

Análisis energético de un sistema de generación termoeléctrica utilizando calor residual de celdas de combustible

Energy analysis of a thermoelectric generation system using waste heat from fuel cells

VALLE-HERNÁNDEZ, Julio†*, OLVERA-RODRÍGUEZ, Omar Alejandro, ROMÁN-AGUILAR, Raúl y ROJAS-AVILA, Apolo

*Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Escuela Superior de Apan
Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo. Maestría en Ingeniería Aeroespacial*

ID 1^{er} Autor: Julio, Valle-Hernández / ORC ID: 0000-0001-8957-0066, Researcher ID Thomson: O-7339-2018, CVU CONACYT ID: 210743

ID 1^{er} Coautor: Omar A., Olvera-Rodríguez / ORC ID: 0000-0002-2511-3445, Researcher ID Thomson: S-1246-2018

ID 2^{do} Coautor: Raúl, Román-Aguilar / ORC ID: 0000-0002-2284-0911, Researcher ID Thomson: O-7804-2018

ID 3^{er} Coautor: Apolo, Rojas-Avila / ORCID: 0000-0003-2934-2533, Researcher ID Thomson: O-4655-2018, CVU CONACYT ID: 905177

Recibido 20 Abril, 2018; Aceptado 30 Junio, 2018

Resumen

El aumento en los precios de combustibles fósiles y el impacto negativo hacia el planeta que implica su obtención y consumo, ha promovido la investigación en tecnologías alternativas como la de vehículos híbridos y vehículos que funcionan mediante celdas de combustible. Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que mediante la inyección de hidrogeno como combustible producen energía eléctrica, agua y calor, de los cuales, para aplicaciones de rubro automotriz, únicamente se aprovecha la energía eléctrica. En este trabajo se presenta una propuesta para aprovechar el calor residual que genera la celda, y mejorar la eficiencia eléctrica de la misma, mediante un sistema de co-generación que emplea termoeléctricos. Un termoeléctrico es un dispositivo que a partir del efecto Seebeck aprovecha un gradiente de temperaturas para generar una diferencia de potencial. En el estudio se realiza un análisis energético donde se evalúan diversas condiciones de trabajo para los dispositivos de generación termoeléctrica que considera diferentes gradientes de temperatura (temperatura sobre la celda y la respecto al ambiente). Como resultado, se presenta un arreglo óptimo de los dispositivos termoeléctricos, determinando la potencia máxima generada a partir del flux de calor entre la celda de combustible y el dispositivo termoeléctrico y la eficiencia energética asociada a todo el proceso.

Celda de Combustible, Termoeléctricos, Calor Residual

Abstract

Increase in the price of fuels and the negative impact on the planet that implies its consumption and procurement, have promoted research in alternative technologies such as hybrid vehicles and vehicles that employ fuel cells. Fuel cells are electrochemical devices that by injection of hydrogen produce electric power, water and heat, but for industry automotive applications only the electric power is used. In this paper a proposal to take advantage of residual heat generated by the fuel cell is presented, with object from improve the efficiency of it through a cogeneration system that uses thermoelectrics. A thermoelectric is a device that from the Seebeck effect takes advantage of a gradient temperature to generate a differential potential. In the study an energy analysis is carried out where different working conditions for thermoelectric generation devices are evaluated that consider temperature gradient different (temperature on the cell and temperature with respect to the environment). As a result, an adequate arrangement of the thermoelectric devices is obtained, the power generated through heat flux between the circuit and energy efficiency associated with the whole process are calculated.

Fuel Cells, Thermoelectrics, Waste Heat

Citación: VALLE-HERNÁNDEZ, Julio, OLVERA-RODRÍGUEZ, Omar Alejandro, ROMÁN-AGUILAR, Raúl y ROJAS-AVILA, Apolo. Análisis energético de un sistema de generación termoeléctrica utilizando calor residual de celdas de combustible. Revista de Ingeniería Mecánica. 2018. 2-6: 20-27.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: julio_valle@uaeh.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El aumento al precio de los combustibles derivados del petróleo y el impacto negativo hacia el planeta que implica su obtención y consumo, ha promovido la investigación en tecnologías alternativas. Se prevé que entre los años 2010-2050 existirá un incremento en la producción de CO₂ del 370% que es equivalente a 536 millones de toneladas de CO₂ más respecto al valor actual producido que es de 146 millones de toneladas de CO₂. (Sheinbaum Pardo & Solís Ávila, 2016). La mayor producción de emisiones está dada por la combustión de gasolina donde el principal consumidor es el sector de autotransporte.

