

ÍNDICE DE ANEXOS

- **Anexo I:** Revisión de esta tecnología.
- **Anexo II:** Fundamentos teóricos y aplicaciones.
- **Anexo III:** Cálculos. (Código fuente EES)
- **Anexo IV:** Documentación técnica y otras imágenes aclaratorias.

ANEXO I

REVISIÓN DE ESTA TECNOLOGÍA

En este anexo se va a plasmar el estado del arte de esta tecnología. En una primera parte se revisarán artículos técnicos mostrando el grado de implicación de algunos fabricantes de automóviles y al estadio de desarrollo que han llegado.

Posteriormente, se revisarán artículos científicos de grupos de investigación que están también ahondando en este campo. Algunos de ellos han llevado a cabo modelos experimentales, otros tan sólo se han quedado en un desarrollo teórico.

ARTÍCULOS TÉCNICOS

BMW

El fabricante alemán BMW continúa apostando fuerte en el plan de ahorro de combustible en sus modelos. Además de las medidas ya conocidas como el Start/Stop o la recuperación del calor de las frenadas, BMW está investigando como aprovechar la energía desperdiciada que sale por el escape. Según BMW se podría ahorrar hasta un 5% del consumo total del vehículo con esta nueva tecnología. Cabe recordar que los sistemas actuales que ayudan a reducir el consumo de combustible consiguen ahorrar un 3%.

El primer paso que dieron los ingenieros fue integrar un generador termoeléctrico en el sistema de escape para generar corriente eléctrica. Según la casa bávara, un prototipo de este generador ha sido acoplado con éxito a un escape convencional produciendo 200 W de electricidad. Suficiente para ahorrar un 5% de combustible.

Pero el uso de materiales nuevos y mejoras en cuanto a peso y tamaño de los TEG condujo rápidamente a nuevos desarrollos, de manera que la última generación de TEG instalados en el escape son capaces de generar 600 W de potencia eléctrica, y no pasará mucho tiempo antes de alcanzar la meta de 1000 W conforme avanza la investigación. El prototipo actual, un BMW X6. [6]

Este tipo de generadores termoeléctricos se refrigeran mediante un circuito de agua diferente al circuito de refrigeración principal del motor. Se ayuda de un pequeño radiador ubicado en la parte delantera.

Aunque lo más interesante es el gran nivel de integración que tiene el Serie 5 berlina y su reducido peso, que ha pasado de los 15 kg de hace poco más de un año en 2010, a los 10 kg actuales. [7]

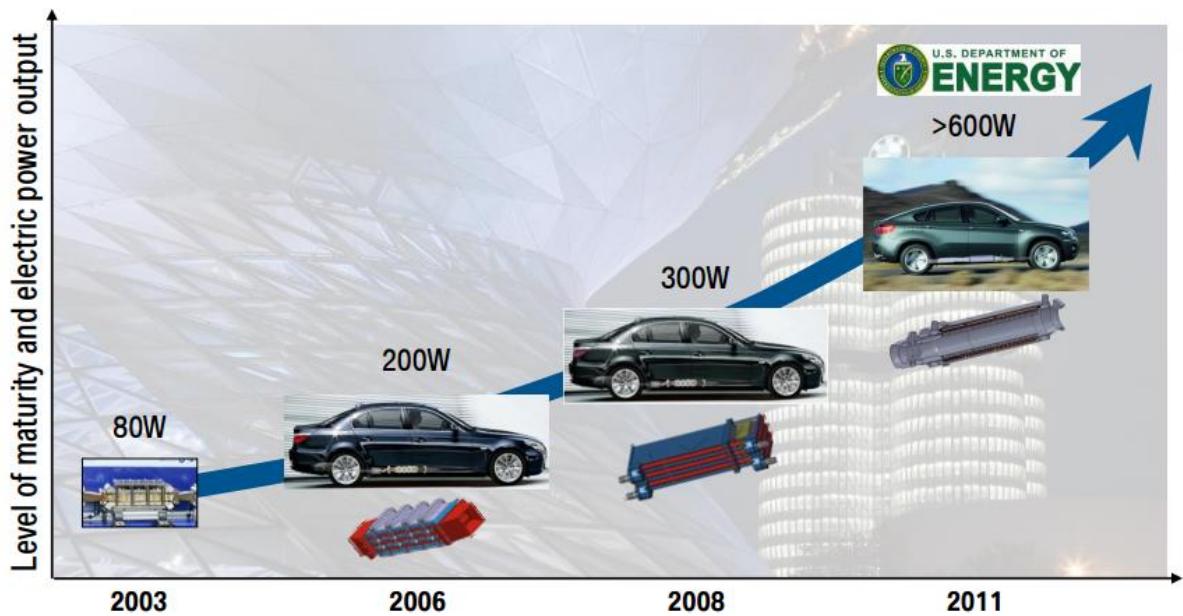


Figura 9.1.1 Estudio del progreso de la termogeneración en la marca BMW realizado por el Dr. Boris Mazar, en marzo de 2012. [8]

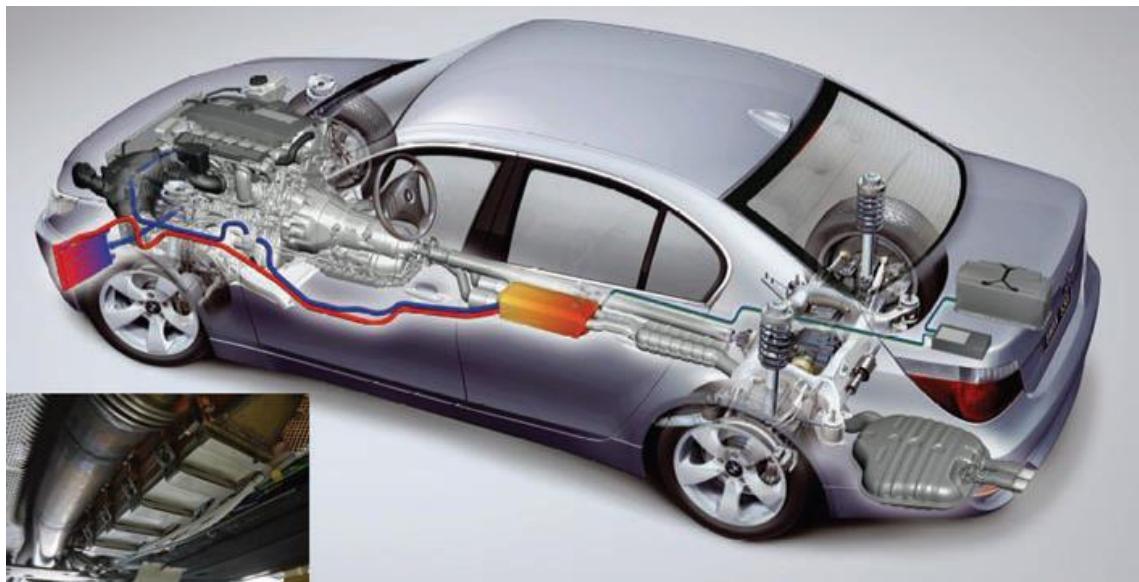


Figura 9.1.2. Primera generación del TEG en el año 2005. Implantación final en el BMW 530i, tipo carrocería E60. [14]

En la Figura 9.1.2 se puede observar que sale un cable desde el dispositivo central (TEG, en un tono rojo anaranjado), hacia la parte trasera a un acondicionador electrónico y de éste a cargar la batería. En cambio, por la parte delantera se observan dos conductos por los que circula el líquido refrigerante, uno marcado en color azul y el otro en rojo que se dirigen a la parte delantera del vehículo, concretamente a un pequeño radiador dispuesto para este propósito en la parte inferior izquierda.



Figura 9.1.1. En esta imagen se puede ver el dispositivo recuperador de calor envuelto por una carcasa metálica protectora. Dispone de baipás regulador. [7]

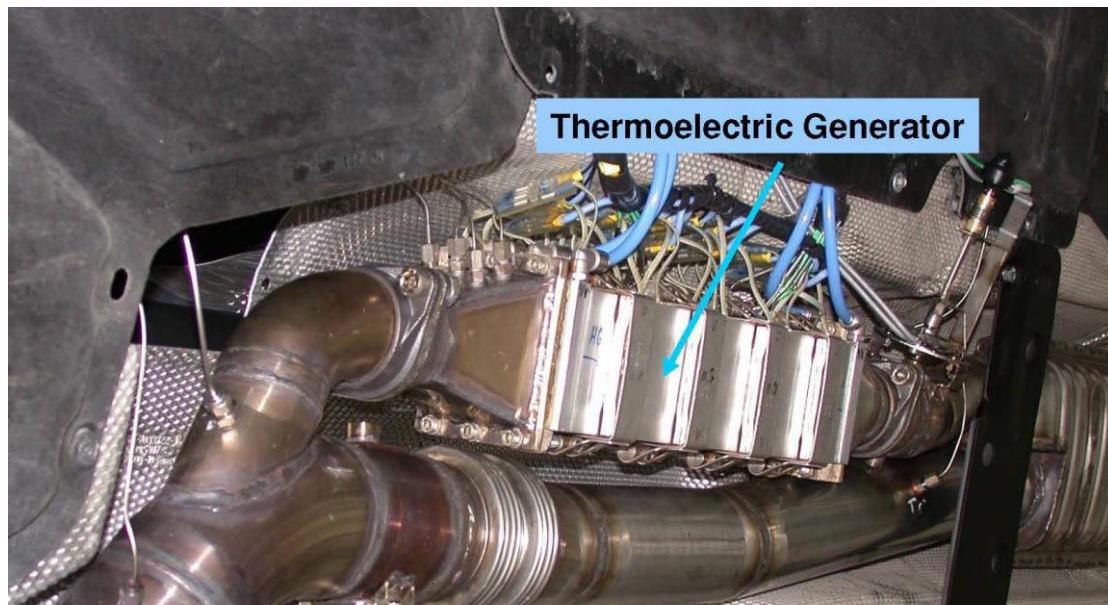


Figura 9.1.2. Otra imagen del mismo dispositivo vista desde otro ángulo del montaje final. [7]



Figura 9.1.3. En esta imagen podemos ver una pantalla instalada para observar en las pruebas el generador termoeléctrico y en la consola central la potencia que nos está generando a tiempo real.



Figura 9.1.4. Última generación de TEG probada en la serie 5 de la marca alemana, carrocería F10. A partir del año 2011. [7]

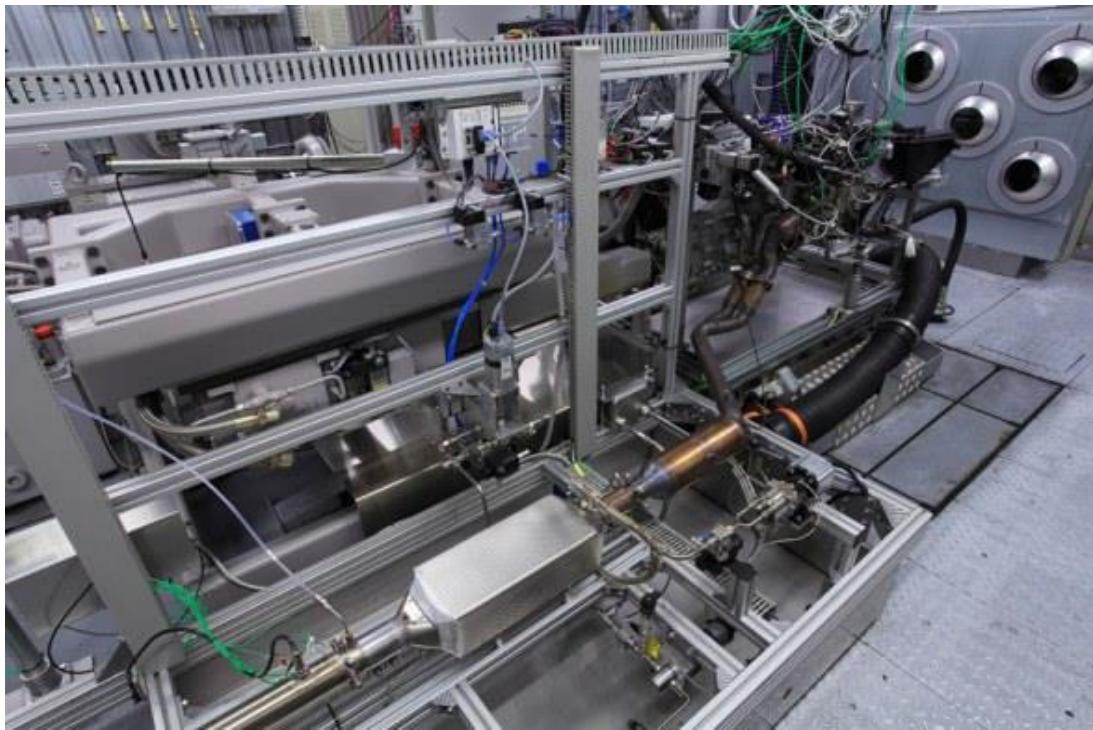


Figura 9.1.5. Banco de pruebas donde se ensaya el TEG del serie 5.

En la Figura 9.1.7 se puede ver cómo los dos tubos del colector de escape se juntan en uno, para después pasar por el sistema catalizador – filtro de partículas y posteriormente a un ortoedro donde se aloja el TEG. [7]

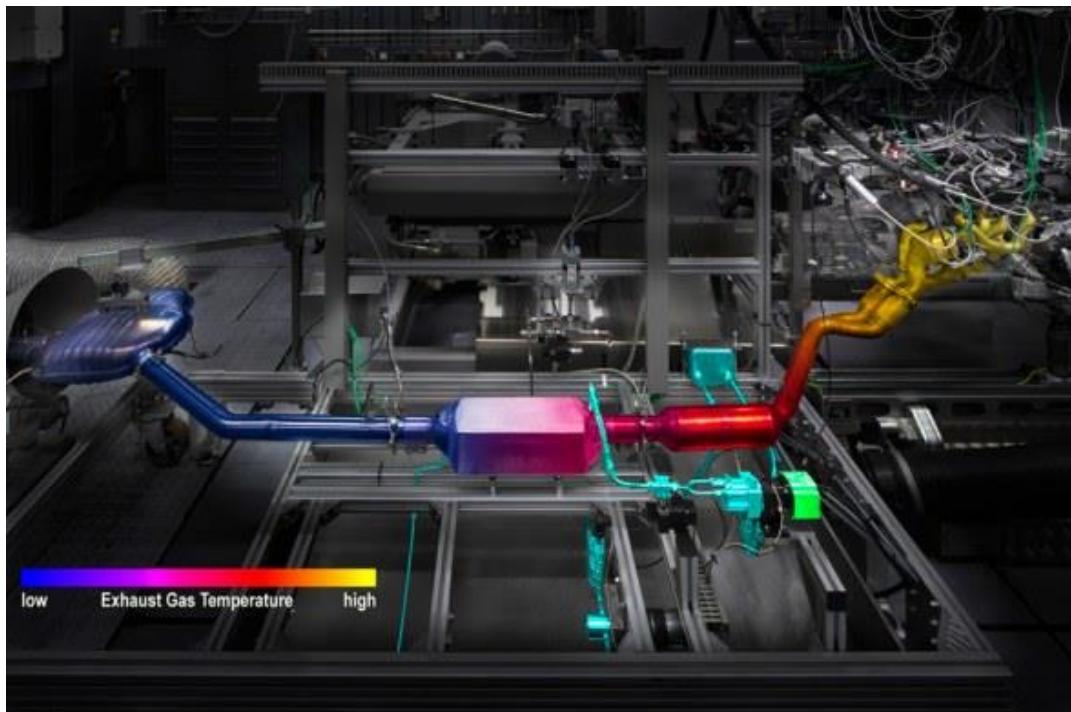


Figura 9.1.6. Simulación de un sistema de escape completo aislado del resto del automóvil con los distintos puntos de temperaturas marcados con diferentes colores. [7]



Figura 9.1.7. Vista de planta de un BMW serie 5. Implementación en el vehículo de pruebas. [7]



Figura 9.1.8. Implementación en BMW X6 con un termogenerador cilíndrico. [9]



Figura 9.1.9. Vista de planta del BMW X6 donde podemos observar el ya comentado generador termoeléctrico cilíndrico. [9]

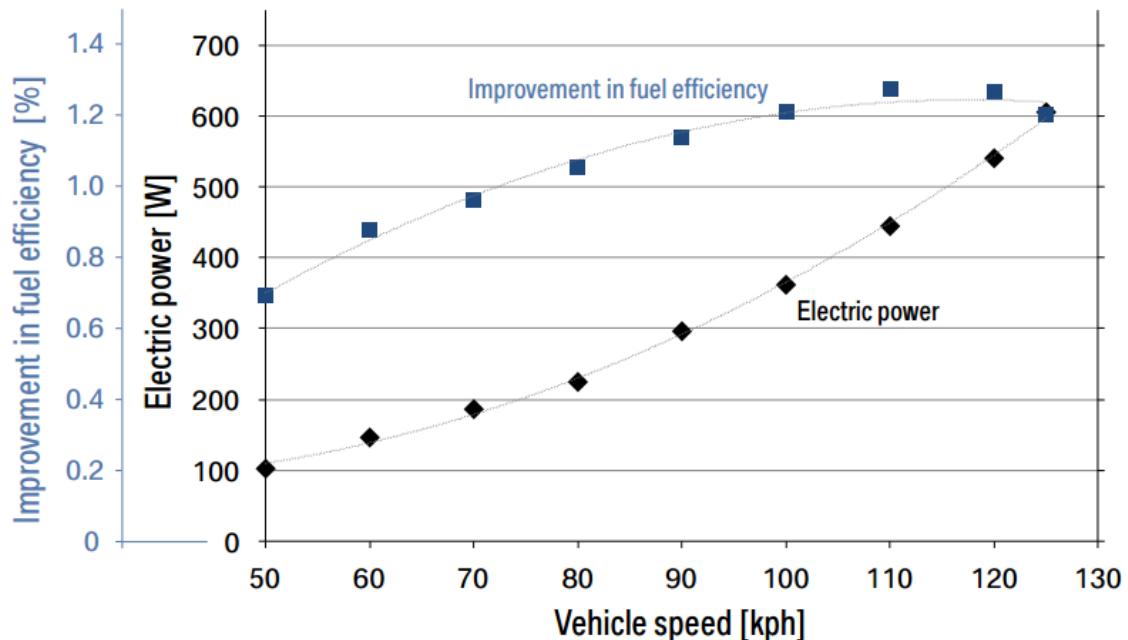


Figura 9.1.10. Gráfica de la electricidad generada frente a la velocidad que lleva el BMW X6 en ese momento.

