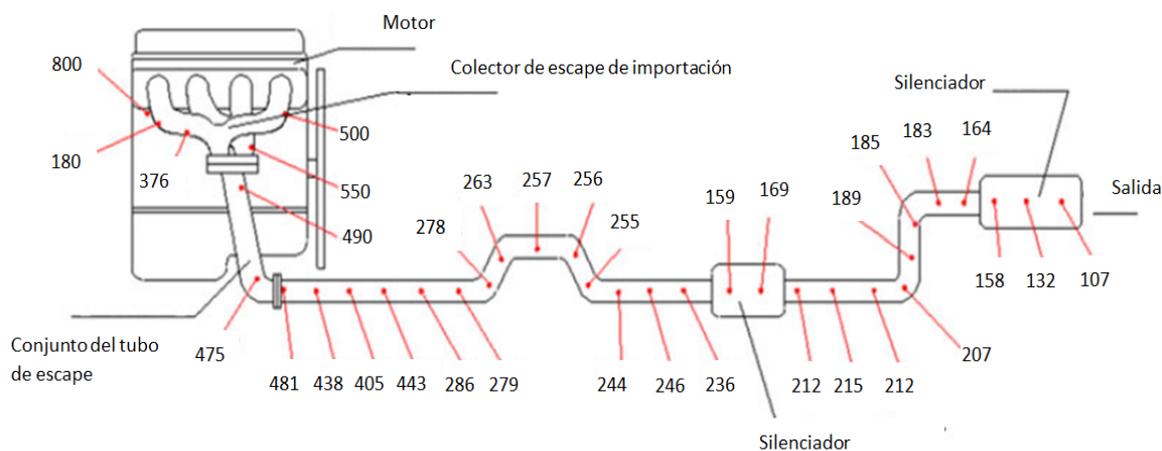


Fig. 2. Distribución de temperatura en las paredes del tubo de escape del vehículo. Tomada de la referencia [4].

A partir del análisis de la optimización del funcionamiento de los dispositivos termoeléctricos de dos etapas [5], es posible obtener resultados prácticos utilizando los datos comerciales de los módulos termoeléctricos TEM's considerando la distribución, así como los rangos, de temperatura en el tubo de escape [4]. Esto con el propósito de obtener el comportamiento del sistema TE con valores experimentales.

2.1. Ecuaciones de balance

Siguiendo el análisis propuesto por Chen et al. [5], analizamos primero el TEG de dos etapas. Las ecuaciones de balance para el TEG están dadas por:

$$Q_{H1} = m_1 \left[\alpha I T_{H1} + K(T_{H1} - T_m) - \frac{1}{2} I^2 R \right] \quad (1)$$

$$Q_m = m_1 \left[\alpha I T_m + K(T_{H1} - T_m) + \frac{1}{2} I^2 R \right] \quad (2)$$

$$Q_m = m_2 \left[\alpha I T_m + K(T_m - T_{L1}) - \frac{1}{2} I^2 R \right] \quad (3)$$

$$Q_{L1} = m_2 \left[\alpha I T_{L1} + K(T_m - T_{L1}) + \frac{1}{2} I^2 R \right] \quad (4)$$

Para obtener el coeficiente de desempeño del sistema combinado, ε , en términos de las temperaturas de las fuentes térmicas, T_{H1} y T_{L1} , es necesario determinar la temperatura de la unión T_m . Igualando la ecuación (2) con la ecuación (3) obtenemos:

$$T_m = \frac{0.5I^2R(m_1 + m_2) + K(m_1T_{H1} + m_2T_{L1})}{m_1K + m_2K + m_2\alpha I - m_1\alpha I} \quad (5)$$

Sustituimos T_m en la ecuación (1) para obtener Q_{H1}

$$Q_{H1} = m_1 \left\{ \alpha I T_{H1} + K \left[T_{H1} - \left(\frac{0.5I^2Rm_1 + 0.5I^2Rm_2 + m_1KT_{H1} + m_2KT_{L1}}{m_1K + m_2K + m_2\alpha I - m_1\alpha I} \right) \right] - \frac{1}{2} I^2 R \right\} \quad (6)$$