Recientemente se ha promovido el avance tecnológico en el diseño de automóviles para disminuir las emisiones de gases de combustión y conjuntamente para mejorar el rendimiento de combustible. Estos avances incluyen el uso de biocombustibles y aditivos para reducir contaminantes, el diseño de motores eléctricos que contribuyen a solventar la demanda energética de un automóvil (automóviles híbridos), así como la implementación de celdas de combustible para obtener la energía capaz de impulsar autos eléctricos.

Una celda de combustible tiene la capacidad de convertir energía electroquímica obtenida a partir de una reacción entre hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂) en energía eléctrica, agua (H₂O) y calor. La siguiente figura muestra los reactivos y productos de una celda de combustible:

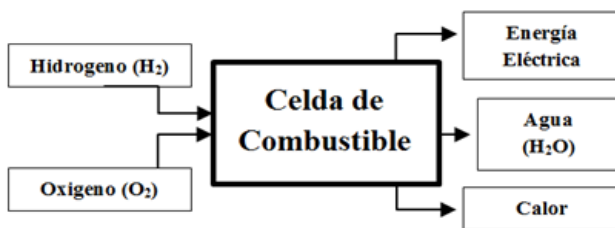


Figura 1 Diagrama de los reactivos y productos en una celda de combustible.

Fuente: (Rozo Q. & Tibaquirá G., 2007)

La cantidad de energía eléctrica producida en la celda de combustible depende directamente de su principio de funcionamiento, pudiéndose tener temperaturas de operación en el rango de 80 a 1000°C. (Cano Castillo, 1999).

El calor generado por la celda de combustible no siempre es aprovechado por algún proceso, considerándose como energía residual de la celda. Por otra parte, en los últimos años se ha promovido la búsqueda de nuevas alternativas de generación de electricidad, que permitan satisfacer la creciente demanda, y que sean consideradas como energías limpias.

Actualmente ya existen dispositivos termoelectricos que producen energía limpia, los cuales están conformados por materiales semiconductores que se encuentran conectados térmicamente en paralelo y eléctricamente en serie. Los dispositivos termoelectricos son capaces de generar un potencial eléctrico a partir de un gradiente de temperaturas en los extremos de una unión entre dos materiales diferentes, dicho efecto es conocido como efecto Seebeck.

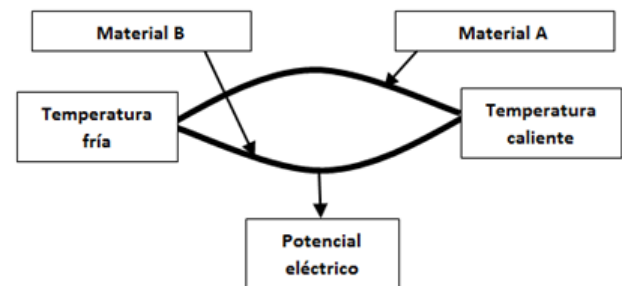


Figura 2 Representación del efecto de generación termoelectrica

Fuente: (Seebeck)

La implementación de dispositivos termoelectricos puede contribuir a satisfacer la demanda energética de algunos sistemas eléctricos, produciendo un ahorro económico al tratarse de dispositivos que no disponen de partes móviles que puedan llegar a necesitar de algún tipo de servicio preventivo para su funcionamiento.

En el presente trabajo se evalúa el diseño de un sistema de co-generación de energía que involucra un sistema termoelectrico (TEG) que aprovecha el calor residual de una celda de combustible como fuente de energía, para su potencial aprovechamiento en vehículos eléctricos. La evaluación del diseño se realiza a partir de un análisis energético, el cual se desarrolla en base al modelado matemático del sistema y a su simulación en CFD, demostrando la factibilidad del sistema para producir energía limpia.

Metodología

La metodología para el análisis energético del sistema propuesto, inicia con la elección de la celda de combustible, la cual será del tipo PEM (membrana de intercambio protónico), por ser la más utilizada en la industria automotriz. Una vez seleccionado el tipo de celda de combustible, se determina su temperatura promedio de operación y el calor residual producido por ésta. El calor generado por la celda PEM será la fuente de energía del dispositivo termoelectrico (TEG), que se considera en la ecuación de conducción de calor.