En la Figura 9.1.12 se puede observar cómo va aumentando la producción de energía y el incremento de eficiencia del combustible conforme aumenta la velocidad. [8]

VOLKSWAGEN

La firma alemana Volkswagen ha presentado un prototipo del modelo Golf equipado con un generador termoeléctrico. Este prototipo había sido mostrado por primera vez en Berlín, en el mes de octubre de 2008, durante un acto dedicado a la termoelectricidad aplicada a la automoción.

En un principio, este dispositivo instalado es capaz de obtener casi 600W del motor de un coche que circule por una autopista, lo que permitiría alimentar hasta el 30% de las necesidades eléctricas del vehículo. Volkswagen afirma que su diseño actual podría ahorrar hasta un 5% del consumo de combustible.

Este avance tecnológico sería muy útil implantado correctamente en un vehículo híbrido ya que se podría usar este sistema de recuperación de energía para, además de suplir al vehículo de las necesidades eléctricas, cargar su propia batería de alta capacidad.



Figura 9.1.11. Generador Termoeléctrico implantado después del catalizador en el Golf, compacto de la marca alemana. [10]

GENERAL MOTORS

En GM, los investigadores están montando unos termogeneradores que incorporan nuevos materiales estudiados por la propia compañía, tales como *escuteruditas*, que son más baratos que los telururos, funcionan mejor a altas temperaturas y que mejoran la eficiencia de estos sistemas. Es un proyecto muy fuerte que ha recibido cuantiosas subvenciones por parte del gobierno estadounidense.

Este estudio incluye:

- Desarrollo del modelo y herramientas computacionales.
- Desarrollo de módulos termoeléctricos.
- Fabricación y montaje del prototipo de TEG.
- Hacer la modificación en el vehículo para implantarlo.
- Desarrollo de la electrónica para el acondicionamiento de la potencia.
- Desarrollo de un sistema de algoritmos de control.
- Rendimiento del TEG.

Los ingenieros de GM consiguen una mejora del 5% con un prototipo que rodea el tubo de escape de un Chevrolet Suburban, automóvil de grandes dimensiones que se puede ver en la Figura 9.1.17. Esperaban un ahorro de combustible del 5% para este modelo, el Chevrolet Suburban. La generación de 350 W en ciclo urbano y 600 W en ciclo abierto en autopista.

Esta tecnología se adapta bien a otras plataformas de vehículos como turismos e híbridos.

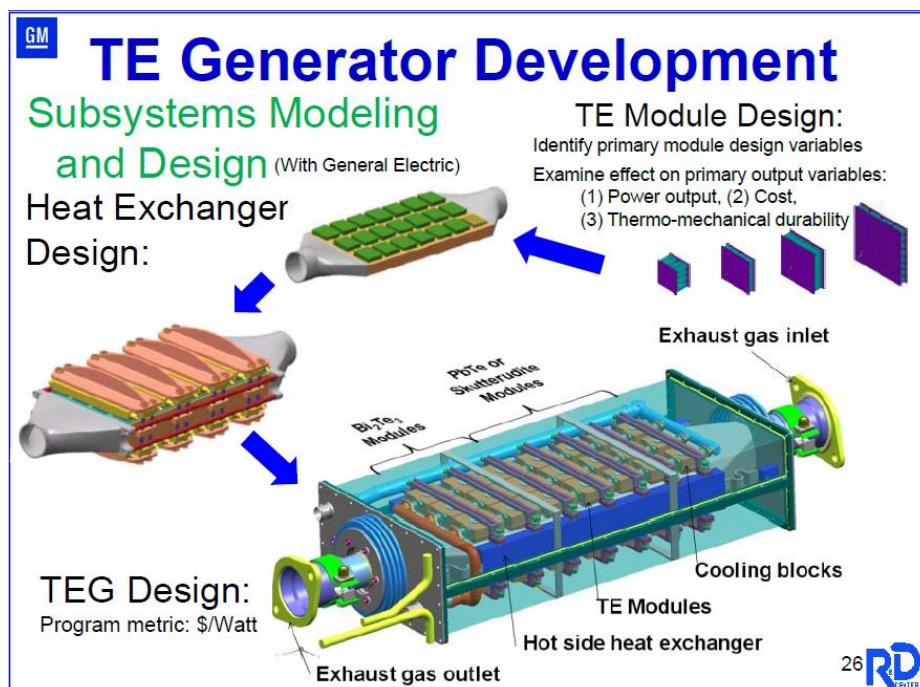


Figura 9.1.12. Fases de la construcción del TEG diseñado por GM. Cabe destacar como en el montaje final, se observan dos materiales distintos en función de la proximidad al foco caliente. [11]

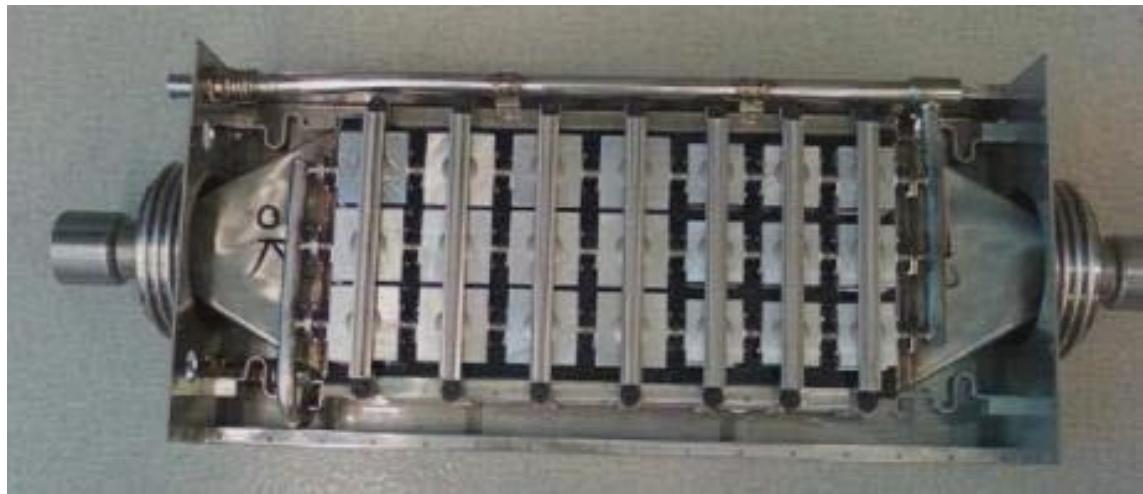


Figura 9.1.13. Modelo real llevado a cabo por GM. [11]



Figura 9.1.14. Otra vista del modelo anterior pero ahora con el sistema eléctrico instalado. [11]



Figura 9.1.15. Recreación del generador termoeléctrico insertado en el sistema de escape en el Chevrolet Suburban. En esta ocasión, el generador termoeléctrico también va refrigerado por agua en este caso al único radiador principal del vehículo. Año 2011. [12]



Figuras 9.1.18 y 9.1.19. Vistas inferiores del montaje final del TEG en el Chevrolet Suburban. Se puede ver que se sitúa en la parte posterior muy cerca de la transmisión cardan. Y que en el conjunto se insertan dos tubos negros, uno por cada lado que es por donde entra el fluido refrigerante. [11]

FORD

Esta empresa estadounidense también ha estado haciendo prototipos para adecuarlos a la producción en serie en alguno de sus modelos en el año 2011.

Particularmente, lo ha probado en un Ford Fusion americano que incorpora un propulsor de 3 litros de cilindrada en configuración V6.

Datos de partida:

- Bucle de refrigeración de baja temperatura separada.
- Diseño con baipás central.
- Potencia anticipada: 500 W (de pico).

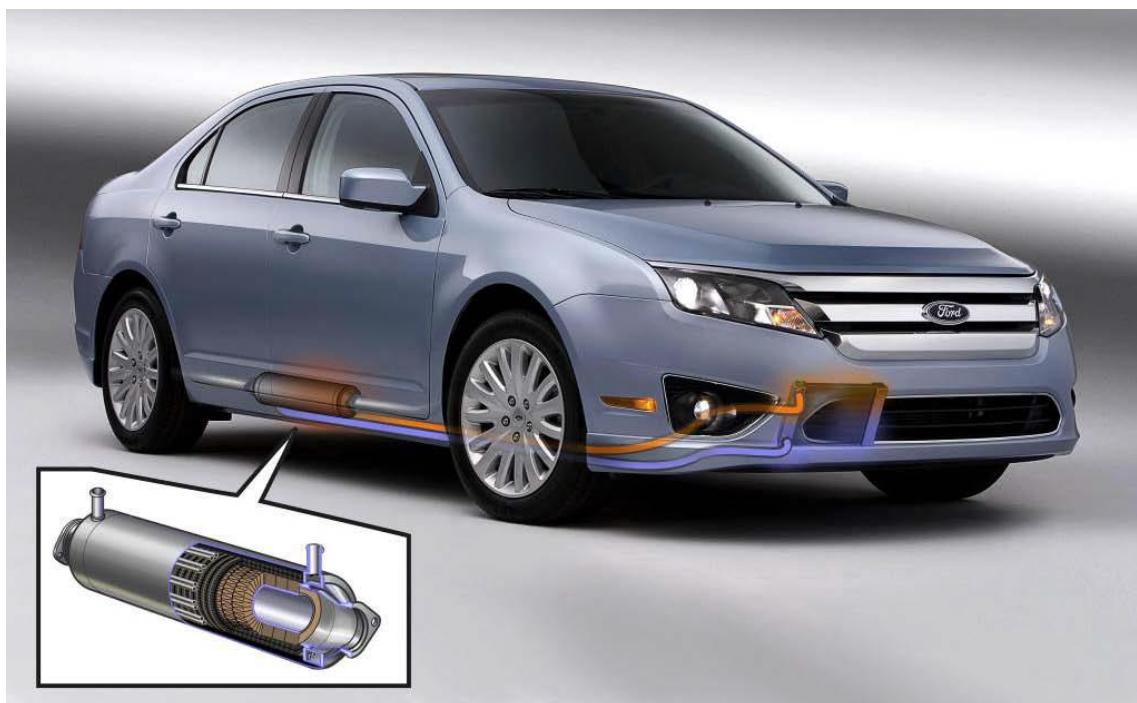


Figura 9.1.20. Esquema de la colocación del TEG en el modelo Fusion de la americana Ford.

Como se ve en la Figura 9.1.20, este modelo va equipado con un termogenerador cilíndrico que rodea diametralmente al tubo de escape. También cabe destacar los dos orificios superiores para la refrigeración del mismo. En la parte delantera se distingue un pequeño intercambiador de calor exclusivamente para el TEG. Año 2011. [13]

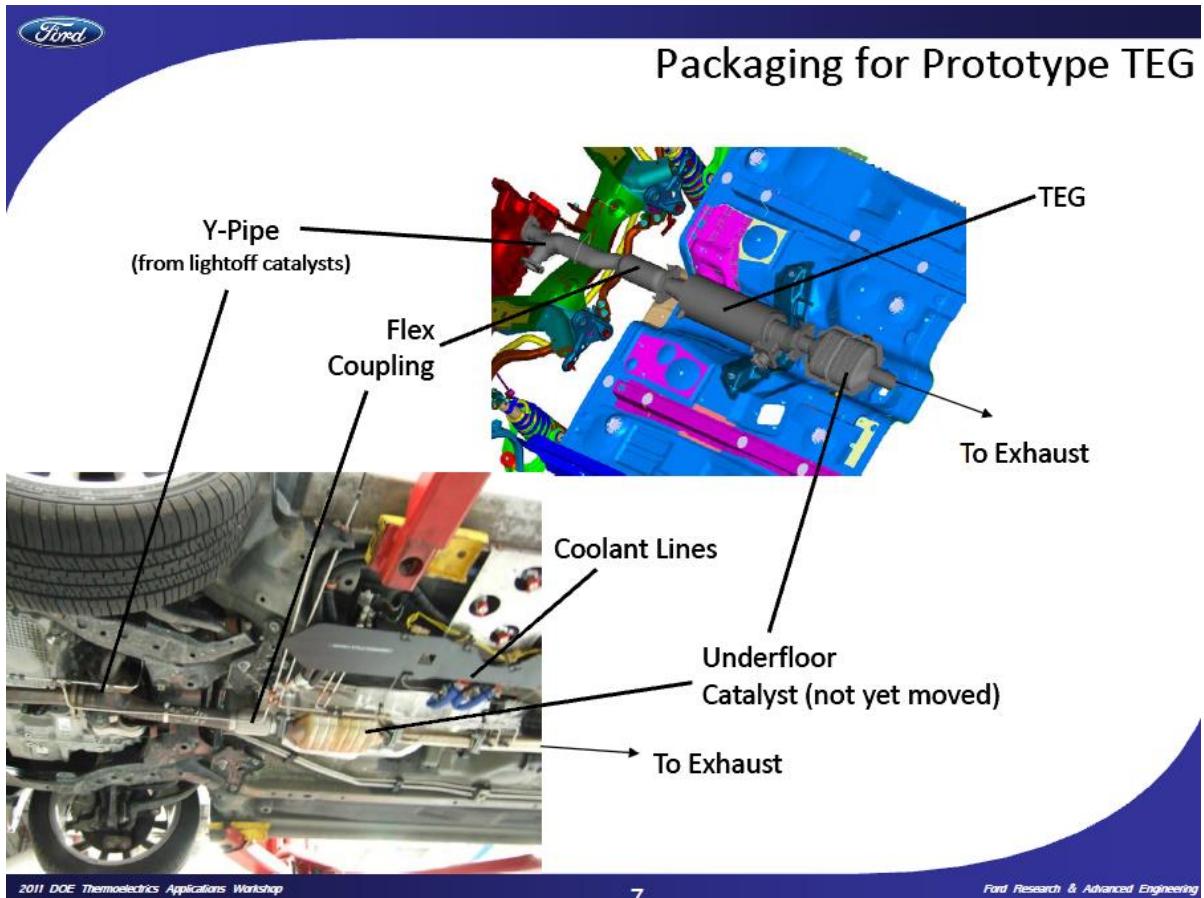


Figura 9.1.21. Esquema de montaje del TEG en el Ford Fusion. [13]

Un TEG debe ser capaz de proporcionar energía necesaria para el vehículo en condiciones extremadamente difíciles:

- Ciclo de conducción en ciudad (Start & Stop).
- Trabajar en el rango de +50°C y -30°C.
- Cargas accesorias completas, incluyendo picos de corriente.
- Reducir el consumo total de combustible, peso y costo en comparación con un sistema de alternador / batería.

OTROS VEHÍCULOS MÁS PESADOS

También se ha probado esta tecnología en vehículos industriales pesados, incluso para vehículos militares. De hecho, Caterpillar también lleva trabajando en termogeneración desde el año 2004-2005 para reducir el consumo de combustible en sus motores diésel.

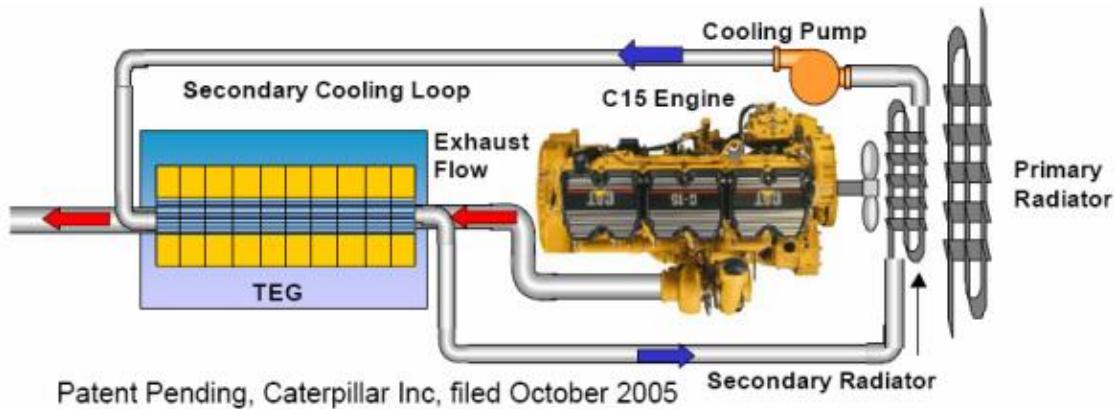


Figura 9.1.22. Esquema del generador termoeléctrico en un vehículo pesado de la marca Caterpillar. Proporcionan un lado frío del elemento termoeléctrico con el líquido que es parte de un sistema de enfriamiento secundario. [14]

A continuación, se muestran otros diseños en vehículos de gran tonelaje.

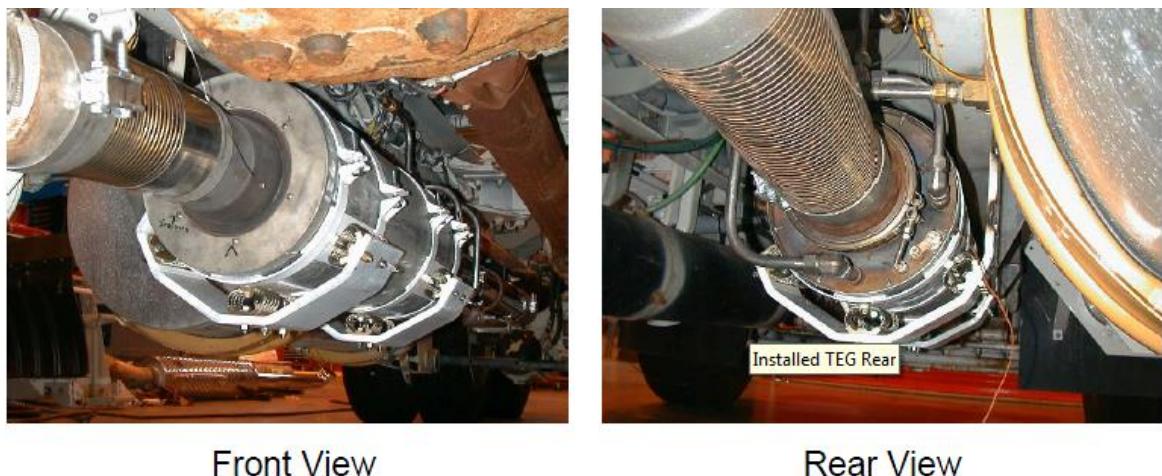


Figura 9.1.23. Situación del generador termoeléctrico en un vehículo de gran tonelaje. Su geometría en este caso es cilíndrica.

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

“Experimental investigation of the applicability of a thermoelectric generator to recover waste heat from a combustion chamber”. [15]

Un grupo de investigadores españoles del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pública de Navarra ha diseñado y construido un TEG para una chimenea fabricada en acero inoxidable dispuesta a continuación de una cámara de combustión que utiliza como combustible gas natural, como comburente oxígeno y como refrigerante agua líquida.