Para el refrigerador termoeléctrico de dos etapas tenemos:

$$Q_{H2} = n_1 \left[\alpha I T_{H2} - K(T_{H2} - T_n) + \frac{1}{2} I^2 R \right] \quad (7)$$

$$Q_n = n_1 \left[\alpha I T_n - K(T_{H2} - T_n) - \frac{1}{2} I^2 R \right] \quad (8)$$

$$Q_n = n_2 \left[\alpha I T_n - K(T_n - T_{L2}) + \frac{1}{2} I^2 R \right] \quad (9)$$

$$Q_{L2} = n_2 \left[\alpha I T_{L2} - K(T_n - T_{L2}) - \frac{1}{2} I^2 R \right] \quad (10)$$

Realizamos lo mismo para la temperatura de la unión T_n igualamos la ecuación (8) con la ecuación (9) obteniendo:

$$T_n = \frac{0.5I^2R(n_1 + n_2) + K(n_1T_{H2} + n_2T_{L2})}{n_1K + n_2K + n_1\alpha I - n_2\alpha I} \quad (11)$$

Sustituimos T_n en la ecuación (8) para obtener Q_{L2}

$$Q_{L2} = n_2 \left\{ \alpha I T_{L2} - K \left[\left(\frac{0.5I^2Rn_1 + 0.5I^2Rn_2 + n_1KT_{H2} + n_2KT_{L2}}{n_1K + n_2K + n_1\alpha I - n_2\alpha I} \right) - T_{L2} \right] - \frac{1}{2} I^2 R \right\} \quad (12)$$

A partir de las ecuaciones (6) y (12) obtenemos el rendimiento del sistema, ε , [5] definido por:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{Q_{L2}}{Q_{H1}} \\ &= \frac{n_2 \left\{ \alpha I T_{L2} - K \left[\left(\frac{0.5I^2Rn_1 + 0.5I^2Rn_2 + n_1KT_{H2} + n_2KT_{L2}}{n_1K + n_2K + n_1\alpha I - n_2\alpha I} \right) - T_{L2} \right] - \frac{1}{2} I^2 R \right\}}{m_1 \left\{ \alpha I T_{H1} + K \left[T_{H1} - \left(\frac{0.5I^2Rm_1 + 0.5I^2Rm_2 + m_1KT_{H1} + m_2KT_{L1}}{m_1K + m_2K + m_2\alpha I - m_1\alpha I} \right) \right] - \frac{1}{2} I^2 R \right\}} \end{aligned} \quad (13)$$

En nuestros resultados numéricos utilizamos las ecuaciones (6), (12) y (13) para calcular el calor absorbido, Q_{H1} , el calor absorbido por el refrigerador, Q_{L2} , y el rendimiento ε , propuestos por Chen et al. [5].

3. Resultados

En nuestro cálculo numérico partimos de la distribución de temperatura en el tubo de escape del automóvil reportada por Zhai et al. [4]. El rango de temperaturas va de los 164°C a los 500°C antes de llegar al múltiple de escape. En este trabajo descartamos aquellos puntos que corresponden a los silenciadores.

Las Tablas 1 y 2 muestran, el número total de pares (N), el número de pares de termocuplas (n o m) para cada etapa, el coeficiente Seebeck (α), la conductividad térmica (K), la intensidad de corriente (I) y la resistencia eléctrica (R) de los TEG's y TEC's de dos etapas [6]. Sin embargo, se hacen correcciones a los coeficientes, α , K y R, que son afectados por su geometría, el tipo de dopaje (P o N) y el material de los semiconductores [7, 8].

Tabla 1. Datos del módulo termoelectrico generador (TEG).

Modulo Termoelectrico							
TEG de dos Etapas	N	m ₁	m ₂	α (V/K)	K (W/K)	R (Ω)	I (A)
TE-2-(31-12)-1.0	43	31	12	0.000129	0.121647	0.8944	0.9
TE-2-(127-127)-1.3	254	127	127	0.000762	0.718566	5.2832	0.9

Tabla 2. Datos del módulo termo eléctrico enfriador (TEC).