Para el análisis la transferencia de calor se considera la convección entre el aire y un sistema de enfriamiento que ayudará a disipar el calor sobre el TEG. La siguiente figura muestra el sistema compuesto por el TEG, Celda de combustible y disipador de calor:

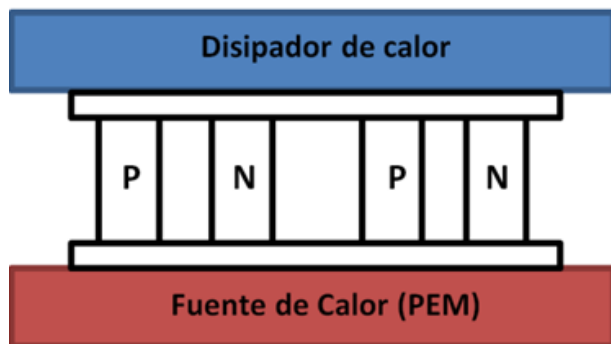


Figura 3 Diagrama del sistema de generación termoelectrica.

Fuente: *Elaboración Propia*

En cuanto a la elección del dispositivo termoelectrico, se revisaron e identificaron algunos tres tipos de TEGs que ya se comercializan en el mercado, sin uso determinado, y se analizaron en base a las dimensiones de los materiales semiconductores. Los materiales del tipo p y n que se proponen para el diseño se eligieron a partir de las temperaturas a las que van a interactuar con las de la pared externa de la celda PEM, esto se realiza con el fin de asegurar que los TEG tengan la mayor eficiencia posible.

Se analiza la tasa de transferencia de calor a través de los materiales termoelectricos propuestos mediante un modelo CFD, en el que se determina su comportamiento y los parámetros de rendimiento.

Con el fin de mejorar la producción de energía por parte del sistema hibrido se propone generar una cantidad de 500 Watts por cada TEG, por lo que la cantidad de juntas termoelectricas se calculará mediante el potencial eléctrico que se desea producir.

De acuerdo a los requerimientos de energía eléctrica para alimentar un automóvil es necesario determinar el coeficiente de Seebeck, conductividad térmica, resistencia eléctrica y figura de merito (ZT), la cuál mide el rendimiento de los dispositivos termoelectricos.

El rendimiento del dispositivo se determina a partir de la relación entre las propiedades de cada material, para llevar a cabo el cálculo de la potencia final máxima, el número de juntas termoelectricas máximas, la corriente máxima y voltaje máximo, los cuáles serán necesarios para llevar a cabo el diseño y modelado del TEG.

Finalmente se realizó el análisis energético a partir de los resultados obtenidos y se llegó a una conclusión en base al aumento en la producción de energía eléctrica.

Parámetros de entrada

Los parametros de entrada del sistema están dados por la operación de la celda de combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEM), las cuales operan a temperaturas de 80° C a 100° C. Las celdas de combustible del tipo PEM, son capaces de entregar normalmente 250 kW de energía, utilizando una membrana polimérica conductora de protones que funciona como electrolito.

Además de que son capaces de operar a presiones de hasta 30 psi entregando como máximo 285 kW, sin embargo, al colocar colectores de corriente adecuados pueden soportar presiones de hasta 3000 psi, lo que provoca un incremento mayor de la demanda energética, así como la densidad de la corriente. (Cano Castillo, 1999).

Durante el proceso de obtención de energía eléctrica por una celda de combustible se produce calor residual, el cual se propone aprovechar por medio de dispositivos termoelectricos.

Identificación de dimensiones y materiales termoelectricos

Aunque actualmente se comercializan dispositivos de generación termoelectrica para temperaturas de hasta 300° C en la junta caliente, para el sistema que se propone se utilizarán dispositivos con temperaturas menores a 120° C que permiten adaptarse a las temperaturas de operación de la celda. Dicho dispositivo se construirá a partir de materiales disimilares pretendiendo que la eficiencia sea mayor a la de dispositivos que ya se encuentran en el mercado.