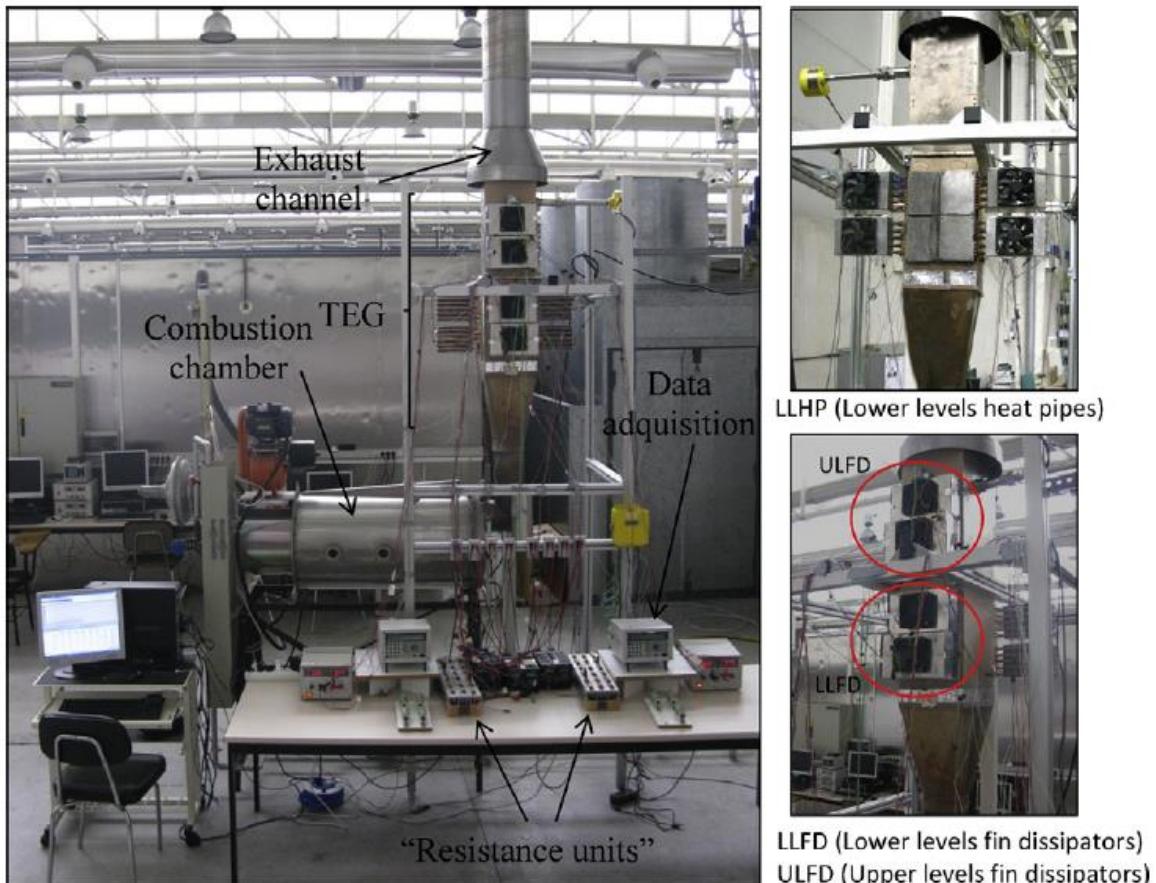


Figura 9.1.24. Montaje del sistema completo. [15]

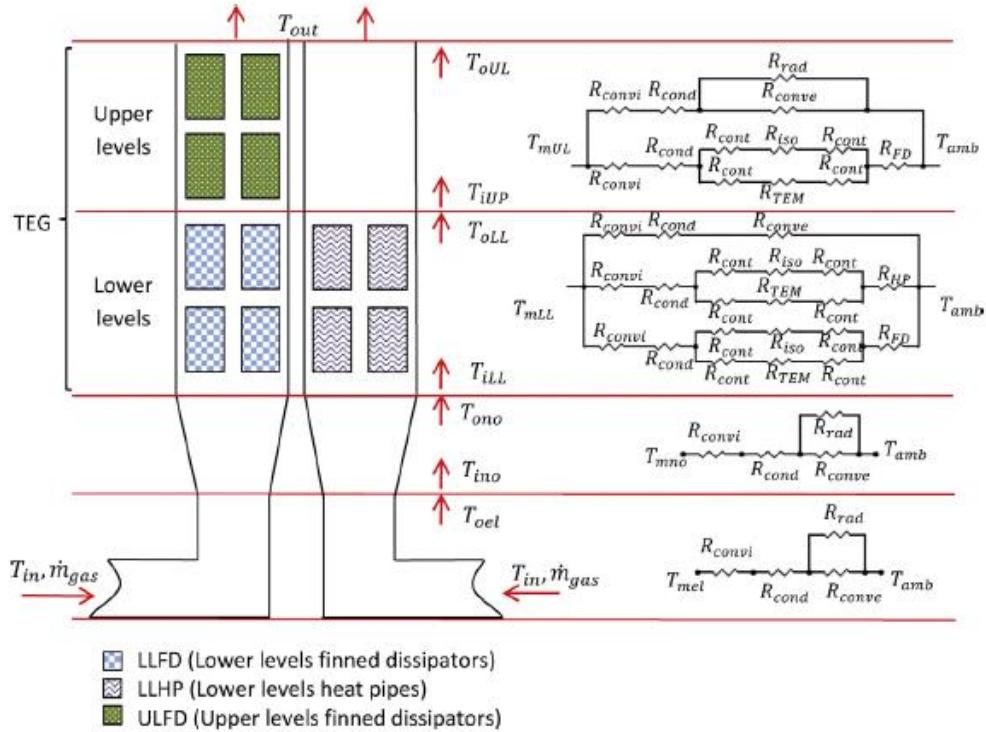


Figura 9.1.25. Disposición de los módulos termoeléctricos alrededor de las paredes de la chimenea. [15]

La temperatura máxima de salida de los gases de escape es de 800 °C y la máxima que soportan los módulos es de 250 °C.

La chimenea está dividida en cuatro zonas: el codo, el difusor, el nivel inferior de módulos y el nivel superior. Como se puede observar en la Figura 9.1.25, dichos módulos no están a continuación del colector de escape, sino que están a continuación del codo y del difusor por lo que les da tiempo a enfriarse hasta que llegan a la zona de módulos.

La superficie total cubierta por módulos es de 0.25 m² repartidos en 48 dispositivos.

La potencia neta generada ha sido muy baja, de **21.56 W**. Uno de los posibles problemas que presenta este modelo es que el 41.2 % del calor se pierde en superficies que no están provistas de módulos.

Es un estudio en el que el diseño debe ser profundamente mejorado. Algunas de las posibles soluciones sería considerar unos módulos fabricados en materiales que resistan mayores temperaturas y con mejores rendimientos para así poder acercarlos al colector de escape. El hecho de cubrir una mayor superficie de la chimenea aumentando el número de módulos, también contribuirá a reportarnos una potencia neta final mayor.

“Theoretical limits of thermoelectric power generation from exhaust gases”. [16]

Cuatro investigadores del “Rochester Institute of Technology” han diseñado sobre el papel un modelo que predice que existe un numero óptimo de módulos termoeléctricos que maximizan la potencia extraída para cualquier sistema y que añadiendo más módulos termoeléctricos pueden llegar incluso a reducir el rendimiento. El límite teórico de potencia máxima que puede ser extraído de un sistema termoeléctrico en contacto con un flujo caliente de gases se determina con un método variacional.

Se ha visto que en la mayoría de los casos, la optimización de la eficiencia termoeléctrica local conduce a predicciones cercanas al límite teórico. En cambio surgen desviaciones en situaciones de transferencia de calor en fluidos.

Para los casos en los que una parte importante de la energía térmica se utiliza para generar energía, los módulos conectados en serie (corriente constante) obtienen mayores eficiencias que los conectados en paralelo (voltaje constante). También se extrae que la figura de mérito por sí sola no es suficiente para predecir la eficiencia del sistema.

Debido a su baja carga computacional, el modelo de límite teórico podría ser incluido en el diseño de un sistema termoeléctrico, sin embargo, su aplicación requeriría el uso de un esquema de control relativamente sofisticado.

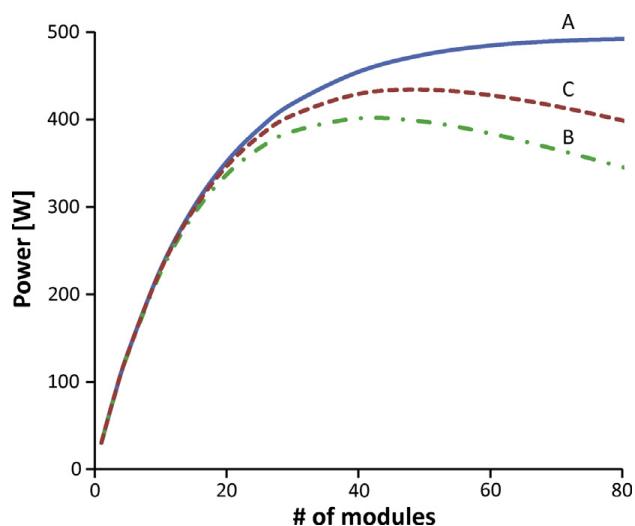


Figura 9.1.26. Potencia frente a número de módulos. [16]

Potencia en función del número de módulos para sistemas de voltaje constante y módulos de corriente constante.

- A: límite teórico y aproximación a la optimización de la eficacia local.
- B: aproximación con voltaje constante.
- C: aproximación con corriente constante.

Se puede concluir que la potencia obtenida a partir de un sistema de hasta 30 módulos, que trabaje con corriente constante, es aproximadamente la de la máxima teórica.

“An experimental study of a novel prototype for two-stage thermoelectric generator from vehicle exhaust”. [17]

Un grupo formado por cuatro investigadores chinos de la Universidad de Dalian, han modelado y posteriormente llevado a la práctica un nuevo prototipo de TEG de dos etapas. Este generador tiene unas dimensiones considerables ya que está pensado para trabajar en un camión. Sus cotas principales son 335 mm. de longitud y 100 mm. de diámetro del tubo de escape. La estructura principal es de aluminio en la que se apoyan 96 módulos de teluro de bismuto. Entre caras, utiliza aceite para almacenar calor y minimizar el impacto de la variación de la temperatura de escape.

Las temperaturas a la salida del catalizador y entrada del TEG oscilan entre 180 °C y 400 °C en función de la posición del acelerador.

Han conseguido generar una potencia de **250 W**. con una temperatura en el lado caliente de 200 °C. La eficiencia térmica llega al 5.35% y se ha mejorado en un 32% en comparación al 4.04% que tenía con una sola etapa. El ahorro de combustible es de 0.061 litros cada hora y el tiempo de amortización es de 4,55 años.

El empleo de módulos más eficientes y usar una configuración para los módulos en serie, podrían incrementar la eficiencia.

ANEXO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y APLICACIONES

INTRODUCCIÓN A LA TERMOELECTRICIDAD.

La termoelectricidad es la ciencia que estudia los fenómenos que se producen en un material cuando intervienen el calor y la electricidad.

Analiza los efectos relativos a la generación de corriente en materiales (generalmente metales o semiconductores) cuando los sometemos a una fuente de calor o el efecto contrario, la generación de calor en la unión de materiales cuando los atraviesa una corriente eléctrica.

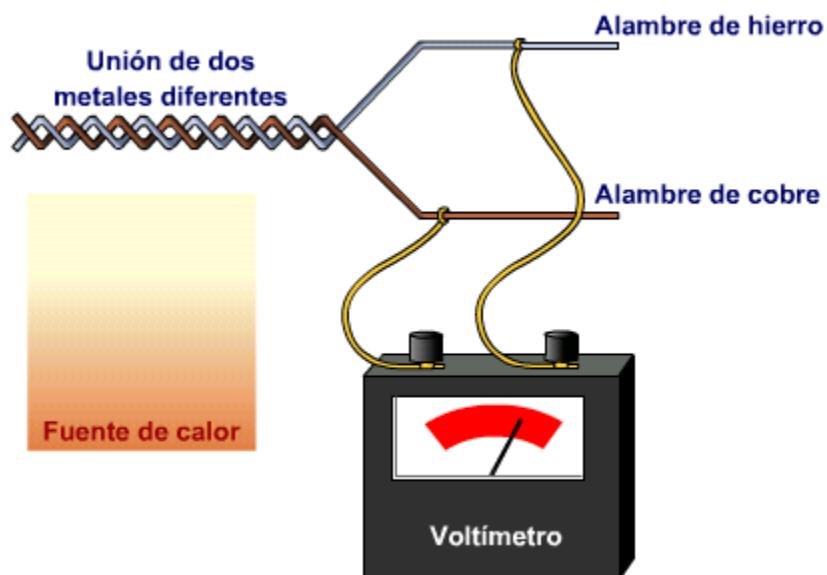


Figura 9.2.1. Esquema simple del efecto termoeléctrico.

En los últimos años la termoelectricidad ha avanzado enormemente, cada día hay mayor interés en esta rama de la física, los estudios son numerosos, especialmente en aplicaciones en las cuales es necesario un control preciso de la temperatura. El hecho de poder refrigerar o calentar una zona concreta y de reducido tamaño permite abrir una gran puerta a la termoelectricidad. Tanto es así, que es de esperar que a medio plazo, y teniendo en cuenta que la velocidad a la que avanza la tecnología de materiales, particularmente en el campo de los semiconductores, la posibilidad de climatizar viviendas mediante la termoelectricidad sea viable. [18]

Con vistas a la perfecta comprensión de funcionamiento del dispositivo es conveniente conocer los fundamentos teóricos de todos los fenómenos termoeléctricos existentes.

EFFECTO SEEBECK.

Biografía.



Figura 9.2.2. Thomas J. Seebeck.

Thomas Johann Seebeck (Tallin, Estonia, 1770 – Berlín 1831). Fue criado en el seno de una rica familia de comerciantes adinerados. Su padre era descendiente de alemanes con raíces en Suecia y tal vez debido a esto animó a Thomas para estudiar medicina en Alemania, que lo hizo en las universidades de Berlín y Gotinga. Recibió el título de medicina en 1802, pero como él prefirió la investigación en física para la práctica de la medicina, orientó su carrera a la investigación. Por esto se le conce más como físico. Después de graduarse, se incorporó a la facultad de la Universidad de Jena, donde conoció y se convirtió en un buen amigo de Johann von Goethe. Inspirado por el movimiento romántico en Alemania y la teoría newtoniana, Seebeck se dedicó entonces a la investigación del espectro solar. En 1808, obtuvo la primera combinación química del amoníaco con óxido de mercurio. Hacia 1812 estudió la polarización óptica en vidrio, pero sus descubrimientos en este área fueron antes, sin saberlo él, hallados por los científicos Brewster y Biot.

Seebeck regresó a la Universidad de Berlín en torno a 1818 donde trabajó independientemente en la magnetización del hierro y del acero. En numerosos de estos experimentos, observó la reacción anómala de magnetizado de hierro al rojo vivo, que finalmente resultó en el fenómeno que hoy se conoce como histéresis.

Seebeck hizo investigaciones de fotoluminiscencia (la emisión luminiscente de ciertos materiales excitados por la luz), los efectos químicos de diferentes partes del espectro solar, la polarización, y el carácter magnético de corrientes eléctricas. [19]

Fundamento Físico del efecto Seebeck.

Para producir este fenómeno es necesario partir de dos alambres de metales distintos y unidos por medio de soldadura. Si el conductor se calienta en un extremo los electrones de la unión caliente incrementaran su energía respecto a los que se encuentran en el otro extremo (unión fría), creando una situación de desequilibrio. Los electrones de la unión caliente fluirán hasta la parte fría donde su energía disminuirá. De esta forma, la transmisión de calor a través del metal esta acompañada por una acumulación de cargas negativas en la unión fría, a partir de la cual se crea una diferencia de potencial entre ambos extremos del conductor.

Esta diferencia de potencial se mantiene hasta que se alcance un estado de equilibrio termodinámico entre los electrones que se encuentran desplazándose por el interior del material, es decir, la diferencia de potencial se mantendrá mientras se mantenga el desequilibrio. [20]

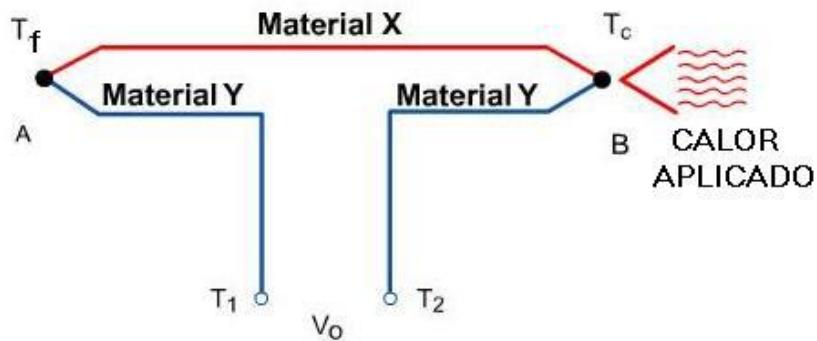


Figura 9.2.3. Circuito de termopares. Efecto Seebeck.

Coeficiente Seebeck.

El coeficiente de Seebeck entre dos materiales distintos, A y B, consiste en el cociente entre la diferencia de potencial eléctrico (ΔV_{AB}) entre la unión de A y de B y la diferencia de temperatura ΔT .

Normalmente se toma “ α ” para designar el coeficiente de Seebeck, aunque es habitual emplear la letra S.

Por convenio el coeficiente de Seebeck se considera positivo cuando la corriente circula en el sentido de las agujas del reloj y negativo cuando circula en sentido contrario.

$$\alpha = \frac{\Delta V_{AB}}{\Delta T}$$

Siendo:

ΔV_{AB} : diferencia de potencial.

ΔT : diferencia de temperaturas entre la caliente y la fría de los materiales.

El coeficiente de Seebeck también se denomina Poder Termoeléctrico y se mide en V/K o también en μ V/K.

Los coeficientes de Seebeck de cada material por separado se relacionan con el coeficiente del conjunto en función de cómo estén conectados eléctrica y térmicamente entre sí los elementos.

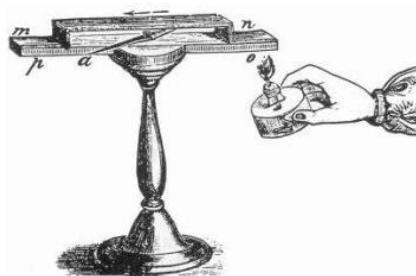


Figura 9.2.4. Instrumento experimental de Seebeck.

EFFECTO PELTIER.

Biografía.



Jean Charles Athanase Peltier (Ham, Francia, 1785 – París, 1845).

Físico francés que ejerció la profesión de relojero pero abandonó su oficio cuando tenía treinta años para dedicarse plenamente a la investigación científica en el campo de la electricidad.