Enfriador Termoelectrico							
TEC de dos Etapas	N	n ₁	n ₂	α (V/K)	K (W/K)	R (Ω)	I (A)
2MD06-014	14	8	6	0.005978	0.039606	0.2912	0.9
2MD04-022	22	16	6	0.009394	0.062238	0.4576	0.75
2MD06-042	42	30	12	0.017934	0.118818	0.8736	0.9
2MC04-063	63	47	16	0.026901	0.178227	1.3104	0.8
2MD06-066	66	48	18	0.028182	0.186714	1.3728	0.9
2MC04-083	83	24	59	0.035441	0.234807	1.7264	0.8
2MD06-102	102	70	32	0.043554	0.288558	2.1216	0.9
2MD06-138	138	96	42	0.058926	0.390402	2.8704	0.9

En la Tabla 3 se presentan los resultados numéricos correspondientes a las ecuaciones (6), (12) y (13) calculados con los valores de la Tabla 1 y 2.

Tabla 3. Rangos de temperatura, calor, rendimiento (ϵ).

Temperatura de Entrada T_{H1} (K)	$Q_{H1,max}$ (W)	Temperatura de Salida T_{L2} (K)	$Q_{L2,max}$ (W)	ϵ
437.15	5752.601	245	1.25394	0.000218
456.15	6621.205	250	3.311505	0.0005
458.15	6712.638	255	5.369071	0.0008
462.15	6895.502	260	7.426636	0.001077
480.15	7718.39	265	9.484201	0.001229
485.15	7946.971	270	11.54177	0.001452
488.15	8084.119	275	13.59933	0.001682
509.15	9044.155	280	15.6569	0.001731
517.15	9409.884	285	17.71446	0.001864
519.15	9501.316	290	19.77203	0.002101
528.15	9912.76	295	21.82959	0.002202

4. Discusión de Resultados

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 3, obtenemos el comportamiento del rendimiento, ϵ , y el calor absorbido, Q_{L2} , en función de la temperatura T_{H1} de la fuente térmica del TEG, y la temperatura T_{L2} de la fuente de calor del TEC. Mostrados en las Figs. 3, 5, 7 y 9.

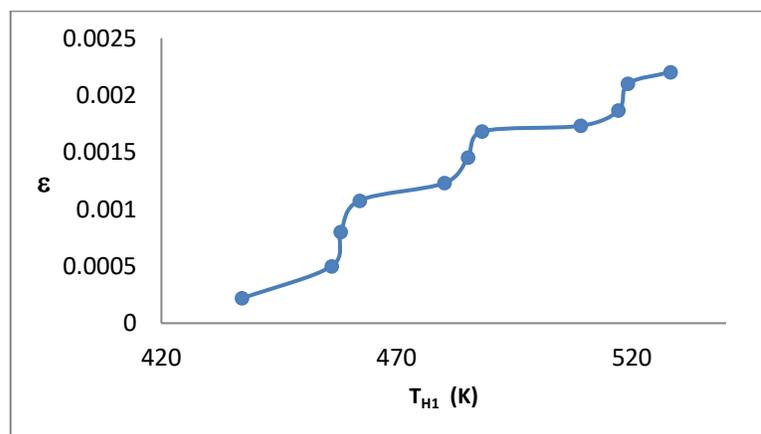


Fig. 3. Rendimiento ϵ vs. Temperatura T_{H1} de la fuente de calor del generador de dos etapas.

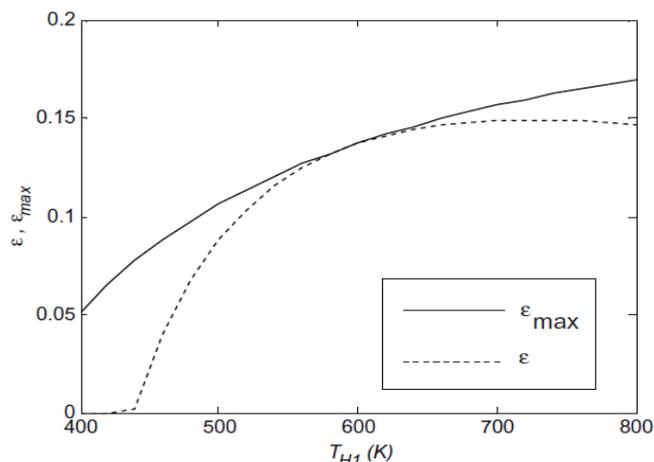


Fig. 4. Rendimiento ϵ vs. Temperatura T_{H1} de la fuente de calor del generador de dos etapas. Tomada de la referencia [5].