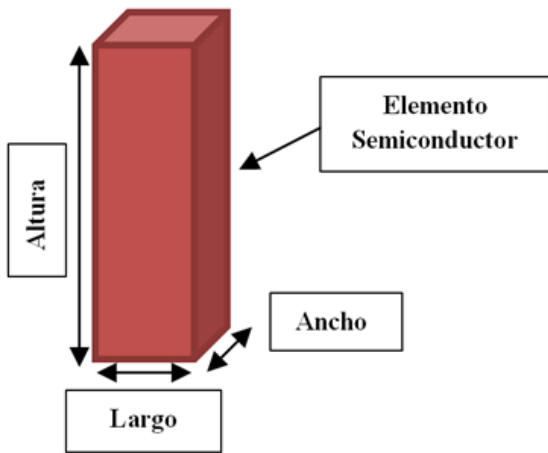


Figura 4 Material semiconductor
Fuente: *Elaboración Propia*

Los materiales que conforman al TEG son elementos semiconductores de tipo p y n, los cuales se consideran como los mejores materiales para esta aplicación, debido a que teniendo temperaturas altas responden con una mejor conductividad eléctrica. Además, para el diseño del sistema de generación termoelectrica se considera que los materiales ocupados como semiconductores p y n deben ser disimilares en características y dimensiones base.

En la tabla 1 se presentan las propiedades físicas de los materiales; K_n = conductividad térmica, ρ_n = resistividad eléctrica y α_n = coeficiente de Seebeck, que servirán para desarrollar los cálculos de potencia del TEG.

Propiedades del material tipo-n (Bi ₂ Te ₃)				
Modulo	K_n W/m ² K	ρ_n Ω*m	α_n μV/K	
A	1.8	2.11x10 ⁻⁴	-190	
B	1.8	2.11x10 ⁻⁴	-190	
C	1.8	2.11x10 ⁻⁴	-190	

Tabla 1 Propiedades físicas de los materiales semiconductores tipo-n
Fuente: *(de Oliveira Alves, 2007), (Xiaodong, K. T., & C. C., 2008)*

Por presentar valores teóricos altos de la figura de mérito (ZT), respecto a la temperatura de operación de las celdas de combustible, se utilizarán los mismos elementos semiconductores compuestos por telururo de bismuto (Bi₂Te₃) para los materiales del tipo p.

Propiedades del material tipo-p (Bi ₂ Te ₃)			
Modulo	k_p W/m ² K	ρ_p Ω*m	α_p μV/K
A	1.6	1.4x10 ⁻⁵	200
B	1.6	1.4x10 ⁻⁵	200
C	1.6	1.4x10 ⁻⁵	200

Tabla 2 Propiedades físicas de los materiales semiconductores tipo-p
Fuente: *(Nieto Magdalena, Olivares Robles, & Chanona Pérez, 2015), (Xiaodong, K. T., & C. C., 2008)*

De acuerdo a la figura 3, para el diseño del dispositivo termoelectrico se tomarán en cuenta las siguientes dimensiones que pertenecen a tres modelos de celdas TEG:

Dimensiones de los materiales p y n				
Modelo	Altura (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área Transversal (mm ²)
A	0.8	1.4	1.4	1.96
B	1.15	1.4	1.4	1.96
C	1.3	2	2	4

Tabla 3 Dimensiones geométricas para tres modelos de semi-conductores del TEG considerados para el estudio.
Fuente: *Elaboración Propia*

Análisis de transferencia de calor

El calor asociado al fenómeno termoelectrico involucra tres procesos diferentes: la transferencia de calor en medios sólidos, la perdida de energía por el efecto Joule y la conversión de una pequeña parte del flux de calor en una corriente eléctrica.

Las siguientes ecuaciones describen dichos procesos para el cálculo del calor absorbido y cedido por las juntas del TEG:

$$Q_H = \alpha T_H I - \frac{1}{2} I^2 R + kA \frac{(T_H - T_C)}{L} \tag{1}$$

$$Q_C = \alpha T_C I + \frac{1}{2} I^2 R + kA \frac{(T_H - T_C)}{L} \tag{2}$$

Donde: α es el coeficiente de Seebeck en [$\mu\text{V/K}$], Q_H la transferencia de calor en la cara caliente en [Watts], Q_C la transferencia de calor en la cara fría en [Watts], T_H la temperatura de la cara caliente en [K], T_C la temperatura de la cara fría [K], I la corriente en [Amps], R la resistencia eléctrica interna en [Ω], k la conductividad térmica en [$\text{W/m}^*\text{K}$], A el área transversal en [m^2], y L la longitud entre caras en [m].