En 1834 descubrió que cuando circula una corriente eléctrica por un conductor formado por dos metales distintos unidos por una soldadura esta se calienta o se enfriá, según el sentido de la corriente. Dicho efecto tiene una gran importancia en el desarrollo de mecanismos de refrigeración no contaminantes.

Figura 9.2.5. Jean C. Peltier.

Fundamento Físico del efecto Peltier.

El efecto Peltier, que es el opuesto al anteriormente descrito, hace referencia a la generación de un gradiente de temperatura debida a un voltaje eléctrico. Sucede cuando una corriente se hace pasar a lo largo de un conductor no homogéneo, o cruza la unión entre dos metales o semiconductores distintos que están conectados entre sí en dos soldaduras. La corriente favorece una transferencia de calor de una soldadura a la otra: una se enfriá mientras que la otra se calienta. Este efecto es reversible, ya que la unión se enfriará o se calentará según el sentido de la corriente aplicada.

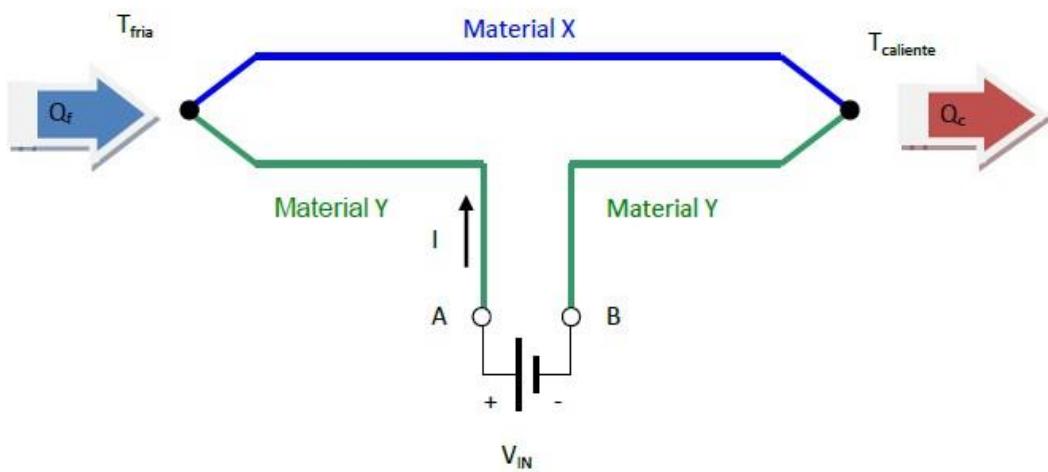


Figura 9.2.6. Circuito de termopares. Efecto Peltier.

Si se aplica un voltaje en los terminales A y B, V_{IN} , circulará una corriente "I" a través del circuito. Esta corriente eléctrica provoca que la unión correspondiente al terminal A absorba calor, y que por tanto pierda temperatura. La unión correspondiente al terminal B cede calor, y como consecuencia esta unión aumenta su temperatura.

Si cambia el sentido de la corriente que circula por el circuito, también cambiará el sentido de circulación del calor: la unión correspondiente al terminal B absorberá calor. [18]

Coeficiente Peltier.

La relación entre la corriente y el calor, denominan el coeficiente de Peltier, que se expresa con la siguiente ecuación:

$$\Pi = \frac{Q}{I}$$

Siendo:

Π , coeficiente de Peltier.

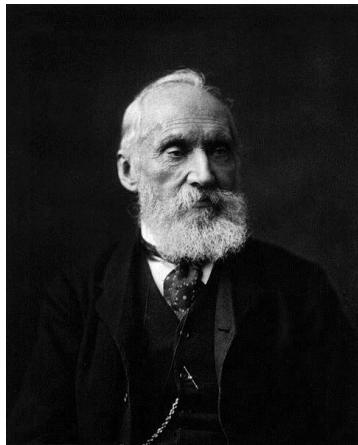
I, intensidad de la corriente que recorre el circuito.

Q, calor absorbido o cedido.

El coeficiente de Peltier se mide en W/A o en su equivalente, en V.

EFFECTO THOMSON.

Biografía.



William Thomson (Belfast, Irlanda del Norte, 1824 – Largs, Escocia, 1907) primer barón Kelvin. Fue un físico y matemático británico. Kelvin se destacó por sus importantes trabajos en el campo de la termodinámica y la electrónica gracias a sus profundos conocimientos de análisis matemático. Es uno de los científicos que más hizo por llevar a la física a su forma moderna. Es especialmente famoso por haber desarrollado la escala de temperatura Kelvin. Recibió el título de barón Kelvin en honor a los logros alcanzados a lo largo de su carrera.

Figura 9.2.7. William Thomson.

Fundamento Físico del efecto Thomson.

El efecto Thomson es un fenómeno termoeléctrico donde se ponen en común el efecto Seebeck junto con el Peltier. Así pues, un material al cual se le somete a un gradiente de temperatura y recorrido por una corriente eléctrica intercambia calor con el medio exterior. [18]

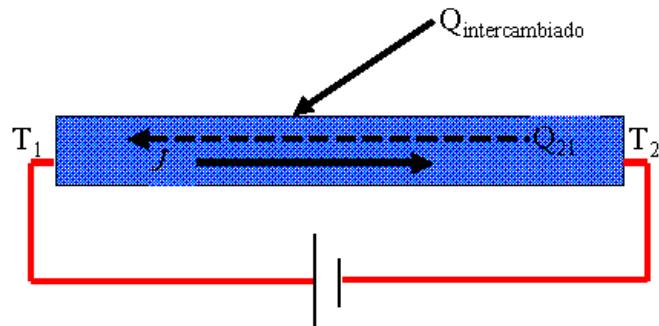


Figura 9.2.8. Esquema del efecto Thomson.

Coeficiente Thomson.

Si la diferencia de temperaturas es pequeña, la ecuación que describe el efecto Thomson es la siguiente:

$$Q = \tau \cdot I \cdot \Delta T$$

Siendo:

Q , calor que se genera.

I , intensidad de la corriente que circula por el material termoeléctrico.

ΔT , diferencia de temperaturas en el material termoeléctrico.

τ , Coeficiente de Thomson.

Los tres coeficientes (Seebeck, Peltier y Thomson) están relacionados entre sí a través de las relaciones de Kelvin:

$$\Pi = \alpha \cdot T$$

$$\tau = T \cdot \frac{d\alpha}{dT}$$

EFFECTO JOULE.

Biografía.



Figura 9.2.9. James P. Joule.

James Prescott Joule (Salford, Reino Unido, 1818 – Manchester, Reino Unido, 1889) fue un físico británico. Uno de los más notables físicos de su época, es conocido sobre todo por su investigación en electricidad y termodinámica. En el transcurso de sus investigaciones sobre el calor desprendido en un circuito eléctrico, en 1852 formuló la ley actualmente conocida como ley de Joule que establece que la cantidad de calor producida en un conductor por el paso de una corriente eléctrica cada segundo, es proporcional a la resistencia del conductor y al cuadrado de la intensidad de corriente.

Utilizando muchos métodos independientes, Joule determinó la relación numérica entre la energía térmica y la mecánica, o el equivalente mecánico del calor. La unidad de energía denominada julio se llama así en su honor, equivale a 1 vatio · segundo. [21]

Fundamento Físico del efecto Joule.

Este efecto consiste en la emisión de calor a lo largo de un conductor por el que circula una corriente eléctrica. Este calor se debe a la energía generada en los choques de los electrones con los átomos del conductor.

El calor generado en un material por efecto Joule es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente que lo recorre y a la resistencia del conductor, como se observa en la siguiente ecuación:

$$Q_J = I^2 \cdot R$$

Siendo:

Q_J : potencia calorífica generada debida al efecto Joule.

I: corriente que atraviesa al material.

R: resistencia eléctrica del material.

De este efecto térmico subyace una consecuencia a tener en cuenta en este estudio ya que provoca una reducción de la refrigeración disponible total. Al contrario que en los anteriores efectos, el efecto Joule no es un efecto reversible.

EFFECTO DE LA CONDUCCIÓN INTERNA O DE FOURIER.

Este efecto físico no se debe considerar como un efecto termodinámico, pero es un efecto que aparece en los dispositivos termoeléctricos y que actúa en contra de la refrigeración.

El efecto de la conducción interna consiste en la conducción del calor debido al choque con los átomos vecinos y el intercambio de los electrones del átomo. Esta conducción se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$W = \frac{K \cdot A \cdot (T_1 - T_2)}{S}$$

Siendo:

W: Es el calor emitido por unidad de tiempo.

K: Es el coeficiente de inducción del material.

A: Área de sección perpendicular al paso del calor

T1-T2: Es la diferencia de temperaturas.

S: Distancia entre la cara fría y la cara caliente del dispositivo termoeléctrico.

FIGURA DE MÉRITO.

En ingeniería las figuras del mérito se definen para determinar, en materiales o dispositivos, su utilidad relativa para un uso. Para caracterizar la eficiencia de los materiales termoeléctricos se determina la figura de mérito, representada por Z. Es dependiente de la temperatura y su valor es directamente proporcional a la eficacia del material termoeléctrico. Un convertidor termoeléctrico es una máquina térmica y como tal obedece a las leyes de la termodinámica. Si se considera que el convertidor termoeléctrico funciona como un generador ideal, es decir, sin pérdidas de calor, la eficiencia se define como el cociente entre la energía eléctrica obtenida y el calor absorbido por el dispositivo termoeléctrico. [22]

Matemáticamente, la figura de mérito para dispositivos termoeléctricos se define como:

$$Z = \frac{\sigma \cdot S^2}{K} \quad K = K_{latt} + K_{el}$$

Siendo:

K_{latt} = conductividad de la red cristalina.

K_{el} = conductividad térmica de los portadores.

Donde σ es la conductividad eléctrica, K es la conductividad térmica y S es el coeficiente de Seebeck o termopotencia (por convenio en $\mu\text{V}/\text{K}$). Es más común expresarla como la figura de mérito adimensional, ZT , multiplicándola con la temperatura promedio $((T_1+T_2)/2)$.

Mayores valores de ZT indican mayor eficiencia termodinámica. ZT es por lo tanto una figura muy conveniente para comparar la eficiencia del potencial de dispositivos usando materiales diferentes. Valores de $ZT = 1$ se consideran buenos, y valores de al menos en el rango de 3-4 se consideran esenciales para que la termoeléctricidad compita con la generación mecánica y refrigeración en eficiencia.

Hasta ahora, los mejores valores ZT reportados están en el rango de 2-3. Mucha de la investigación en materiales termoeléctricos se enfoca en aumentar el coeficiente Seebeck y reducir la conductividad térmica, especialmente manipulando la nanoestructura de los materiales. No hay que olvidar que para aumentar la eficiencia de este tipo de materiales se necesita una elevada conductividad eléctrica y una reducida conductividad térmica.

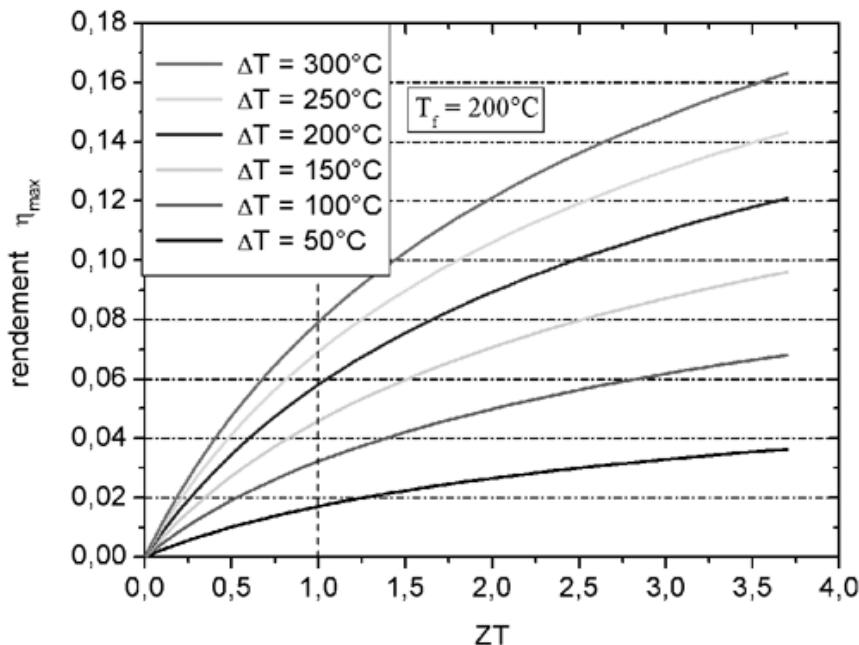


Figura 9.2.10. Evolución del rendimiento de conversión de un sistema termoeléctrico en condiciones ideales en función de la figura de mérito, ZT .

Si analizamos el ejemplo de la Figura 9.2.10, para el valor de $ZT = 1$ y la diferencia de temperatura es de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, el rendimiento de conversión será del 8%, lo que quiere decir que según el caso considerado (generación de electricidad o refrigeración) el 8% del flujo de calor que atraviesa el material será convertido en electricidad, o si el caso considerado es el de refrigeración, que el calor extraído por el elemento refrigerador corresponderá al 8% de la potencia eléctrica empleada.

MEJORA DE LA FIGURA DE MÉRITO.

Aunque se auguran muy buenas expectativas para los dispositivos termoeléctricos, la baja eficiencia que presentan hasta ahora, no ha permitido su total introducción en muchos mercados potenciales.

De acuerdo con la definición de la ZT , los materiales usados para la construcción de un dispositivo termoeléctrico, deberían tener altos coeficientes Seebeck y conductividades eléctricas, y bajos valores de conductividad térmica. Así, normalmente la maximización de la ZT , está basada en el incremento del factor de potencia mediante la optimización de la concentración de portadores, y en la disminución de K_{latt} a través del bloqueo de fonones. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 9.2.11, la mejora de ZT se dificulta a causa de la interconexión de los parámetros que ésta relaciona. Por ejemplo, S y σ están acoplados mediante la concentración de portadores (n). Un incremento en n hace que disminuya S , pero

σ aumenta con n . También están relacionados directamente σ y K_{el} , por lo que un incremento de σ provoca el aumento de K_{el} . [23]

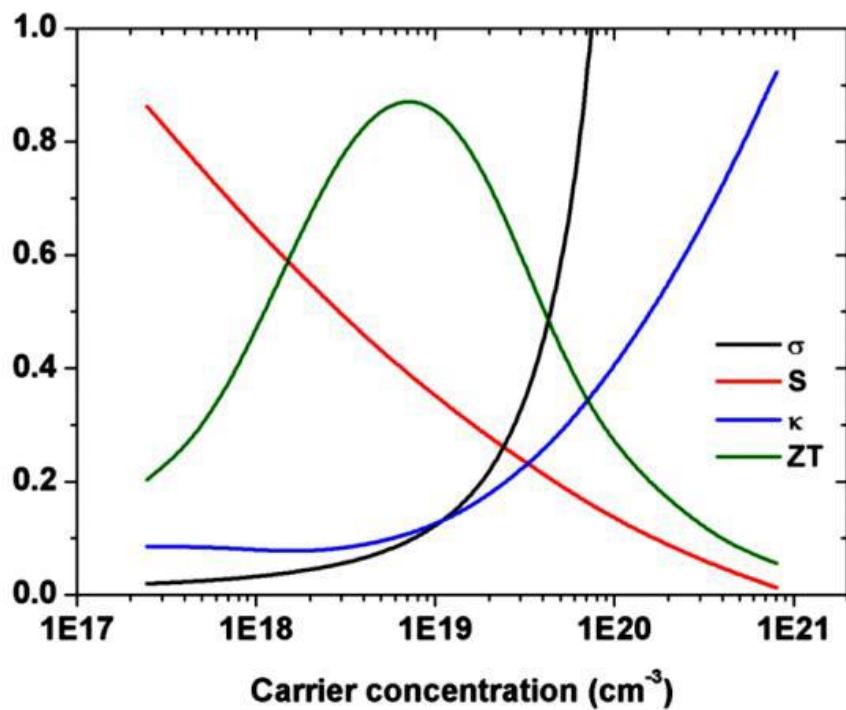


Figura 9.2.11. Variación de ZT en función de los tres parámetros.

El obstáculo a superar en la investigación de materiales termoeléctricos es desacoplar estas tres propiedades relacionadas entre sí. Hay multitud de estudios basados en la reducción de la conductividad térmica y otros basados en el incremento del factor de potencia pero los mejores materiales que optimizan ZT de acuerdo a las condiciones descritas anteriormente, son los semiconductores altamente dopados. Aún así, los materiales actuales incluyen también semimetales, semiconductores y sistemas cerámicos con una variedad de formas cristalinas, cristales simples, policristalinos y materiales nanocompuestos. [24]

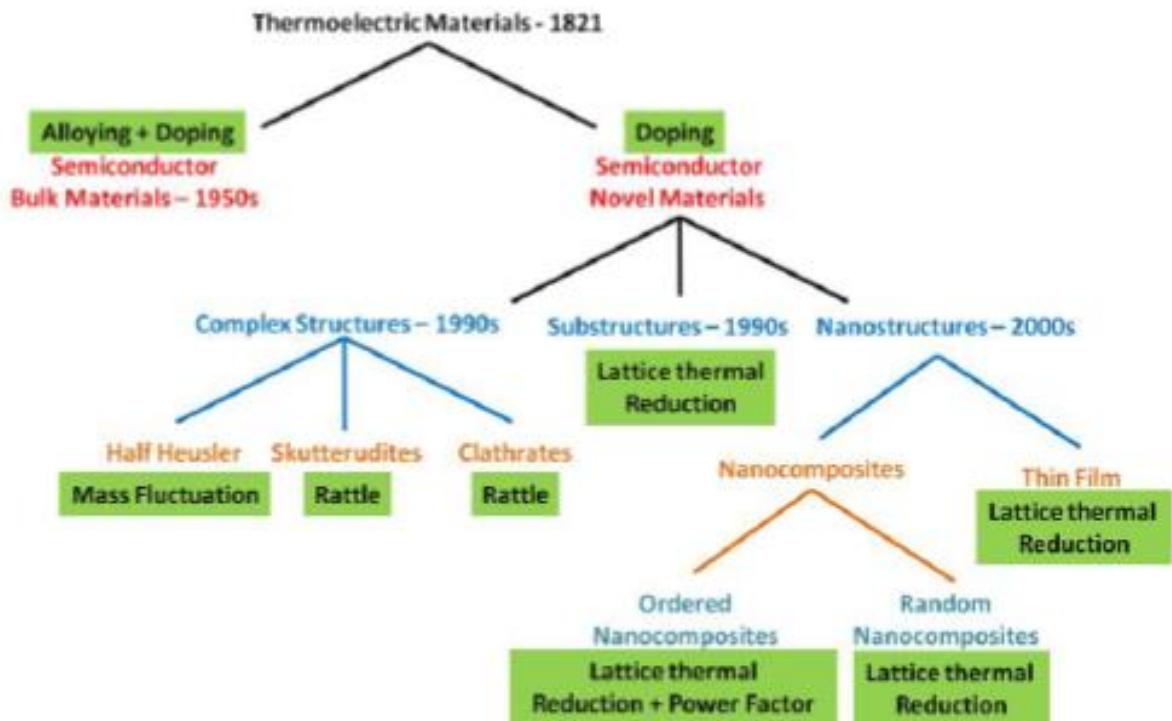


Figura 9.2.12. Esfuerzos en la mejora de ZT a lo largo de la historia.