La variación del rendimiento del sistema ϵ en la Fig. 3 y 4 se debe a que los TEM's comerciales, el número de termopares es diferente en cada etapa mientras que en la Fig. 4, se consideran el mismo número de pares por etapa. Las temperaturas en la Fig. 3 se obtienen de los valores obtenidos del tubo de escape [4], mientras que las temperaturas de la Fig. 4 se proponen. No obstante la Fig. 3 muestra un comportamiento cualitativamente aceptable en comparación con la Fig. 4. Nótese que al aumentar la temperatura T_{H1} el rendimiento del sistema ϵ aumenta como a de esperarse.

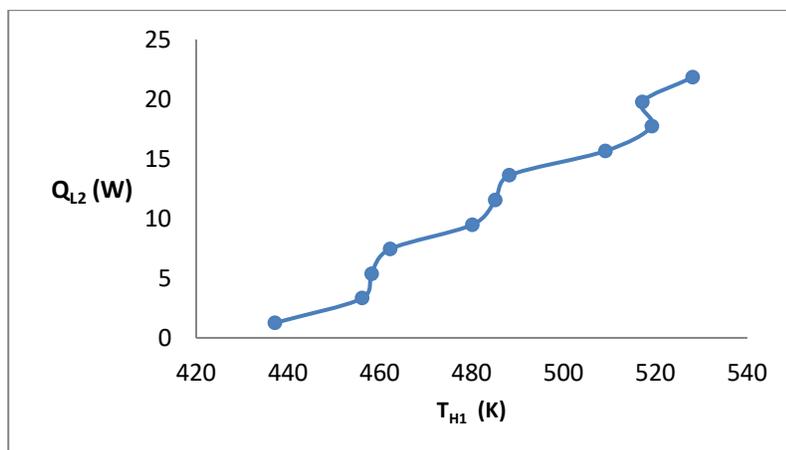


Fig. 5. Carga de enfriamiento Q_{L2} versus Temperatura T_{H1} de la fuente de calor del generador de dos etapas.

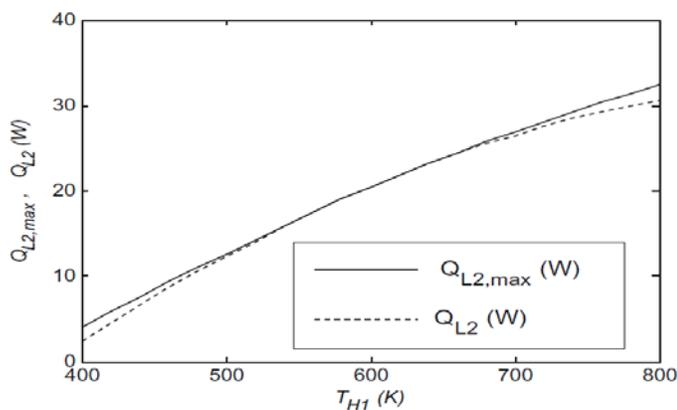


Fig. 6. Carga de enfriamiento Q_{L2} versus Temperatura T_{H1} de la fuente de calor del generador de dos etapas. Tomada de la referencia [5].

La Fig. 5 muestra un comportamiento cualitativamente similar a la Fig. 6, es decir, cabe señalar que al aumentar la temperatura T_{H1} de la fuente térmica del generador, se incrementa el calor Q_{L2} absorbido por el refrigerador.

Las gráficas 7 y 9 muestran el comportamiento del rendimiento del sistema en función de la temperatura T_{L2} .

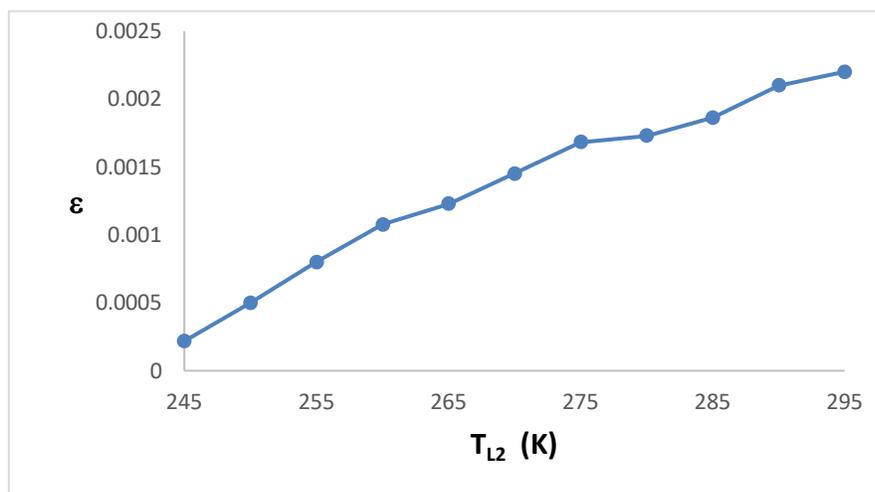


Fig. 7. Rendimiento ϵ versus Temperatura T_{L2} de la fuente de calor del refrigerador de dos etapas.