El análisis relacionado a la transferencia de calor se realizará utilizando modelado CFD. El modelo CFD se realiza en 3 etapas diferentes; donde el primer paso es la transferencia de calor entre la PEM y la cara caliente del TEG, con el fin de identificar cual es el flujo de calor y la temperatura que tendrá el dispositivo de generación termoelectrica, posteriormente se simulan los materiales p y n que son construidos con telururo de bismuto (Bi_2Te_3) y cobre como base para la unión de las juntas entre ambos materiales. Finalmente se analiza la cara fría junto con el disipador de calor que se adaptará al dispositivo termoelectrico.

En base a las temperaturas de los semiconductores p y n, y a la diferencia de temperaturas entre caras, para cada uno de los diferentes modulos TEG se calculan los parámetros finales relacionados a la generación termoelectrica.

Cálculo de parámetros máximos

Al considerar ambos materiales como disimilares, las ecuaciones para el cálculo del coeficiente Seebeck, conductividad térmica, resistividad eléctrica, y resistencia eléctrica interna, quedan expresadas de la siguiente forma:

$$\alpha = \bar{\alpha}_p - \bar{\alpha}_n \quad (3)$$

$$K = k_p + k_n \quad (4)$$

$$\rho = \rho_p + \rho_n \quad (5)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (6)$$

Para determinar la potencia eléctrica que puede generar un dispositivo termoelectrico, se debe considerar la potencia máximos que puede generar cada módulo TEG, así como el número de juntas que tiene cada módulo.

La potencia máxima y el número de juntas, se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$W_{Max} = I^2 R \quad (7)$$

$$n_{juntas} = \frac{W}{W_{Max}} \quad (8)$$

Donde la potencia máxima se da en [Watts]. I = corriente [Amps], R = resistencia eléctrica interna [Ω] y n_{juntas} = número de juntas termoelectricas. La corriente y voltaje máximo se obtiene a partir de:

$$I_{Max} = \frac{\alpha \Delta T}{2R} \quad (9)$$

$$V_{Max} = \frac{n \alpha \Delta T}{2} \quad (10)$$

Donde: α = coeficiente de Seebeck en [$\mu\text{V/K}$], R = resistencia eléctrica interna en [Ω] y ΔT = diferencia de temperaturas en [K].

A fin de evaluar el beneficio energético que se tendría con el uso de los módulos termoelectricos como sistema de cogeneración, se realiza la simulación en CFD del modelo de TEG desarrollado.

En la simulación se considera una temperatura en la junta caliente de 80°C (353.15K). La distribución de temperaturas que se genera a partir del flujo de calor por los materiales semiconductores se determina mediante análisis CFD, tomando en cuenta la transferencia de calor por convección a temperatura ambiente (298.15 K).

Resultados

Los resultados se presentan por etapas, tomando en cuenta que a partir del flujo de calor se realiza el diseño y evaluación de cada Modulo TEG y sus parámetros máximos.

Análisis del flujo de calor y temperatura entre TEG y PEM

Se realizó el análisis de la transferencia de calor sobre una de las caras del dispositivo TEG, de acuerdo a la temperatura de la celda de combustible y la temperatura ambiente a la que se va a exponer nuestro sistema.

La pared caliente del termoelectrico recibe el calor generado por la celda de combustible, el cual puede considerarse constante mientras la celda PEM trabaje a condiciones nominales de operacion. El flujo de calor máximo promedio que la celda PEM puede transferir al dispositivo termoelectrico está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{Max} = \frac{W_{PEM}}{\eta} \frac{A_{TEG}}{A_{PEM}} \quad (11)$$

Dónde: W_{PEM} es la potencia generada por la Celda PEM (nominalmente 160 KW para autos eléctricos), η eficiencia de la Celda (aproximadamente 55 % para aplicaciones en transporte), y A_{TEG}/A_{PEM} relación entre áreas de transferencia de calor de la celda PEM y el termoelectrico TEG.

En la figura 5 podemos observar que la temperatura en la pared externa de la celda PEM es prácticamente la misma que la temperatura en la pared caliente del termoelectrico, debido a que la cerámica de la que está hecho el TEG es de un material que tiene una conductividad térmica muy alta, pero que en la cuestión eléctrica funciona como un buen aislante.