FACTOR DE POTENCIA.

El factor de potencia se designa por las letras PF (Power Factor) y tiene especial interés, ya que cuanto mayor sea el factor de potencia mayor eficiencia se obtendrá en las propiedades termoeléctricas y mayor será la potencia útil en aplicaciones de generación de electricidad mediante el efecto termoeléctrico.

$$PF = S^2 \cdot \sigma$$

El factor de potencia se mide en $\frac{W}{K^2 \cdot m}$ y generalmente se considera que un material tiene aplicaciones termoeléctricas a partir de $1 \frac{W}{K^2 \cdot m}$ de factor de potencia. [26]

RENDIMIENTO EN UN TEG.

La eficiencia (η) para un TEG está definida como la relación entre la potencia eléctrica obtenida y la potencia térmica suministrada desde el foco caliente. [28]

$$\eta = \frac{P}{Q} = \frac{J \int_{T_f}^{T_c} \alpha(T) dT - J^2 \int_0^L \rho x dx}{J T_c \alpha_c + K_c \nabla T_c}$$

Siendo:

ρ : la resistividad eléctrica.

el flujo $J > 0$ cuando va de T_c a T_f

para $x = 0$ $T = T_f$

para $x = L$ $T = T_c$ de donde $\nabla T > 0$

Y α, K y ∇T depende de la temperatura.

- i. La potencia eléctrica sería la proveniente de la tensión Sebeecck menos la disipada por resistencia óhmica interna del TEG.
- ii. La potencia térmica es la suma del término correspondiente al efecto Peltier más el término del calor transportado por conducción en el sólido (transporte de Fourier).
- iii. Los términos de Joule y Thomson como fuentes de calor no afectan al cálculo si como en la ecuación anterior se mide el flujo de calor a la salida del foco caliente (T_c) y estos terminos vienen implícitos en $K_c, \nabla T_c$.

EFICIENCIA REDUCIDA.

Sabemos que el máximo rendimiento que se puede obtener de una cantidad de calor ΔQ que transite del foco caliente a una temperatura T_c , al foco frío a temperatura T_f , viene dado por la eficiencia de Carnot:

$$\eta_c = \frac{T_c - T_f}{T_c} = \frac{\Delta T_{TE}}{T_c}$$

La eficiencia de un TEG se puede separar en dos términos:

$$\eta = \eta_c \eta_r$$

donde η_r es la eficiencia reducida y es la relativa a la de Carnot.

Snyder obtuvo de la ecuación del rendimiento en un TEG para la eficiencia reducida, en el límite cuando $\frac{\Delta T}{T}$ es muy pequeño y $\nabla T > 0$, la siguiente expresión:

$$\eta_{\max} = \frac{\frac{u\alpha}{Z} \left(1 - \frac{u\alpha}{Z}\right)}{\frac{u\alpha}{\alpha} + \frac{1}{ZT}}$$

donde u es la densidad de corriente relativa, definida como la relación entre la densidad de corriente eléctrica y la densidad de flujo de calor ($u = \frac{J}{K_{TE} \cdot \nabla T}$). [28]

MODELO DE COEFICIENTES CONSTANTES.

En el caso del modelo de propiedades constantes (CPM), el coeficiente de Seebeck, la conductividad eléctrica y térmica y por lo tanto Z , no dependen de la temperatura y de este modo la máxima eficiencia de un elemento TE finito, puede ser calculado analíticamente. Nos da para el rendimiento total máximo:

$$\eta_{\max} = \eta_c \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_f}{T_c}}$$

donde T es el valor medio $\frac{(T_c + T_f)}{2}$

de esta ecuación se concluye que para calcular el rendimiento máximo es más importante el término ZT que la figura de mérito Z (figura de mérito del material).

COMPATIBILIDAD EN MÓDULOS SEGMENTADOS.

La variación de la eficiencia reducida con la variable u es la misma que la variación de la eficiencia total con la intensidad eléctrica. [29]

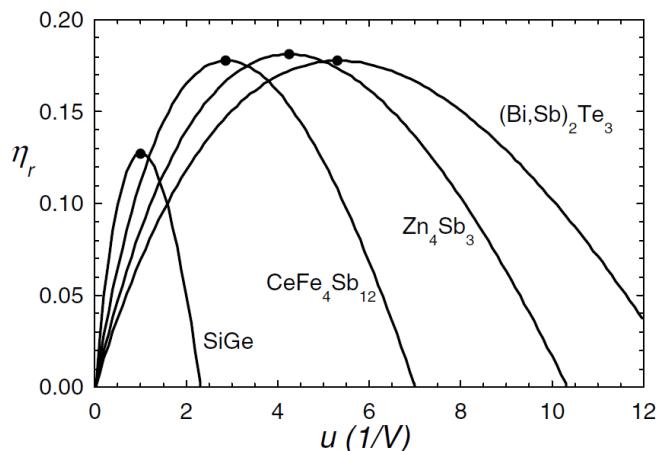


Figura 9.2.13. Variación de la eficacia reducida.

Variación de la eficiencia reducida respecto a la densidad de corriente reducida a temperatura constante.

- $(Bi, Sb)_2Te_3$: 100 °C.
- Zn_4Sb_3 : 300 °C.
- $CeFe_4Sb_{12}$: 550 °C.
- $SiGe$: 800 °C.

La eficiencia máxima ($u = s$) se indica por un punto.

La eficiencia reducida se incrementa desde $0(u = I = P = 0)$ hasta un valor máximo ($u = s$) y desde aquí vuelve a decrecer hasta anularse para $u = \frac{Z}{\alpha}$

Dentro de una rama TE, la variación de u es pequeña. Cuando $I = 0$ la conducción del calor es exactamente uniforme. Cuando $I = 0$ la conducción del calor es solo ligeramente modificada por el cambio en el gradiente térmico debido al efecto de Joule y de Thomson. En TEG's operando a máxima eficiencia, normalmente u varía menos del 20% a lo largo de la totalidad de su volumen.

Un TEG segmentado consta de varios segmentos cada uno de distinto material TE, dispuestos en serie tanto eléctrica como térmicamente. Si el valor óptimo de u en un segmento es muy distinto al de otro, no existe una corriente que pueda operar eficazmente a la vez en ambos segmentos. Este es el principio básico para la compatibilidad TE. [29]

El valor de u que da lugar al máximo de eficiencia reducida se llama factor de compatibilidad TE "s" y vale:

$$s = \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\alpha T}$$

Según esta ecuación, s es como Z , una propiedad del material dependiente de la temperatura a causa de la dependencia con la temperatura de α, K_{TE}, ρ . De este modo, s es independiente de la geometría del dispositivo y de la corriente eléctrica y térmica que lo atraviesa. Si u es muy distinto de s , la eficiencia del TE difiere mucho de la óptima.

Una vez que u es ajustado en un punto del TEG segmentado, en el resto del TEG u no seguirá en general las variaciones de s .

Dos materiales pertenecientes a un TEG segmentado, tendrán la máxima eficiencia combinada cuanto más iguales sean sus factores de compatibilidad, s . Si los factores de compatibilidad difieren en un factor de 2 o más, la máxima eficiencia se resiente al segmentar.

En los TEG's en cascada los elementos TE se encuentran térmicamente en serie y eléctricamente son independientes unos de otros y así de esta forma se pueden ajustar las corrientes eléctricas y por lo tanto la u , en cada uno de ellos para que trabajen todos a máximo rendimiento. Sin embargo la forma de implementarlos a nivel eléctrico es complejo.

Puesto que la s de un material depende de la temperatura, la diferencia térmica de un extremo a otro empeora las características del dispositivo dando lugar a un problema de autocompatibilidad que es independiente de que el TEG sea segmentado o no. [29]

FORMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Una vez mostrados todos los efectos termoeléctricos, es necesario entender cuáles son los distintos métodos de transmisión de calor que existen, ya que estos van a influir en las distintas formas de aprovechamiento que pueden tener los generadores termoeléctricos dependiendo de cuáles sean sus condiciones de contorno.

La transferencia de calor es la transmisión de energía que se provoca sólo como consecuencia de una diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno y se da únicamente en la dirección de descenso de la temperatura.

La velocidad de transferencia de calor neta se representa por \dot{Q} . En principio la cantidad de energía interna transferida por calor durante un período de tiempo puede calcularse integrando desde el instante t_1 al instante t_2 . Y viene expresada por la siguiente ecuación:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt$$

Además, la velocidad de la transferencia del calor depende normalmente de un parámetro llamado conductividad térmica, el cual está presente en todos los materiales. [25]

Existen tres formas de transferencia de calor:

- Transferencia de calor por convección.
- Transferencia de calor por conducción.
- Transferencia de calor por radiación.

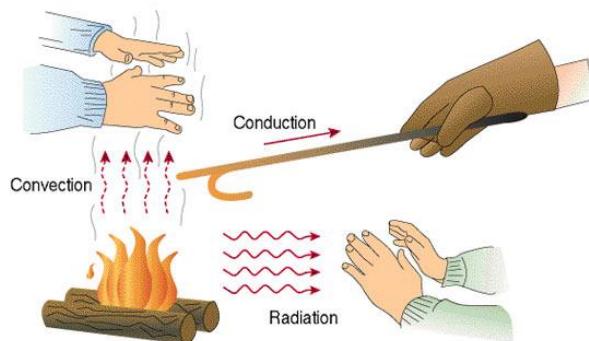
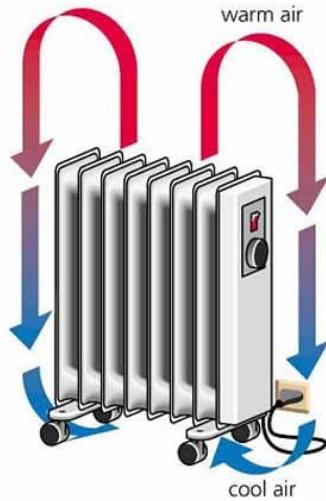


Figura 9.2.14. Diferentes formas de transferencia de calor.

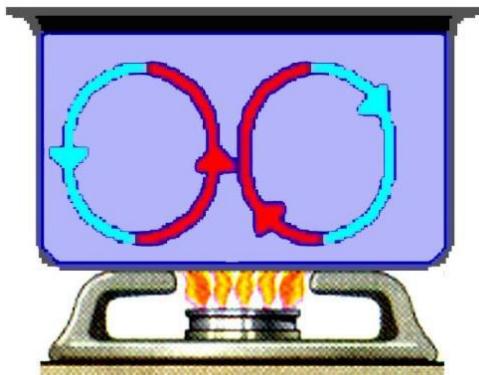
TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN



Es un proceso de transferencia de energía entre una superficie sólida a una temperatura T_s y un gas (o líquido) adyacente en movimiento y con otra temperatura T_f . [25]

La convección por encima de una superficie caliente sucede porque cuando se calienta el aire en contacto con esta superficie se expande, pierde densidad y se eleva. Del mismo modo, el agua caliente es menos densa que la fría por lo que sube, originando corrientes de convección que transportan energía.

Figura 9.2.15. Ilustración convección gas.



La convección también puede provocar la circulación de un líquido, como sucede al calentar una olla de agua.

El agua caliente se expande y hace más ligera, mientras que la más fría está más cerca de la superficie y es más densa y desciende. Con ambos movimientos se forma un patrón de circulación aunque no es tan ideal como el que sugiere el esquema de la Figura 9.2.16.

Figura 9.2.16. Ilustración convección líquido.

Matemáticamente, este efecto se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{inf})$$

Siendo:

h : Coeficiente de convección.

A_s : Área del cuerpo en contacto con el fluido.

T_s : Temperatura en la superficie del cuerpo.

T_{inf} : Temperatura del fluido lejos del cuerpo.

\dot{Q} : Calor transferido respecto al tiempo. [25]

TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

La conducción se produce generalmente en sólidos, ya que para que esto suceda es necesario que estén en contacto constante los átomos del material, y la manera donde más cercanos están los átomos de un material es en su estado sólido. En líquidos y gases, debido a que los átomos se encuentran muy separados, en comparación con los sólidos, la conducción se vuelve prácticamente nula.

Los materiales que mejor conducen el calor son los metales por la red cristalina que tienen y el elevado número de electrones libres. Por contra, están los materiales aislantes que impiden la transferencia de calor por conducción. Los plásticos y la fibra de vidrio podrían ser unos ejemplos a ser nombrados como aislantes térmicos.

Esta capacidad para conducir el calor en un material está parametrizada mediante el "parámetro de conductividad térmica λ ".

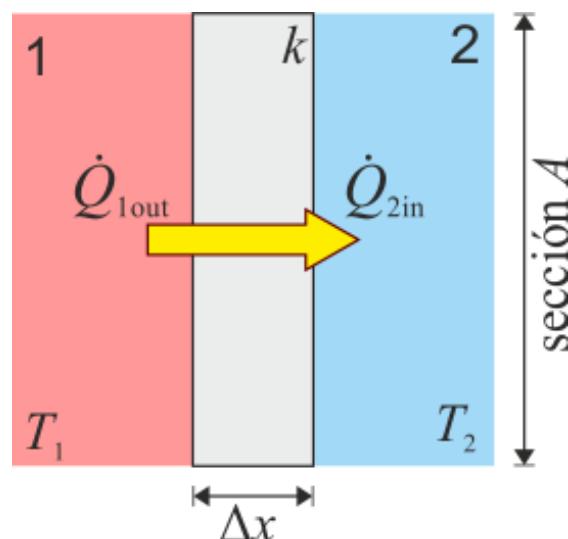


Figura 9.2.17. Esquema ilustrativo del fenómeno de conducción.

De la Figura 9.2.17, se puede sacar la relación entre la conducción del calor y el parámetro de conductividad térmica respecto a la superficie de contacto:

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \rightarrow \lambda = -A^{-1} \dot{Q} \frac{\partial T}{\partial x}$$

Siendo:

λ : Parámetro de conductividad térmica expresada en $\frac{W}{m \cdot K}$

\dot{Q} : Cantidad de energía calorífica por unidad de tiempo.

$\frac{\partial T}{\partial x}$: Gradiente térmico.

A : Área.

Esta ecuación es más conocida como ley de Fourier y de ella se obtiene la velocidad de transferencia de calor por conducción. [25]

Debido a que la conductividad térmica es un parámetro que varía a medida que varía la temperatura se realizan las mediciones del parámetro λ a una temperatura de 300K.

TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

La radiación térmica es emitida por la materia como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas en su interior. La energía se transporta mediante ondas electromagnéticas o fotones. A diferencia de la conducción, la radiación térmica no requiere soporte para propagarse y puede tener lugar incluso en el vacío. Las superficies sólidas, los gases y los líquidos emite, absorben y transmiten radiación térmica en grados distintos.

La velocidad a la que la energía es emitida, \dot{Q}_e , desde un sistema con área superficial A, se calcula macroscópicamente mediante una forma modificada de la ley de Stefan – Boltzmann que muestra que la radiación térmica es función de la cuarta potencia de la temperatura absoluta en la superficie, T_s . [25]

$$\dot{Q}_e = \varepsilon \sigma A T_s^4$$

Siendo ε la emisividad y σ la constante de Stefan – Boltzmann.

Debido a que el cálculo de todas las radiaciones incidentes que el generador puede recibir es imposible de calcular y controlar, se desestimarán el efecto de estas, ya que a su vez, las placas termoeléctricas son incapaces de aprovechar el calor por radiación directamente.

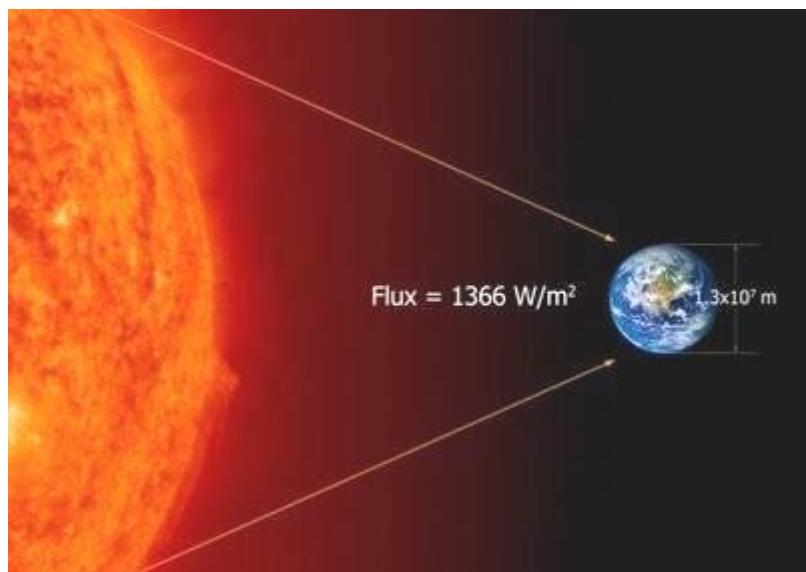


Figura 9.2.18. Esquema ilustrativo del fenómeno de radiación entre el Sol y La Tierra.

APLICACIONES DE LA TERMOELECTRICIDAD.

Por un lado, cuando un material sometido a un gradiente de temperatura es atravesado por una corriente eléctrica se genera un flujo de calor, opuesto a la difusión térmica, esto permite pensar en aplicaciones de refrigeración termoeléctrica.

Esta solución alternativa a la refrigeración clásica, que utiliza ciclos de compresión expansión no necesita de partes móviles, lo que incrementa su fiabilidad y elimina los ruidos y vibraciones.

Estas propiedades son fundamentales en aplicaciones en las que la temperatura debe ser regulada de forma muy precisa y fiable, como por ejemplo en los contenedores empleados en el transporte de órganos para trasplantes o en aquellas en las que las vibraciones son un inconveniente grave, como por ejemplo: los sistemas de guía que emplean laser, o los circuitos integrados. Además, la posibilidad de crear un flujo térmico a partir de una corriente eléctrica de manera directa hace inútil el empleo de gases como el freón, que resultan perjudiciales para la capa de ozono.