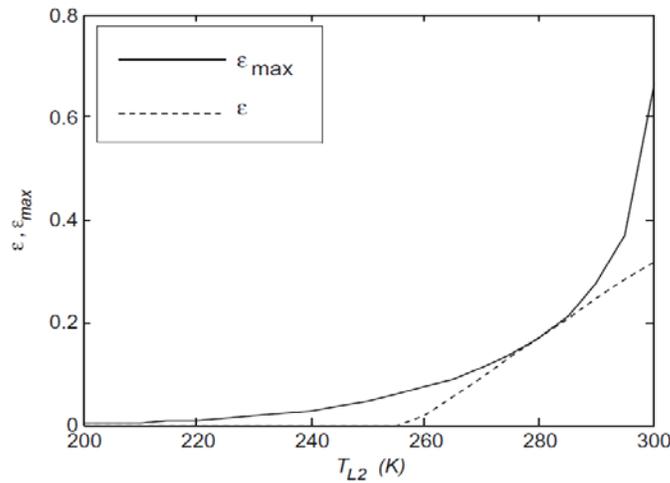


Fig. 8. Rendimiento ϵ versus Temperatura T_{L2} de la fuente de calor del refrigerador de dos etapas. Tomada de la referencia [5].

El comportamiento cualitativo de la Fig. 7 es similar al de la Fig. 8 entre los rangos de temperatura de 250 a 300 K. La diferencia entre estas dos curvas se debe al número de pares termoeléctricos y su distribución en cada etapa. Por ejemplo los termopares considerados en la referencia [5] tienen la configuración mostrada en la Fig. 9(a), y los TEM's fabricados comercialmente tienen la configuración mostrados en la Fig. 9(b).

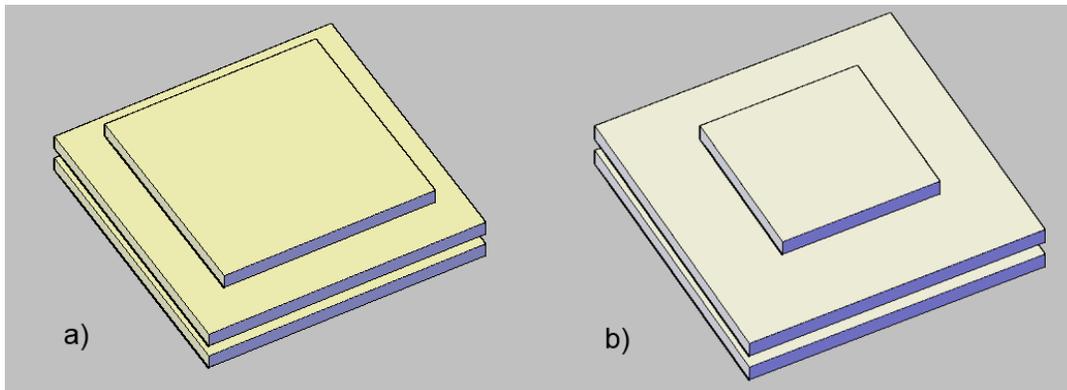


Fig. 9. a) Configuración de Chen et al. [5] b) Configuración de fabricación comercial.

La configuración propuesta por Chen et al. [5], tiene 56 termocuplas en la etapa inferior y 38 para la etapa superior. Mientras que la configuración comercial elegida tiene, 47 termocuplas en la etapa superior y 16 etapas en la inferior.

El rendimiento del sistema mejora conforme la temperatura T_{L2} (temperatura de la bebida a enfriar) es mayor, es decir, a medida que desciende la temperatura T_{L2} el rendimiento del sistema disminuye, debido a que se requiere mayor energía para extraer calor de la bebida fría.