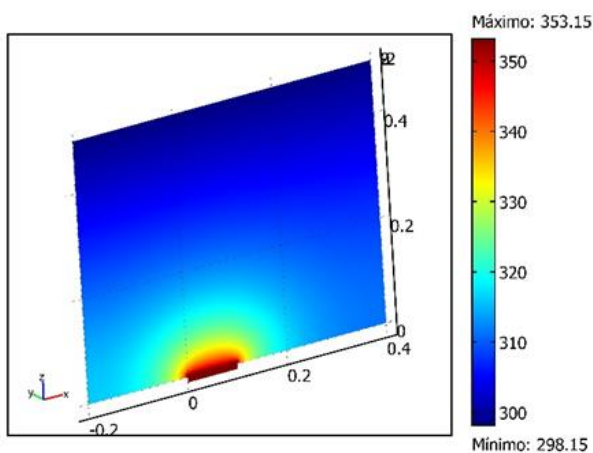


Figura 5 Simulación CFD de la temperatura entre la cara caliente del TEG y la PEM
Fuente: Elaboración Propia

En el grafico 1 se puede observar el flujo la distribución de temperaturas a través de la celda PEM y el dispositivo termoelectrico, tomando en cuenta el efecto convectivo del aire al que se encontrara expuesto.

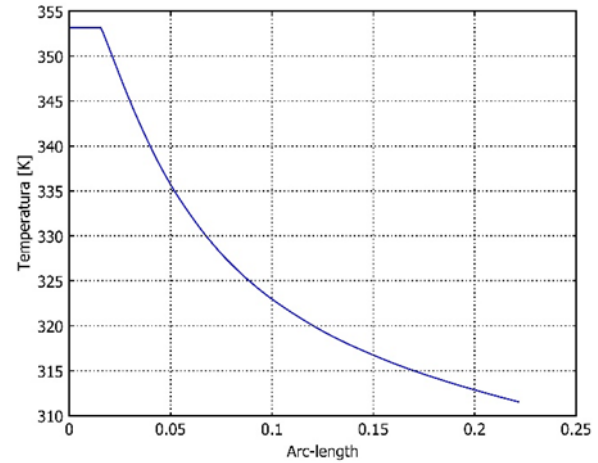


Gráfico 1 Distribución de temperaturas a través de la PEM y el TEG hasta la temperatura ambiente promedio
Fuente: Elaboración Propia

Análisis de la distribución de temperatura a través del material termoelectrico

El material termoelectrico es un elemento que tiene propiedades eléctricas y térmicas que lo caracterizan como un semiconductor. El análisis de la distribución de temperaturas se realizó para tres módulos termoelectricos diferentes, fabricados por la empresa Kryotherm. La geometría y materiales de los termoelectricos son las mismas, pero cambian en dimensiones, teniendo en cuenta que la base de unión de la junta es fabricada a partir de cobre.

En las siguientes figuras se presentan las distribuciones de temperatura para cada uno de los modelos de acuerdo a las dimensiones de la tabla 3.

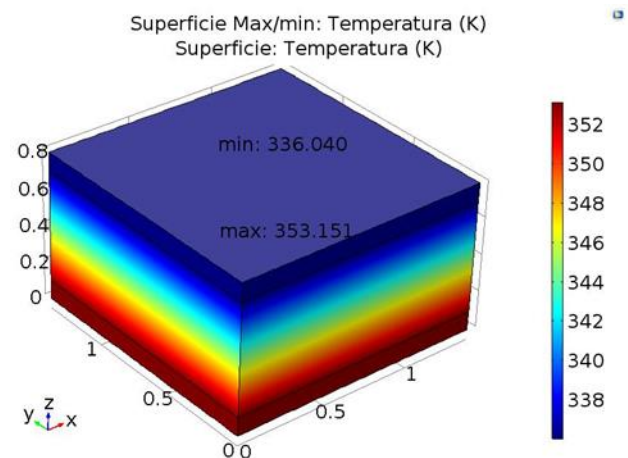


Figura 6 Simulación CFD de la distribución de temperatura en el modelo A
Fuente: Elaboración Propia

El modelo A se presenta un gradiente de temperatura de 17°C . La distribución de temperatura, sobre el sistema de coordenadas cartesianas, corresponde a un módulo con 199 juntas del material semiconductor A.