Por otra parte, la posibilidad de convertir un flujo de calor en corriente eléctrica permite aplicaciones de generación eléctrica mediante efecto termoeléctrico, sobre todo a partir de fuentes de calor residual como los tubos de escape de los automóviles, las chimeneas de los incineradores, los circuitos de refrigeración de las centrales nucleares. El uso de esta tecnología supondría en estos casos una mejora en el rendimiento energético del sistema completo de manera limpia. El calor residual es aprovechado para obtener un mayor aprovechamiento de la energía. [26]

Como se ha comentado anteriormente, un sistema de generación termoeléctrica tiene muchas propiedades deseables tales como:

- Pequeño peso y tamaño.
- Capacidad de enfriar y calentar en el mismo modulo.
- Control preciso de la temperatura ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$).
- Alta fiabilidad (no hay partes móviles).
- No generan vibraciones ni ruido.
- Opera en cualquier orientación (no le afecta la gravedad).
- Largos periodos de funcionamiento de operación sin supervisión durante miles de horas.

Estas características únicas han permitido la introducción de estos dispositivos en muchas aplicaciones reales. A continuación se muestran algunas de ellas.

Aplicaciones espaciales.

Los sistemas energéticos de radioisótopos generan electricidad mediante la conversión del calor liberado de la desintegración nuclear de isótopos radiactivos en electricidad, a través de uno de muchos procesos de conversión que incluyen convertidores termoeléctricos (TE). El proceso físico fundamental que interviene en la conversión TE es el efecto Seebeck. Las ventajas clave de los generadores termoeléctricos de radioisótopos, RTG por sus siglas en inglés (Radioisotope Thermoelectric Generators), son su larga vida, robustez, tamaño compacto y su alta fiabilidad. Los RTG son capaces de operar continuamente, independientemente del aislamiento solar, y son relativamente insensibles a la radiación y a otros efectos ambientales. No producen ruido, vibración, o torsión durante su operación. Estas propiedades han hecho que los RTG sean adecuados idealmente para misiones autónomas en ambientes extremos del espacio o en superficies planetarias. [27]

Refrigeración TE de componentes electroópticos.

Los mini refrigeradores termoeléctricos (TEC) encuentran un amplio rango de aplicación en el control térmico de diodos semiconductores y láseres, amplificadores de potencia, detectores IR, y otros instrumentos electroópticos que son usados en una variedad de aplicaciones de ciencia y tecnología. El rendimiento de estos dispositivos incrementa en gran medida cuando se combina con TECs, que proporcionan una refrigeración rápida y segura a un coste relativamente bajo.

Refrigeración/calefacción. Módulos Peltier.

Las células convencionales refrigerantes (calefactoras si se invierte la polaridad), llamadas placas Peltier son las más utilizadas debido a que su conste en el mercado es cada vez menor, ya que sus aplicaciones se van incrementando día a día.

Para la fabricación de estos módulos se necesitan materiales diferentes. Los semiconductores más utilizados para su fabricación son los teluros de bismuto y los seleniuros de antimonio.

El modo de conexión de estos módulos se observa en la Figura 9.2.19. La conexión eléctrica es en serie, es decir, hay que intercalar los elementos de manera que resulten n-p-n-p-n-p sucesivamente.

Se dice que un semiconductor es de tipo p cuando el coeficiente de Seebeck es positivo, por el contrario, será de tipo n cuando el coeficiente de Seebeck sea negativo. La conexión térmica se realiza en paralelo, esto quiere decir que todas las uniones donde la corriente va del elemento p al n, estén en contacto térmico con la misma cara del módulo donde se liberara calor, y todas las uniones donde la corriente va del elemento n al p, estén en contacto térmico con la otra cara, que absorberá calor.

Cuando una corriente eléctrica continua circula a través del módulo, un flujo de calor se desplaza desde la una cara del dispositivo hasta la otra cara. La cara que está a menor temperatura se utiliza como refrigerador. Si se invierte el sentido de la corriente aplicada el módulo Peltier funcionara como calentador.

Los elementos semiconductores se colocan entre dos placas cerámicas, de elevada conductividad térmica pero baja conductividad eléctrica. Todo este conjunto forma lo que se llama módulo termoeléctrico.

El tamaño de los módulos puede variar desde los $1,5$ hasta los $50\ mm^2$ y su funcionamiento se basa en los efectos de Seebeck y Peltier, que se han comentado anteriormente. [26]

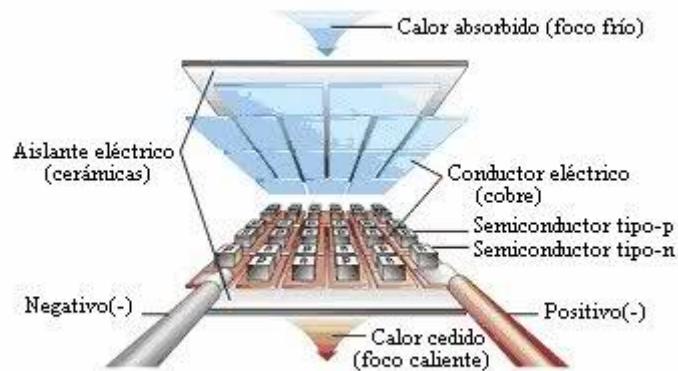


Figura 9.2.19. Estructura interna de un módulo Peltier

Sensores Térmicos.

En instrumentación industrial, los termopares son usados como sensores de temperatura. Son económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Su principal limitación está en la exactitud, pues es fácil obtener errores del sistema cuando se trabaja con temperaturas inferiores a un grado Celsius.

Un termopar es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje como consecuencia de la diferencia de temperaturas entre los extremos del conductor.

Los diferentes tipos de termopares se diferencian principalmente por el rango de temperaturas al que pueden trabajar, de los metales que están compuestos y de su capacidad de generación.

- **Tipo E:** Tiene una alta sensibilidad, lo que los hace ideales para medir temperaturas muy bajas. Tiene una sensibilidad de $68\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.
- **Tipo J:** No se puede utilizar a temperaturas superiores a los 760°C y siempre por encima de los 40°C . Le afecta mucho la corrosión y su coeficiente Seebeck es de unos $52\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.
- **Tipo T:** Se puede utilizar entre -200°C y 260°C . Estos termopares tienen un coeficiente de $43\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.
- **Tipo K:** Tienen muchas aplicaciones y un coste relativamente bajo. Pueden funcionar entre 200°C y 1372°C . Su coeficiente de generación o coeficiente Seebeck es de $41\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Tiene buena resistencia a la oxidación. Es el termopar más utilizado.

- **Tipo N:** Se trata de un tipo de termopar muy estable y resistente a la oxidación a altas temperaturas. Por esta estabilidad no necesita del platino que se pone en los tipos B, R y S que se explican a continuación. Su coeficiente Seebeck ronda los $36 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Los termopares B, R y S tienen un bajo coeficiente de generación (sobre los $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) pero en cambio pueden trabajar a temperaturas muy altas.

- **Tipo B:** Para mediciones de temperaturas superiores a los $1800 \text{ }^\circ\text{C}$.
- **Tipo R:** Tienen un coste elevado y pueden funcionar hasta los $1300 \text{ }^\circ\text{C}$.
- **Tipo S:** Es muy estable pero caro y efectivo hasta los $1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Se utiliza para calibrar universalmente el punto de fusión del oro ($1064,43 \text{ }^\circ\text{C}$).

La siguiente tabla ilustra los tipos de termopares más habituales.

Código ANSI	Combinación de la aleación		Código de color	
	+	-	Termopar	Extensión
E	Cromel níquel - cromo Ni-Cr	Constantan cobre - níquel Cu-Ni		
J	hierro Fe	Constantan cobre - níquel Cu-Ni		
T	cobre Cu	Constantan cobre - níquel Cu-Ni		
K	Cromel níquel - cromo Ni-Cr	Alumel níquel - aluminio Ni-Al		
N	Nicrosil níquel - cromo - silicio Ni-Cr-Si	Nisil níquel - silicio - magnesio Ni-Si-Mg		
R	platino - 13% rodio Pt-13% Rh	platino Pt	No establecido	
S	platino - 10% rodio Pt-10% Rh	platino Pt	No establecido	
B	platino - 30% rodio Pt-30% Rh	platino - 6% rodio Pt-6% Rh	No establecido	

Figura 9.2.20. Clasificación más habitual de los termopares.

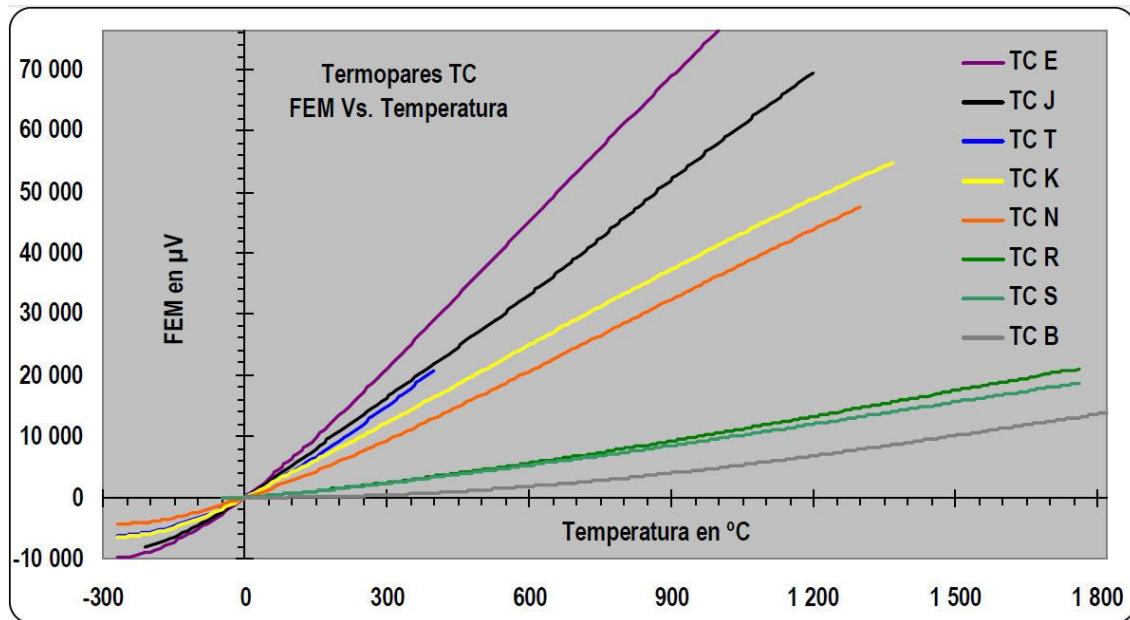


Figura 9.2.21. Gráfica de la capacidad de generación de los termopares mostrando la fuerza electromotriz que generan cuando se someten a una cierta diferencia de temperatura.

Industria del automóvil.

En torno a este apartado gira el objetivo del presente trabajo.

Los automóviles son máquinas térmicas que utilizan la energía de la combustión del motor para transformarla en energía cinética de rotación y permitir así el avance del vehículo. Una vez que se ha producido la combustión en el motor todo el resto de energía térmica no se utiliza y se pierde en el ambiente. Lo que se intenta mediante los materiales termoeléctricos es aprovechar este calor residual y convertirlo en energía eléctrica para otras aplicaciones. De esta forma se aumentaría de un modo considerable el rendimiento de los motores de combustión que se caracteriza por ser bastante bajo.

De esta forma, el principal objetivo es producir potencia a partir del calor procedente de los gases de escape con el generador termoeléctrico, para en la medida de lo posible desacoplar el alternador del movimiento del cigüeñal y así liberarlo de un par resistente con el fin de ahorrar combustible.

Además de poder aprovechar esta tecnología en vehículos rodados, también se puede extender a otros procesos donde se produzca una gran cantidad de energía térmica residual, como puede ser en las centrales térmicas.

ANEXO III

CÁLCULOS

CÁLCULO DEL GENERADOR TERMOELÉCTRICO

CONSTANTES Y PROPIEDADES TERMOFÍSICAS

AIRE

Calor específico a presión constante (C_p) del aire a la entrada

$$C_{p,\text{gases}} = \mathbf{Cp} [\text{Air} ; T = T_{\text{gases};0}] \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

Densidad del aire a la entrada

$$\rho_{\text{gases}} = \rho [\text{Air} ; T = T_{\text{gases};0} ; P = 101325] \text{ Kg/m}^3$$

Número de Prandtl del aire

$$\Pr_{\text{gases}} = \mathbf{Pr} [\text{Air} ; T = T_{\text{gases};0}]$$

Conductividad del aire

$$k_{\text{gases}} = \mathbf{k} [\text{Air} ; T = T_{\text{gases};0}] \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

Viscosidad del aire

$$\mu_{\text{gases}} = \mathbf{Visc} [\text{Air} ; T = T_{\text{gases};0}] \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Entalpía de los gases a la entrada

$$h_{\text{gases};\text{entrada}} = \mathbf{h} [\text{Air} ; T = T_{\text{gases};0}] \text{ J/Kg}$$

Entalpía de los gases a la salida

$$h_{\text{gases};\text{salida}} = \mathbf{h} [\text{Air} ; T = T_{\text{gases};10}] \text{ J/Kg}$$

Entalpía de los gases en condiciones normales

$$h_{0;\text{gases}} = \mathbf{h} [\text{Air} ; T = T_0] \text{ J/Kg}$$

Entropía de los gases a la entrada

$$s_{\text{gases};\text{entrada}} = \mathbf{s} [\text{Air} ; T = T_{\text{gases};0} ; P = 101325] \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

Entropía de los gases a la salida

$$s_{\text{gases};\text{salida}} = \mathbf{s} [\text{Air} ; T = T_{\text{gases};10} ; P = 101325] \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

Entropía de los gases en condiciones normales

$$s_{0;\text{gases}} = \mathbf{s} [\text{Air} ; T = T_0 ; P = 101325] \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

AGUA

Calor específico a presión constante (C_p) del agua a la T^a de refrigeración

$$C_{p,\text{agua;refrigeración}} = \mathbf{Cp} [\text{water} ; T = T_{\text{agua};10} ; P = 101325] \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

Calor específico a presión constante (C_p) del agua a la T^a de entrada de los gases

$$Cp_{\text{agua;gases}} = Cp \left[\text{water} ; T = T_{\text{gases};0} ; P = 101325 \right] \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

Densidad del agua a la T^a de refrigeración

$$\rho_{\text{agua;refrigeración}} = \rho \left[\text{water} ; T = T_{\text{agua};10} ; P = 101325 \right] \text{ Kg/m}^3$$

Densidad del agua a la T^a de entrada de los gases

$$\rho_{\text{agua;gases}} = \rho \left[\text{water} ; T = T_{\text{gases};0} ; P = 101325 \right] \text{ Kg/m}^3$$

Número de Prandtl del agua a la T^a de refrigeración

$$Pr_{\text{agua}} = Pr \left[\text{water} ; T = T_{\text{agua};10} ; P = 101325 \right]$$

Conductividad del agua a la T^a de refrigeración

$$k_{\text{agua}} = k \left[\text{water} ; T = T_{\text{agua};10} ; P = 101325 \right] \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

Viscosidad del agua a la T^a de refrigeración

$$\mu_{\text{agua}} = \text{Visc} \left[\text{water} ; T = T_{\text{agua};10} ; P = 101325 \right] \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Entalpía del agua a la entrada

$$h_{\text{agua;entrada}} = h \left[\text{water} ; T = T_{\text{agua};10} ; P = 101325 \right] \text{ J/Kg}$$

Entalpía del agua a la salida

$$h_{\text{agua;salida}} = h \left[\text{water} ; T = T_{\text{agua};0} ; P = 101325 \right] \text{ J/Kg}$$

Entalpía del agua en condiciones normales

$$h_{0;\text{agua}} = h \left[\text{water} ; T = T_0 ; P = 101325 \right] \text{ J/Kg}$$

Entropía del agua a la entrada

$$s_{\text{agua;entrada}} = s \left[\text{water} ; T = T_{\text{agua};10} ; P = 101325 \right] \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

Entropía del agua a la salida

$$s_{\text{agua;salida}} = s \left[\text{water} ; T = T_{\text{agua};0} ; P = 101325 \right] \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

Entropía del agua en condiciones normales

$$s_{0;\text{agua}} = s \left[\text{water} ; T = T_0 ; P = 101325 \right] \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

ALUMINIO

Conductividad del aluminio

$$K_{\text{Al};1} = k \left[\text{Aluminum} ; T = T_{\text{gases};0} \right] \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$k_{\text{Al};2} = k \left[\text{Aluminum} ; T = T_{\text{agua};10} \right] \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

TRIDECANO

Densidad del tridecano

$$\rho_{\text{Tridecano}} = 757 \text{ Kg/m}^3$$

DIÓXIDO DE CARBONO, CO_2

Calor específico a presión constante (C_p) del CO_2

$$C_{p,\text{CO}_2} = C_p [\text{CO}_2 ; T = T_{\text{gases},0}]$$

Densidad del CO_2 a la T^a de entrada de gases

$$\rho_{\text{CO}_2} = \rho [\text{CO}_2 ; T = T_{\text{gases},0} ; P = 101325] \text{ Kg/m}^3$$

NITRÓGENO, N_2

Calor específico a presión constante (C_p) del N_2

$$C_{p,\text{N}_2} = C_p [\text{N}_2 ; T = T_{\text{gases},0}]$$

Densidad del N_2 a la T^a de entrada de gases

$$\rho_{\text{N}_2} = \rho [\text{N}_2 ; T = T_{\text{gases},0} ; P = 101325]$$

OXÍGENO

Calor específico a presión constante (C_p) del O_2

$$C_{p,\text{O}_2} = C_p [\text{O}_2 ; T = T_{\text{gases},0}]$$

Densidad del O_2 a la T^a de entrada de gases

$$\rho_{\text{O}_2} = \rho [\text{O}_2 ; T = T_{\text{gases},0} ; P = 101325]$$

LADO DE LOS GASES

Se ha empleado el modelo de aire como gas ideal para todos los cálculos referentes a los gases de combustión.

DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA INTERNA

$$\text{Radio}_{\text{circunferencia;externa}} = 0,07837 \text{ m.} \text{ Medida obtenida a partir del modelo de Autocad}$$

$$\text{Radio}_{\text{circunferencia;interna}} = 0,073 \text{ m} \text{ Se ha fijado este radio durante el diseño para optimizar el rendimiento.}$$

$$\text{Área}_{\text{circunferencia;externa}} = \pi \cdot \text{Radio}_{\text{circunferencia;externa}}^2 \text{ m}^2$$

$$\text{Longitud}_{\text{circunferencia;ext}} = 2 \cdot \pi \cdot \text{Radio}_{\text{circunferencia;externa}} \text{ m}$$

$$\text{Área}_{\text{circunferencia;interna}} = \pi \cdot \text{Radio}_{\text{circunferencia;interna}}^2 \text{ m}^2$$

Características de las aletas

$$N^0_{\text{aletas}} = 65 \text{ aletas.} \text{ Se ha fijado esta cantidad de aletas durante el diseño para optimizar el rendimiento.}$$

$$e_{\text{aleta;gases}} = 0,003 \text{ m.} \text{ Espesor de aleta de la zona de paso de los gases de combustión.}$$

$$\text{Altura}_{\text{aleta}} = \text{Radio}_{\text{circunferencia;externa}} - \text{Radio}_{\text{circunferencia;interna}} \quad m$$

$$\text{Area}_{\text{aletas}} = \text{Altura}_{\text{aleta}} \cdot e_{\text{aleta;gases}} \cdot N^{\circ}_{\text{aletas}} \quad m^2$$

$$\text{Sección}_{\text{paso;gases}} = \text{Area}_{\text{circunferencia;externa}} - \text{Area}_{\text{circunferencia;interna}} - \text{Area}_{\text{aletas}} \quad m^2$$

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE LOS GASES EN EL INTERIOR DEL TEG

Hidrocarburo utilizado: Tridecano, con una composición = $C_{13}H_{28}$.