Las Figs. 9 y 10 muestran el comportamiento del calor absorbido Q_{L2} por el TEC en función de la temperatura T_{L2} .

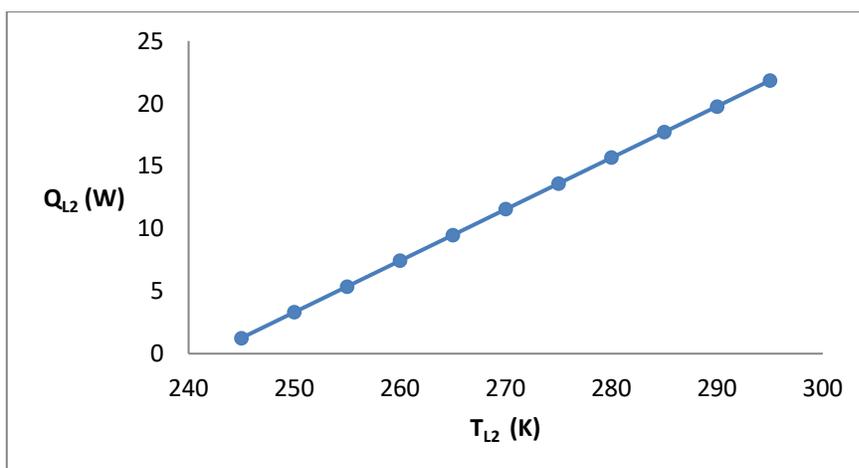


Fig. 9. Carga de enfriamiento Q_{L2} vs. Temperatura T_{L2} de la fuente de calor del refrigerador de dos etapas.

El comportamiento cualitativo de la Fig. 9 es similar al de la Fig. 10 entre los rangos de temperatura de 245 K a 300 K. Nótese que cuanto mayor sea la temperatura de la bebida a enfriar, T_{L2} , el sistema tendrá que extraer mayor calor, Q_{L2} , al inicio del proceso de enfriamiento.

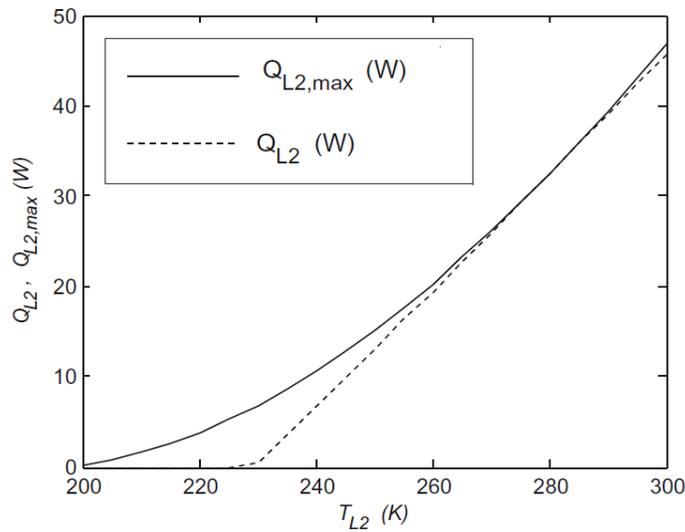


Fig. 10. Carga de enfriamiento Q_{L2} vs. Temperatura T_{L2} de la fuente de calor del refrigerador de dos etapas. Tomada de la referencia [5].

5. Conclusiones

Los resultados numéricos obtenidos en este trabajo para el comportamiento del rendimiento y de la capacidad de enfriamiento del sistema combinado utilizando los valores comerciales para un TEG y un TEC junto con los valores de temperatura en distintos puntos del tubo de escape de un automóvil son consistentes con la predicción teórica.

Nuestro análisis muestra que de acuerdo al modelo teórico propuesto [5] es posible extraer una cantidad de calor cercana a $Q_{L2} = 32 \text{ W}$ a una temperatura de $T_{L2} = 280 \text{ K}$. Mientras que utilizando los valores comerciales de los TEG y TEC podemos extraer aproximadamente una cantidad de calor de $Q_{L2} = 15.6 \text{ W}$ para una temperatura de $T_{L2} = 280 \text{ K}$. Así, para enfriar una bebida de 600 ml a partir de una temperatura inicial de 295 K hasta una temperatura de 280 K, tardara en alcanzar esa temperatura en 8 minutos.