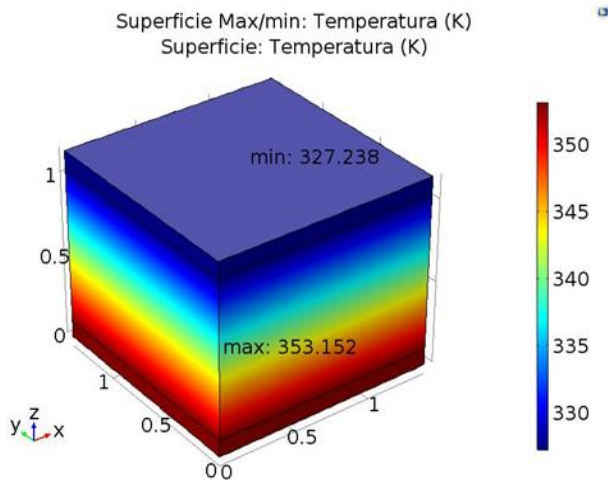


Figura 7 Simulación CFD de la distribución de temperatura en el modelo B

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso del modelo B se obtuvo una temperatura mínima de 327.23 K, que se refleja en un mayor gradiente de temperatura, el factor que origina este aumento en el gradiente es el aumento en las dimensiones del semiconductor B, respecto al semiconductor A.

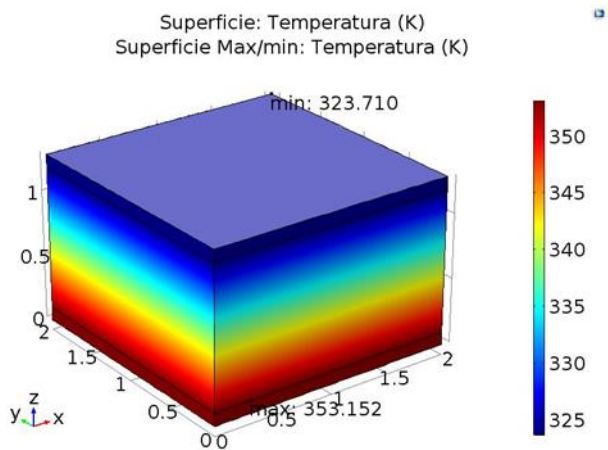


Figura 8 Simulación CFD de la distribución de temperatura en el modelo C

Fuente: Elaboración Propia

El modelo C confirma que al tener una mayor área transversal el calor se disipa de mejor manera, lo que repercute en tener una temperatura de cara fría menor, 323.710 K. La temperatura de la cara caliente del material TEG, en contacto con la pared exterior de la celda PEM, resultó de 353.15 K, debido a que la transferencia de calor fue alta.

A partir de los resultados anteriores podemos ver que el Modelo B es el que presenta un mayor gradiente de temperatura, 29.5°C , lo que se verá reflejado en una mayor potencia generada. No obstante, este gradiente de temperaturas puede mejorarse utilizando un disipador de calor en la cara fría y así obtener una mayor diferencia de potencial eléctrico.

Análisis del disipador de calor sobre la cara fría del TEG

Un disipador de calor tiene como función reducir la temperatura de diferentes componentes comúnmente electrónicos como es el caso de procesadores computacionales. El proceso está basado en una mayor disipación de calor al aumentar el área de transferencia de éste.

Para ello se eligió un disipador de calor con un TDP (Thermal Design Power) de 120 W que funciona mediante “heat pipes” y convección forzada. Sobre el análisis de transferencia de calor en el disipador se utilizó como referencia el Modelo termoelectrico B, pues es el que obtuvo mejores resultados en cuanto al gradiente de temperaturas, reduciendo de 353.15 a 323.71 K.

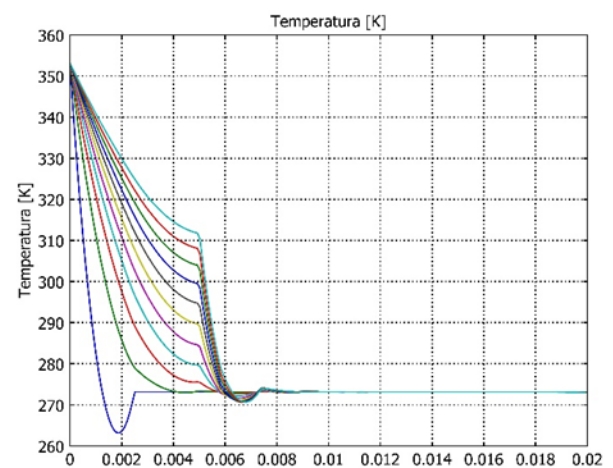


Gráfico 2 Distribución de temperatura a través del TEG con un disipador de calor

Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 2 se muestra la distribución de temperaturas a través del TEG con disipador. Se observa que la temperatura se reduce hasta llegar a los 313 K, con una diferencia de temperatura de 40 K.