Ajuste de la reacción:



Que pesan (multiplicando por el peso molecular de cada uno):

$$184 \text{ gr} (C_{13}H_{28}) + 640 \text{ gr} (O_2) + 2106,7 \text{ gr} (N_2) \rightarrow 572 \text{ gr} (CO_2) + 252 \text{ gr} (H_2O) + 2106,7 \text{ gr} (N_2)$$

$$\text{Peso}_{O_2} = 20 \cdot 16 \cdot 2 \quad \text{gr}$$

$$\text{Peso}_{N_2} = 75,24 \cdot 14 \cdot 2 \quad \text{gr}$$

$$\text{Peso}_{H_2O} = 14 \cdot 1 \cdot 2 + 14 \cdot 16 \quad \text{gr}$$

$$\text{Peso}_{\text{total;productos}} = \text{Peso}_{O_2} + \text{Peso}_{N_2} + \text{Peso}_{H_2O} \quad \text{gr}$$

Los productos de la reacción ocupan (multiplicando el número de átomos por 22,4 litros que ocupa un mol de gas ideal):

$$\text{A 1 atm y a 273 K, ocupan: } 291,2 \text{ litros} (CO_2) + 313,6 \text{ litros} (H_2O) + 1685,38 \text{ litros} (N_2)$$

Y según la Ley de Charles para gases ideales: $(V_1 / V_2) = (T_1 / T_2)$

$$\text{A 1 atm y 773 K, ocupan: } 824,5 \text{ litros} (CO_2) + 888 \text{ litros} (H_2O) + 4772,2 \text{ litros} (N_2)$$

$$\text{Volumen}_{\text{total;humo;a;T;entrada}} = 824,5 + 888 + 4772,2 \quad \text{litros}$$

COMPOSICIÓN EN PESO DEL AIRE

$$\text{Porcentaje}_{O_2} = \left[\frac{\text{Peso}_{O_2}}{\text{Peso}_{O_2} + \text{Peso}_{N_2}} \right] \cdot 100 \quad \% \text{ de } O_2$$

$$\text{Porcentaje}_{N_2} = \left[\frac{\text{Peso}_{N_2}}{\text{Peso}_{O_2} + \text{Peso}_{N_2}} \right] \cdot 100 \quad \% \text{ de } N_2$$

En este vehículo se ha comprobado un consumo por autovía de 6,3 litros/100 km. circulando a una velocidad de 120 km/h.

Esto quiere decir que por segundo gasta:

$$\text{Gasto}_{\text{segundo;vol}} = \frac{6,3}{3600} \quad l/s$$

Que si lo multiplicamos por la densidad queda:

$$\text{Gasto}_{\text{segundo;peso}} = \text{Gasto}_{\text{segundo;vol}} \cdot \frac{\rho_{\text{Tridecano}}}{1000} \quad \text{kg/s.} \quad \text{Divido la densidad por 1000 para que las unidades sean kg/litro}$$

El dosado en motores diésel es de 1/25. Por lo que para quemar 184 gr. de tridecano se introducen 4600 gr. de aire de los que se emplean para la combustión 2747 gr. (640 gr. + 2106,7 gr.) y los 1853 gr. de aire restantes (4600 gr. - 2747 gr.) únicamente se calientan pero no se queman.

$$\text{Exceso}_{O_2} = \frac{1853 \cdot \frac{\text{Porcentaje}_{O_2}}{100} \cdot 22,4}{32} \cdot \frac{773}{273} \text{ litros}$$

$$\text{Exceso}_{N_2} = \frac{1853 \cdot \frac{\text{Porcentaje}_{N_2}}{100} \cdot 22,4}{28} \cdot \frac{773}{273} \text{ litros}$$

Al quemar 184 gr. de combustible, generamos un volumen de humo + volumen de exceso de O_2 que no se quema + volumen de exceso de N_2 que no se quema.

$$\text{Volumen}_{\text{total};\text{gases};a;T;\text{ent}} = \text{Volumen}_{\text{total};\text{humo};a;T;\text{entrada}} + \text{Exceso}_{O_2} + \text{Exceso}_{N_2} \text{ litros}$$

Por tanto el caudal de gases de escape queda:

$$\text{Caudal}_{\text{gases}} = \frac{\text{Gasto}_{\text{segundo};\text{peso}} \cdot \text{Volumen}_{\text{total};\text{gases};a;T;\text{ent}}}{184} \text{ m}^3/\text{s}$$

Y el flujo másico queda:

$$m_{\text{gases}} = \frac{[\text{Peso}_{\text{total};\text{productos}} + 1853] \cdot \text{Gasto}_{\text{segundo};\text{peso}}}{184} \text{ kg/s}$$

Velocidad de los gases en el interior del TEG

$$V_{\text{gases}} = \frac{\text{Caudal}_{\text{gases}}}{\text{Sección}_{\text{paso};\text{gases}}} \text{ m/s}$$

CÁLCULO DE EL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN EN LOS GASES

$$\text{Perímetro}_{\text{húmedo};\text{gases}} = 2 \cdot \pi \cdot \text{Radio}_{\text{circunferencia};\text{interna}} - N^0_{\text{aletas}} \cdot e_{\text{aleta};\text{gases}} + 2 \cdot \text{Altura}_{\text{aleta}} \cdot N^0_{\text{aletas}} + \text{Longitud}_{\text{circunferencia};\text{ext}} - N^0_{\text{aletas}} \cdot e_{\text{aleta};\text{gases}}$$

$$D_{\text{hidráulico};\text{gases}} = \frac{4 \cdot \text{Sección}_{\text{paso};\text{gases}}}{\text{Perímetro}_{\text{húmedo};\text{gases}}} \text{ m}$$

$$Re_{\text{gases}} = \frac{\rho_{\text{gases}} \cdot V_{\text{gases}} \cdot D_{\text{hidráulico};\text{gases}}}{\mu_{\text{gases}}} \text{ Número de Reynolds de los gases de combustión a su paso por el TEG.}$$

$$Nusselt_{\text{gases}} = \frac{\frac{f_{\text{gases}}}{8} \cdot Re_{\text{gases}} \cdot Pr_{\text{gases}}}{1,07 + 12,7 \cdot \left[\frac{f_{\text{gases}}}{8} \right]^{0,5} \cdot [Pr_{\text{gases}}^{(2/3)} - 1]} \text{ Correlación 15, flujo interno, régimen turbulento. Tablas asignatura 'Ingeniería Térmica'.$$

$$f_{\text{gases}} = [0,79 \cdot \ln(Re_{\text{gases}}) - 1,64]^{-2}$$

$$Nusselt_{\text{gases}} = \frac{h_{\text{conv};\text{gases}} \cdot D_{\text{hidráulico};\text{gases}}}{k_{\text{gases}}}$$

CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE UNA ALETA DEL LADO DE LOS GASES

$$m_{\text{aleta};\text{gases}} = \left[\frac{2 \cdot h_{\text{conv};\text{gases}}}{K_{Al;1} \cdot e_{\text{aleta};\text{gases}}} \right]^{0,5} \text{ m}$$

$$\eta_{aleta;gases} = \frac{\tanh \left[\frac{m_{aleta;gases}}{m_{aleta;gases}} \cdot \frac{Altura_{aleta}}{Altura_{aleta}} \right]}{\frac{m_{aleta;gases}}{m_{aleta;gases}} \cdot \frac{Altura_{aleta}}{Altura_{aleta}}} \quad \text{Rendimiento de la aleta de la zona de paso de los gases de combustión.}$$

LADO DEL AGUA

Se ha empleado el modelo de agua como fluido real para todos los cálculos referentes al líquido refrigerante.

DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA EXTERNA

a = 0,03 m. Anchura de la sección de paso del líquido refrigerante.

b = 0,005 m. Altura de la sección de paso del líquido refrigerante.

δ_x = 0,04 m. Longitud de cada sección que coincide con el lado del módulo termoeléctrico.

Altura_{módulo;refrigerador} = 0,015 m

$$e_{aleta;agua} = \frac{\delta_x - a}{2} \quad \text{m. Espesor de aleta del líquido refrigerante.}$$

$$\text{Sección}_{paso;agua} = a \cdot b \quad m^2$$

Caudal de agua de refrigeración

Caudal_{agua;total} = 0,0012 m³/s. Caudal que hace circular la bomba del circuito de refrigeración general del coche.

$$\text{Caudal}_{\text{agua;por;conducto}} = \frac{\text{Caudal}_{\text{agua;total}}}{12} \quad m^3/s$$

Velocidad del agua en los conductos

$$V_{\text{agua}} = \frac{\text{Caudal}_{\text{agua;por;conducto}}}{\text{Sección}_{paso;agua}} \quad m/s$$

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN EN EL AGUA

Perímetro_{húmedo;agua} = 2 · a + 2 · b m

$$D_{\text{hidráulico;agua}} = \frac{4 \cdot \text{Sección}_{paso;agua}}{\text{Perímetro}_{\text{húmedo;agua}}} \quad m$$

$$Re_{\text{agua}} = \frac{\rho_{\text{agua;refrigeración}} \cdot V_{\text{agua}} \cdot D_{\text{hidráulico;agua}}}{\mu_{\text{agua}}} \quad \text{Número de Reynolds del refrigerante a su paso por los conductos.}$$

$$Nusselt_{\text{agua}} = \frac{\frac{f_{\text{agua}}}{8} \cdot Re_{\text{agua}} \cdot Pr_{\text{agua}}}{1,07 + 12,7 \cdot \left[\frac{f_{\text{agua}}}{8} \right]^{0,5} \cdot \left[Pr_{\text{agua}}^{(2/3)} - 1 \right]} \quad \text{Correlación 15, flujo interno, régimen turbulento. Tablas asignatura 'Ingeniería Térmica'}$$

$$f_{\text{agua}} = [0,79 \cdot \ln (Re_{\text{agua}}) - 1,64]^{-2}$$

$$Nusselt_{\text{agua}} = \frac{h_{\text{conv;agua}} \cdot D_{\text{hidráulico;agua}}}{k_{\text{agua}}}$$

CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE UNA ALETA DEL LADO DEL AGUA

$$m_{\text{aleta;agua}} = \left[\frac{2 \cdot h_{\text{conv;agua}}}{k_{\text{Al};2} \cdot e_{\text{aleta;agua}}} \right]^{0,5} m$$

$$\eta_{\text{aleta;agua}} = \frac{\tanh \left[m_{\text{aleta;agua}} \cdot \left(b + \frac{a}{2} + \frac{\text{Altura}_{\text{módulo;refrigerador}} - b}{2} \right) \right]}{m_{\text{aleta;agua}} \cdot \left[b + \frac{a}{2} + \frac{\text{Altura}_{\text{módulo;refrigerador}} - b}{2} \right]} \quad \text{Rendimiento de la aleta del líquido refrigerante.}$$

BALANCE EXERGÉTICO AL TEG

$T_0 = 298 \text{ K}$. Temperatura en condiciones normales, 298 K y 1 atm.

$$m_{\text{agua}} = \text{Caudal}_{\text{agua;total}} \cdot \rho_{\text{agua;refrigeración}} \quad \text{kg/s}$$

$$B_{\text{gases;ent}} = m_{\text{gases}} \cdot \left[h_{\text{gases;entrada}} - h_{0;\text{gases}} - T_0 \cdot (s_{\text{gases;entrada}} - s_{0;\text{gases}}) + \frac{V_{\text{gases}}^2}{2} \right] \text{W}$$

$$B_{\text{agua;ent}} = m_{\text{agua}} \cdot \left[h_{\text{agua;entrada}} - h_{0;\text{agua}} - T_0 \cdot (s_{\text{agua;entrada}} - s_{0;\text{agua}}) + \frac{V_{\text{agua}}^2}{2} \right] \text{W}$$

$$B_{\text{gases;sal}} = m_{\text{gases}} \cdot \left[h_{\text{gases;salida}} - h_{0;\text{gases}} - T_0 \cdot (s_{\text{gases;salida}} - s_{0;\text{gases}}) + \frac{V_{\text{gases}}^2}{2} \right] \text{W}$$

$$B_{\text{agua;sal}} = m_{\text{agua}} \cdot \left[h_{\text{agua;salida}} - h_{0;\text{agua}} - T_0 \cdot (s_{\text{agua;salida}} - s_{0;\text{agua}}) + \frac{V_{\text{agua}}^2}{2} \right] \text{W}$$

$$B_{\text{gases;ent}} + B_{\text{agua;ent}} = B_{\text{gases;sal}} + B_{\text{agua;sal}} + W + B_{\text{destruida}}$$

$$\eta_{\text{exergético}} = \frac{W}{B_{\text{gases;ent}}} \quad \text{Rendimiento exergético.}$$

CÁLCULO ITERATIVO

Definición de los parámetros geométricos.

$n = 10$ Número de rodajas o secciones que hay en la dirección axial del TEG.

$P = 12$ Número de módulos que hay en cada rodaja o sección.

$L_1 = 0,00455 \text{ m}$. Distancia mayor entre aleta y aleta. Se dispone en la zona más alejada del centro del tubo de escape.
Medida obtenida a partir del modelo de Autocad.

$L_3 = 0,0041 \text{ m}$. Distancia menor entre aleta y aleta. Se dispone en la zona más cercana al centro del tubo de escape.
Medida obtenida a partir del modelo de Autocad.

$$\text{Lado}_{\text{dodecágono}} = 0,042 \text{ m}$$

$$\text{Área}_{\text{dodecágono}} = \frac{12 \cdot \text{Lado}_{\text{dodecágono}}^2}{4 \cdot \tan \left[\frac{\pi}{12} \right]} \text{ m}^2$$

$$J = \text{Área}_{\text{dodecágono}} - \pi \cdot \left[\text{Radio}_{\text{circunferencia;interna}} - \frac{e_{\text{aleta;gases}}}{2} \right]^2 - \frac{\text{Radio}_{\text{circunferencia;externa}} \cdot [L_1^2 - L_3^2]}{2 \cdot L_1} \cdot N_{\text{aletas}}$$

$$\text{m}^2$$

Variable creada para calcular el área de la sección de aluminio interna.

$$K_{TE} = \frac{98,2}{300 - 30} \text{ W/m}\cdot\text{K. Conductividad térmica del módulo termoeléctrico.}$$

$$\alpha = \frac{10,8}{300 - 30} \text{ V/K. Coeficiente Seebeck del módulo termoeléctrico.}$$

$$R_{TE} = 5,4 \text{ ohm. Resistencia eléctrica del módulo termoeléctrico.}$$

$$Int = 0,58 \text{ A. Intensidad que nos produce la máxima potencia.}$$

$$T_{gases;0} = 773 \text{ K. Temperatura de los gases a la entrada del TEG.}$$

$$T_{agua;10} = 353 \text{ K. Temperatura del refrigerante a la entrada. (El refrigerante y los gases van a contrafuerzo).}$$

$$T_{Al;1;11} = T_{Al;1;10} \text{ Condición impuesta para implantar que la última sección de módulos no ceden calor.}$$

$$T_{Al;1;0} = T_{Al;1;1} \text{ Condición impuesta para implantar que la primera sección de módulos no recibe calor.}$$

Iteración.

BALANCE A LOS GASES

Q_g = calor que ceden los gases al Aluminio.

$$Q_{g;i} = m_{gases} \cdot C_{p,gases} \cdot [T_{gases;i-1} - T_{gases;i}] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

$$Q_{g;i} = h_{conv,gases} \cdot \left[N^0_{aletas} \cdot L_1 \cdot \delta_x + 2 \cdot N^0_{aletas} \cdot \left(Altura_{aleta} + \frac{L_3}{2} \right) \cdot \eta_{aleta;gases} \cdot \delta_x \right] \cdot \left[\frac{T_{gases;i-1} + T_{gases;i}}{2} - T_{Al;1;i} \right] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

BALANACE AL ALUMINIO INTERNO

$$Q_{saliente;elemento;i} = \frac{[T_{Al;1;i} - T_{Al;1;i+1}] \cdot K_{Al;1} \cdot J}{\delta_x} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

$$Q_{entrante;elemento;i} = \frac{[T_{Al;1;i-1} - T_{Al;1;i}] \cdot K_{Al;1} \cdot J}{\delta_x} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

$$Q_{saliente;elemento;i} + Q_{c;i} = Q_{entrante;elemento;i} + Q_{g;i} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

$$T_{Al;1;i} = T_{c;i} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

BALANCE AL MÓDULO

Q_c = calor que cede el aluminio al lado caliente del módulo termoeléctrico.

$$Q_{c;i} = P \cdot [(T_{c;i} - T_{f;i}) \cdot K_{TE} + \alpha \cdot Int \cdot T_{c;i} - 1/2 \cdot Int^2 \cdot R_{TE}] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

$$Q_{f;i} = P \cdot [(T_{c;i} - T_{f;i}) \cdot K_{TE} + \alpha \cdot Int \cdot T_{f;i} + 1/2 \cdot Int^2 \cdot R_{TE}] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

$$W_i = Q_{c;i} - Q_{f;i} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

BALANCE A LA CHAPA DE ALUMINIO EXTERIOR

$$Q_{f;i} = Q_{agua;i} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

$$T_{Al;2;i} = T_{f;i} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

BALANCE AL LÍQUIDO REFRIGERANTE

$$Q_{agua;i} = \left[T_{Al;2;i} - \left(\frac{T_{agua;i-1} + T_{agua;i}}{2} \right) \right] \cdot h_{conv;agua} \cdot \left[P \cdot \delta_x \cdot a + 2 \cdot P \cdot \eta_{aleta;agua} \cdot \delta_x \cdot \left(b + \frac{a}{2} \right) + \frac{\text{Altura}_{módulo;refrigerador} - b}{2} \right] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

$$Q_{agua;i} = m_{agua} \cdot C_{p;agua;refrigeración} \cdot [T_{agua;i-1} - T_{agua;i}] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n$$

$$W = \sum_{i=1}^n [W_i] \quad W. \quad \text{Suma de las potencias generadas por cada módulo.}$$

$$Q_f = \sum_{i=1}^n [Q_{f;i}] \quad W. \quad \text{Suma del calor que ceden los módulos al agua.}$$

$$Q_c = \sum_{i=1}^n [Q_{c;i}] \quad W. \quad \text{Suma del calor que absorben los módulos.}$$

$$T_{caliente;máx} = T_{c;1} \quad K$$

A continuación aparece la tabla de resultados. Se han destacado con diferentes colores los datos obtenidos más significativos:

- En magenta se ven los rendimientos de las aletas y el exergético en tanto por uno.
- En gris se muestran los 3 parámetros más importantes de los gases, como son: el coeficiente de convección interna, la velocidad a su paso por el TEG y el flujo másico.
- En azul cian se muestra las mismas propiedades que en el gris, pero en este caso del agua.
- En azul marino se tiene la energía destruida debido a las irreversibilidades internas del sistema.
- En color rojo aparece la temperatura máxima a la que están expuestos los módulos de la primera sección de TEG, se puede observar que es inferior a 603 K, límite térmico para estos dispositivos.
- En amarillo se destaca la potencia generada, 261,6 W.