La viabilidad experimental del sistema termoeléctrico combinado de un TEG y un TEC acoplados para el aprovechamiento del calor de desecho presente en los gases de

combustión de un automóvil está basada en modelos teóricos analizados en este trabajo así como los valores comerciales reportados para las propiedades termoeléctricas del TEC y del TEC.

Por lo tanto el modelo utilizado para un sistema termoeléctrico combinado y los valores comerciales reportados por los fabricantes de módulos termoeléctricos, nos proporcionan la información necesaria para realizar un prototipo de pruebas para obtener nuevos resultados experimentales como se muestra en la Fig. 11. Este prototipo consta de los siguientes componentes:

- Disipadores de calor, placas de aluminio
- Módulos termoeléctricos de dos etapas
- Segmento de un tubo de escape
- Estructura

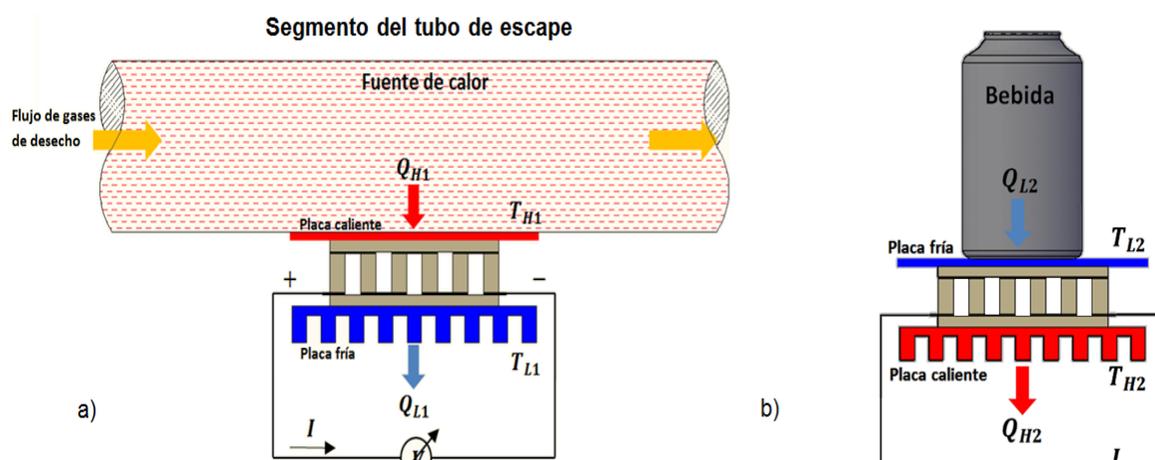


Fig. 11. Partes del prototipo. a) Montaje del generador al tubo de escape. b) Refrigeración de la bebida.

La Fig. 12 muestra el arreglo del TEG con los disipadores de calor. Utilizaremos un disipador de calor y una placa de aluminio. Se colocara la placa en contacto directo al tubo de escape y el disipador de calor en la cara fría del módulo.

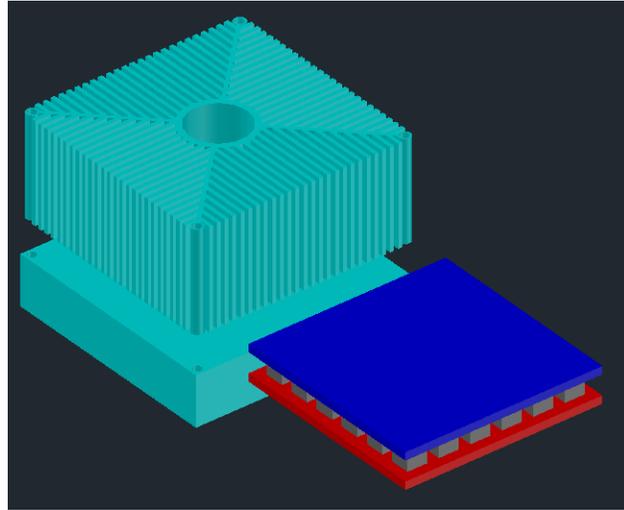


Fig. 12. Módulo termoeléctrico generador, disipador de calor y placa.

El montaje de los módulos termoeléctricos en el tubo de escape se muestra en la Figura 13.