Cálculo de la potencia generada

La potencia generada se determina a partir de las ecuaciones (7), (8) y (9), basadas en las propiedades de los materiales termoeléctricos y de acuerdo a la distribución de temperaturas. La siguiente tabla presenta los parámetros de diseño del módulo termoeléctrico propuesto, con disipador, y la potencia generada por el módulo.

Modulo B	α V/K	R Ω	n Juntas
Potencia generada = 7 W	3.74×10^{-4}	3.2×10^{-3}	398

La potencia generada corresponde a los parámetros máximos de operación de un solo módulo termoeléctrico de 398 juntas construidas a partir de Bi_2Te_3 con una base unión hecha de cobre. Se consideran 398 juntas, arreglos disponibles comercialmente, ensambladas en placas de alumina cerámica. Un dispositivo termoeléctrico, como el TGM-199-1,4-0,8 de la compañía Kryotherm, tiene unas dimensiones de $40 \times 40 \times 3,2$ mm, y consta de 6 placas cerámicas conectadas en serie. Considerando estas mismas características para el TEG propuesto, se obtendrá una potencia por dispositivo de 84 Watts.

Los generadores termoeléctricos podrían generar hasta 4.2 KW, con un área de pared externa de la Celda PEM de 0.5 m^2 . Lo anterior permitiría solventar parte la demanda de energía eléctrica del automóvil, mejorando la eficiencia eléctrica global del sistema en hasta un 3 %, impactando en el consumo de hidrógeno, combustible muy caro de obtener con energía limpia.

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos del modelo propuesto, simulado en CFD, y calculando los parámetros máximos, se puede afirmar que los dispositivos termoeléctricos presentan una buena capacidad para la generación de energía, además de que en el proceso de obtención de dicha energía no se produce ningún tipo de residuo contaminante, pues se utiliza calor residual. La simulación en CFD permitió conocer la distribución de temperaturas a partir del flujo de calor desechado por la celda PEM. En base al Modelo B propuesto y con ayuda de un disipador de calor se obtuvo un gradiente de temperatura de 40°C , el cual permite generar una potencia de 84 Watts por arreglo termoeléctrico.

Dado que cada arreglo termoeléctrico ocupa un área de 16 cm^2 , el realizar un acomodo y ensamblado óptimo de estos sobre la pared exterior de la Celda PEM es sumamente importante para obtener la mayor cantidad de energía eléctrica.

Los automóviles impulsados por una celda de combustible, la cual trabaja mediante hidrógeno, son una alternativa para el cuidado ambiental. Sin embargo, la obtención de hidrógeno de manera limpia, así como su almacenamiento, son las principales limitantes para su comercialización. Los resultados del presente trabajo contribuyen a la investigación que pretende resolver o reducir este problema.

Referencias

- Cano Castillo, U. (1999). Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. *Boletín iee, Aplicaciones Tecnológicas*, 208-215.
- De Oliveira Alves, E. (2007). Propiedades físicas de semiconductor Bi_2Te_3 . *Departamento de física teórica y experimental*.
- H. , J. G. (2014). Bismuth Telluride and Its Alloys as Materials for Thermoelectric Generation . *Materials*, 2577-2592.
- Nieto Magdaleno , A. L., Olivares Robles , M. Á., & Chanona Pérez , J. J. (2015). Análisis de la conductividad térmica efectiva en un generador termoeléctrico segmentado usando Bi_2Te_3 y PbTe . *Pistas Educativas Año XXXVI* , 350-366.
- Rozo Q., S. M., & Tibaquirá G., J. E. (2007). Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Scientia et Technica Año XIII*, 279-283.
- S
heinbaum Pardo, C., & Solís Ávila, J. C. (2016). Consumo de energía y emisiones de CO_2 del autotransporte en México y escenarios de mitigación. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 32 (1), 7-23.
- Xiaodong, Z., K. T. , C., & C. C., C. (2008). Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicles*, V 6 N 2, 1119-1124.