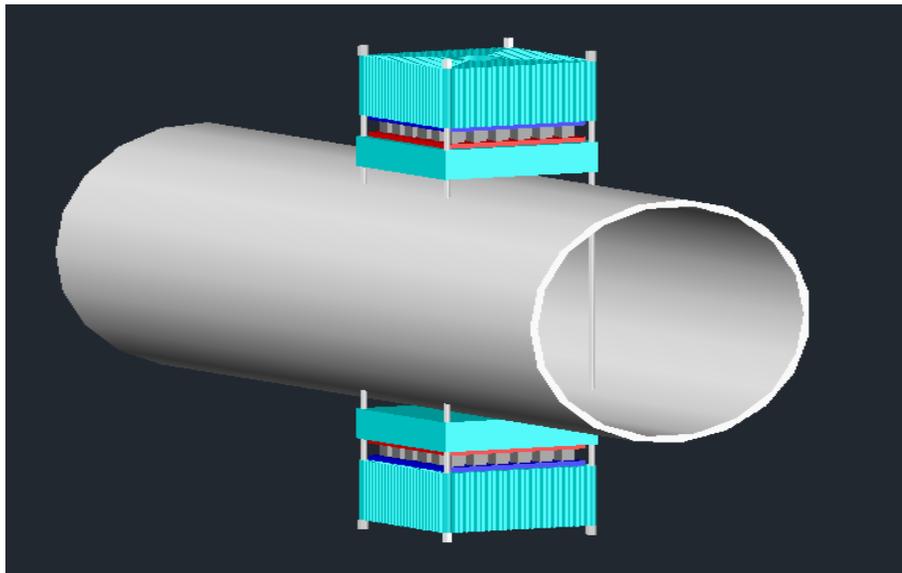


Fig. 13. Segmento de un tubo de escape, colocación de prototipo de pruebas.

El diseño del prototipo, los componentes y materiales se puede elegirse de acuerdo a las necesidades.

Cabe destacar que el modulo termoeléctrico generador tiene como objetivo producir energía eléctrica, sin embargo nuestro proyecto tiene la finalidad de alimentar un módulo termoeléctrico enfriador, sin tener un almacenamiento de energía previo en baterías.

6. Referencias

- [1.] E. Bollati, "Generadores termoeléctricos, generación de energía sin partes móviles". *Petrotecnica*. 31. 2007. 84-90.
- [2.] L. Garcia-Colin, *Introducción a la termodinámica clásica*. 4 Ed. 2012. Trillas. México.
- [3.] Y.Y. Hsiao, W.C. Chang, S.L. Chen, "A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine". *Energy*. 35. 3. 2010. 1447–1454.
- [4.] G. Chen, Y. Mu, P. Zhai, G. Li, Q. Zhang, "An Investigation on the Coupled Thermal–Mechanical–Electrical Response of Automobile Thermoelectric Materials and Devices". *Journal of Electronic Materials*. 42. 7. 2013. 1762-1770.
- [5.] F. Meng, L. Chen, F. Sun, "Performance optimization for two-stage thermoelectric refrigerator system driven by two-stage thermoelectric generator". *Cryogenics*. 49. 2. 2009. 57-65.
- [6.] *Thermoelectric Cooling Solutions*. www.rmtltd.ru. Junio 2014.
- [7.] M. Yamanashi, "A new approach to optimum design in thermoelectric cooling systems". *J. Appl. Phys*. 80. 9. 1996. 5494-5502.
- [8.] C. Hsu, G. Huang, H. Chu, B. Yu, D. Yao, "An effective Seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module ". *AppliedEnergy*. 88. 12. 2011. 5173-5179.

7. Autores

Lic. en Ingeniería Mecánica Gerardo Plata Medina Obtuvo su título de Licenciatura en Ingeniería Mecánica por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Culhuacan del Instituto Politécnico Nacional (IPN), actualmente estudiante de Maestría de Ingeniería en Sistemas Energéticos en ESIME Unidad Culhuacan del IPN.

Lic. en Ingeniería Mecánica Carlos Alberto Badillo Ruiz Obtuvo su título de Licenciatura en Ingeniería Mecánica por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Culhuacan del Instituto Politécnico Nacional (IPN), actualmente estudiante de Maestría de Ingeniería en Sistemas Energéticos en ESIME Unidad Culhuacan del IPN.

Dr. 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). Realizo 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) Unidad Culhuacan del IPN. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) ininterrumpidamente desde 1997 a la fecha.