Nota: en las variables 'Número de Reynolds', 'Número de Prandtl', factor de fricción 'f' y 'Número de Nusselt' no se han incorporado unidades debido a que son adimensionales.

SOLUTION

Unit Settings: SI K Pa J mass rad

$a = 0,03 \text{ [m]}$
 $\alpha = 0,04 \text{ [V/K]}$
 $\text{Altura}_{\text{aleta}} = 0,00537 \text{ [m]}$
 $\text{Altura}_{\text{módulo,refrigerador}} = 0,015 \text{ [m]}$
 $\text{Área}_{\text{aletas}} = 0,001047 \text{ [m}^2]$
 $\text{Área}_{\text{circunferencia,externa}} = 0,0193 \text{ [m}^2]$
 $\text{Área}_{\text{dodecágono}} = 0,01975 \text{ [m}^2]$
 $b = 0,005 \text{ [m]}$
 $\text{Bagua,ent} = 22094 \text{ [W]}$
 $\text{B}_{\text{destruida}} = 3071 \text{ [W]}$
 $\text{B}_{\text{gases,sal}} = 2363 \text{ [W]}$
 $\text{Caudal}_{\text{agua,por,conducto}} = 0,0001 \text{ [m}^3/\text{s]}$
 $\text{Caudal}_{\text{gases}} = 0,07603 \text{ [m}^3/\text{s]}$
 $C_{\text{agua,refrigeración}} = 4194$
 $C_{\text{gases}} = 1092 \text{ [J/kg·K]}$
 $C_{\text{pO}_2} = 1045 \text{ [J/kg·K]}$
 $D_{\text{hidráulico,agua}} = 0,008571 \text{ [m]}$
 $\eta_{\text{aleta,agua}} = 0,3989$
 $\eta_{\text{exergético}} = 0,03706$
 $\eta_{\text{aleta,gases}} = 0,9953$
 $\text{Exceso}_{\text{O}_2} = 3219 \text{ [litros]}$
 $\epsilon_{\text{aleta,agua}} = 0,005 \text{ [m]}$
 $f_{\text{gases}} = 0,02788$
 $G_{\text{segundo,peso}} = 0,001325 \text{ [kg/s]}$
 $h_{0, \text{agua}} = 104216 \text{ [J/kg]}$
 $h_{\text{agua,entrada}} = 334340 \text{ [J/kg]}$
 $h_{\text{conv,agua}} = 5862 \text{ [W/m}^2\cdot\text{K]}$
 $h_{\text{gases,entrada}} = 792667 \text{ [J/kg]}$
 $I_{\text{nt}} = 0,58 \text{ [A]}$
 $k_{\text{agua}} = 0,6561 \text{ [W/m·K]}$
 $k_{\text{Al,1}} = 221,6 \text{ [W/m·K]}$
 $k_{\text{Al,2}} = 240 \text{ [W/m·K]}$
 $k_{\text{TE}} = 0,3637 \text{ [W/K]}$
 $L_{\text{longitudcircunferencia,ext}} = 0,4924 \text{ [m]}$
 $L_3 = 0,0041 \text{ [m]}$
 $\mu_{\text{gases}} = 0,00003563 \text{ [Pa·s]}$
 $m_{\text{aleta,agua}} = 98,85 \text{ [m]}$
 $m_{\text{gases}} = 0,03493 \text{ [kg/s]}$
 $Nusselt_{\text{agua}} = 76,58$
 $N^{\circ}_{\text{aletas}} = 65 \text{ [aletas]}$
 $\text{Perímetro}_{\text{ohúmedo,agua}} = 0,07 \text{ [m]}$
 $P_{\text{eson2}} = 252 \text{ [gr]}$
 $P_{\text{esoO}_2} = 640 \text{ [gr]}$
 $\text{Porcentaje}_{\text{N}_2} = 76,7 \text{ [%N}_2]$
 $P_{\text{ragua}} = 2,27$
 $Q_{\text{c}} = 8891 \text{ [W]}$
 $R_{\text{adiocircunferencia,externa}} = 0,07837 \text{ [m]}$
 $R_{\text{eagua}} = 15638$
 $\rho_{\text{agua,gases}} = 0,2842 \text{ [kg/m}^3]$
 $\rho_{\text{CO}_2} = 0,6938 \text{ [kg/m}^3]$
 $\rho_{\text{N}_2} = 0,4416 \text{ [kg/m}^3]$
 $\rho_{\text{Tridecano}} = 757 \text{ [Kg/m}^3]$
 $\text{Sección}_{\text{paso,agua}} = 0,00015 \text{ [m}^2]$
 $S_{0, \text{agua}} = 364,8 \text{ [J/kg·K]}$
 $S_{\text{agua,entrada}} = 1073 \text{ [J/kg·K]}$
 $S_{\text{gases,entrada}} = 6680 \text{ [J/kg·K]}$
 $T_0 = 298 \text{ [K]}$
 $V_{\text{olumen,total,gases,a,T,ent}} = 10560$
 $V_{\text{agua}} = 0,6667 \text{ [m/s]}$
 $W = 261,6 \text{ [W]}$
 $\text{Volumen}_{\text{total,humo,a,T,entrada}} = 6485$
 $V_{\text{gases}} = 50,47 \text{ [m/s]}$

Arrays Table: Main

	$Q_{\text{agua};i}$	$Q_{c;i}$	$Q_{\text{entrante;elemento};i}$	$Q_{f;i}$	$Q_{g;i}$	$Q_{\text{saliente;elemento};i}$	$T_{\text{agua};i}$	$T_{\text{Al};1;i}$
0							354,8	598,1
1	1139	1183	5,054E-12	1139	1297	114,6	354,5	598,1
2	1082	1122	114,6	1082	1147	139,3	354,3	584,4
3	1012	1048	139,3	1012	1047	138,7	354,1	567,8
4	942,7	973,9	138,7	942,7	966,5	131,3	353,9	551,2
5	876,9	903,9	131,3	876,9	894,9	122,3	353,7	535,5
6	815,6	838,7	122,3	815,6	829,4	113	353,6	520,9
7	758,9	778,5	113	758,9	768,2	102,7	353,4	507,4
8	707,5	723,8	102,7	707,5	709,9	88,86	353,3	495,1
9	663	676,4	88,86	663	650,6	63,04	353,1	484,5
10	631,6	643	63,04	631,6	580	4,028E-12	353	477
11								477

Arrays Table: Main

	$T_{\text{Al};2;i}$	$T_{c;i}$	$T_{f;i}$	$T_{\text{gases};i}$	W_i
0				773	
1	362,8	598,1	362,8	739	43,72
2	362,1	584,4	362,1	708,9	40,09
3	361,4	567,8	361,4	681,5	35,65
4	360,7	551,2	360,7	656,2	31,23
5	360,1	535,5	360,1	632,7	27,05
6	359,5	520,9	359,5	611	23,15
7	358,9	507,4	358,9	590,8	19,54
8	358,4	495,1	358,4	572,2	16,27
9	357,9	484,5	357,9	555,2	13,44
10	357,6	477	357,6	539,9	11,44
11					

Parametric Table: Table 1

	Int [A]	W [W]
Run 1	0,4	237
Run 2	0,4444	247,9
Run 3	0,4889	255,6
Run 4	0,5333	260,4
Run 5	0,5778	262,1
Run 6	0,6222	260,8
Run 7	0,6667	256,5
Run 8	0,7111	249,2
Run 9	0,7556	238,9
Run 10	0,8	225,7

ANEXO IV

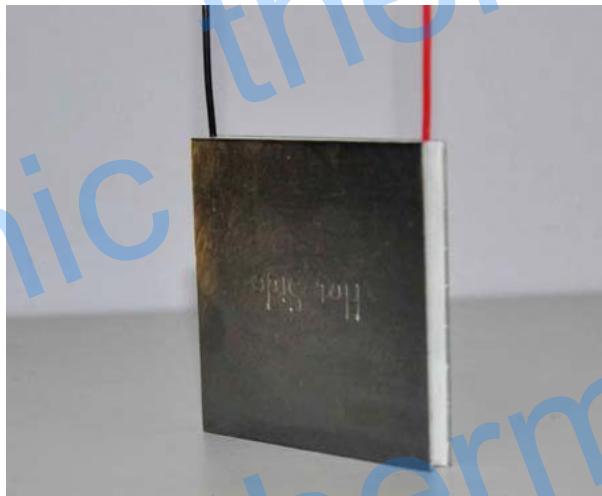
DOCUMENTACIÓN TÉCNICA Y OTRAS IMÁGENES ACLARATORIAS

Specification of Thermoelectric Module

TEP1-1264-3.4

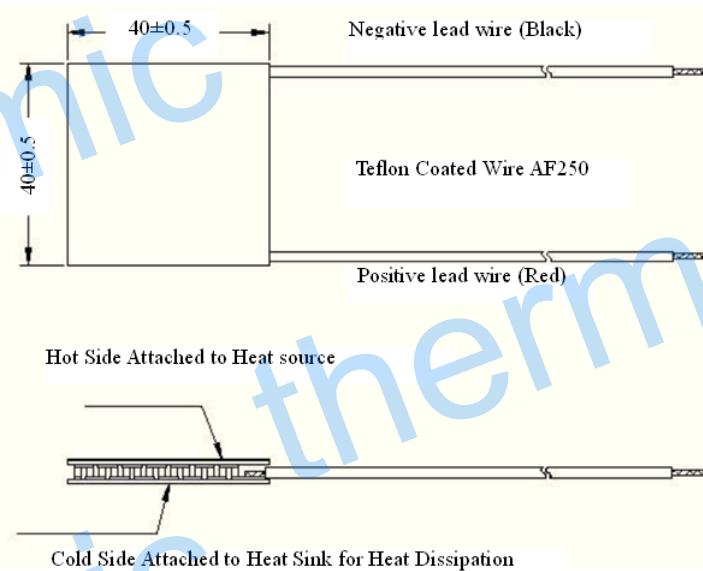
Description

The power module is designed and manufactured by our unique technology for converting heat source directly into electricity. The module is Bi-Te based thermoelectric module that can work at the temperature of as high as 330 °C (626 °F) heat source continuously and up to 400 °C(752 °F) intermittently. The thermoelectric module will generate DC electricity as long as there is a temperature difference across the module. The more power will be generated when the temperature difference across the module becomes larger, and the efficiency of converting heat energy into electricity will increase therefore. The module is stuck with the high thermal conductivity graphite sheet on its both sides of the ceramic plates to provide low contact thermal resistance, hence you do not need to apply thermal grease or other heat transfer compound when you install the module. The graphite sheet can work well in extremely high temperature .

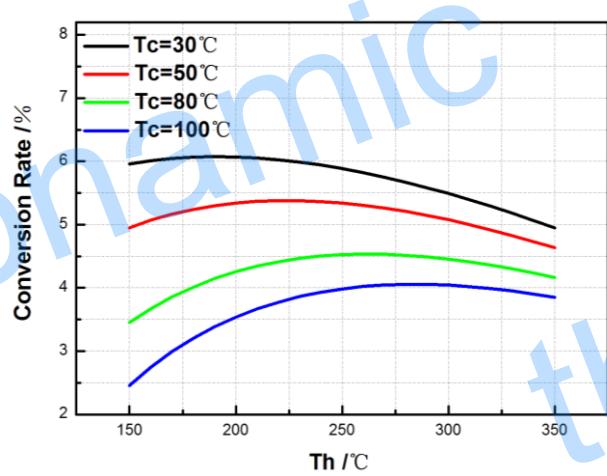


Hot Side Temperature (°C)	300
Cold Side Temperature (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	10.8
Matched Load Resistance (ohms)	5.4
Matched load output voltage (V)	5.4
Matched load output current (A)	1.0
Matched load output power (W)	5.4
Heat flow across the module(W)	≈ 98.2
Heat flow density(W cm ⁻²)	≈ 6.2
AC Resistance(ohms) Measured under 27 °C at 1000Hz	2.8 ~3.9

Geometric Characteristics Dimensions in millimeter



Conversion Rate of the modules Vs Th under various Tc



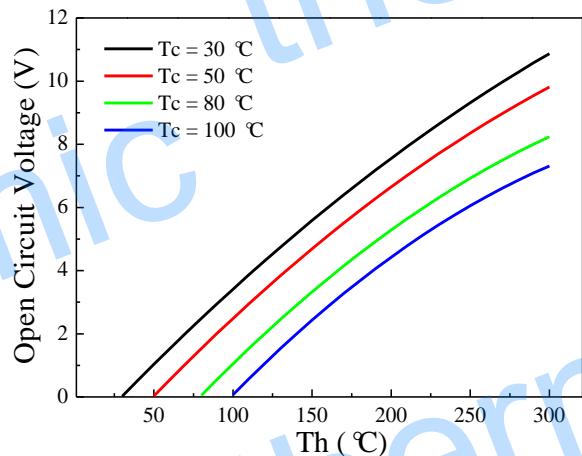
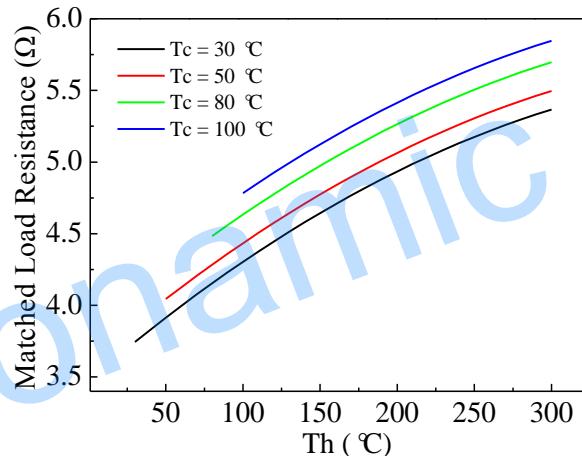
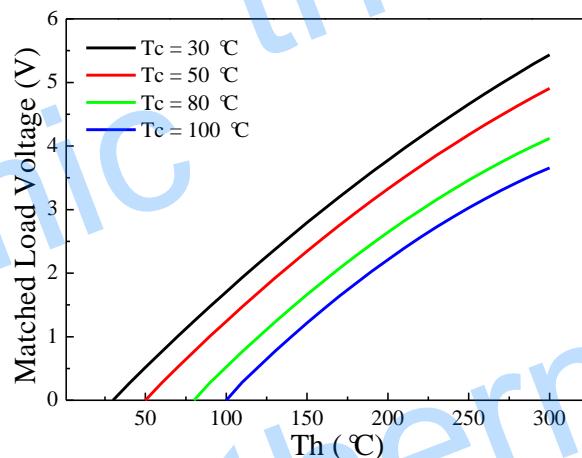
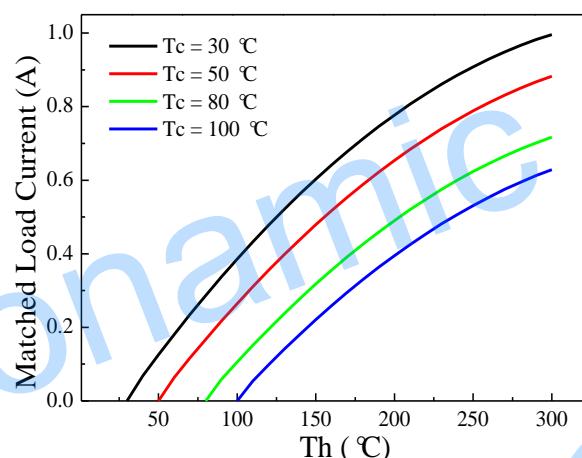
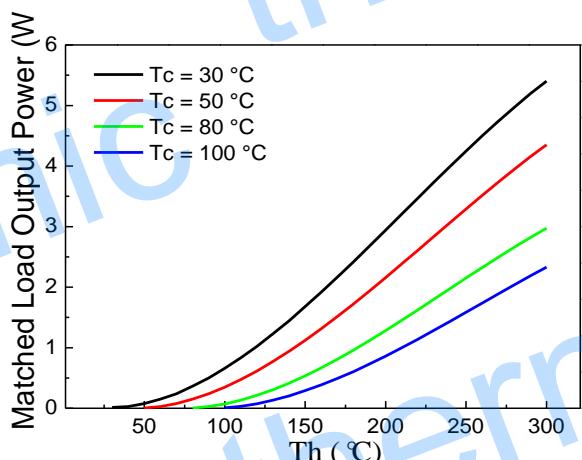
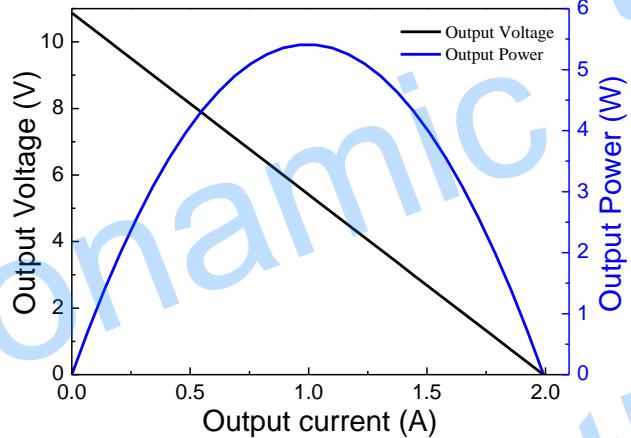
Noted: Conversion rate = Matched load output power/Heat flow through the module

Creative technology with fine manufacturing processes provides you the reliable and quality products.

Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: info@thermonamic.com Web Site: www.thermonamic.com

Specification of Thermoelectric Module

TEP1-1264-3.4

The chart for open circuit voltage Vs T_h under various T_c The chart for matched load resistance Vs T_h under various T_c The chart for matched load voltage Vs T_h under various T_c The chart for matched load current Vs T_h under various T_c The chart for matched load output power Vs T_h under various T_c The chart for output voltage and output power Vs output current
under $T_h=300^{\circ}\text{C}$ and $T_c=30^{\circ}\text{C}$

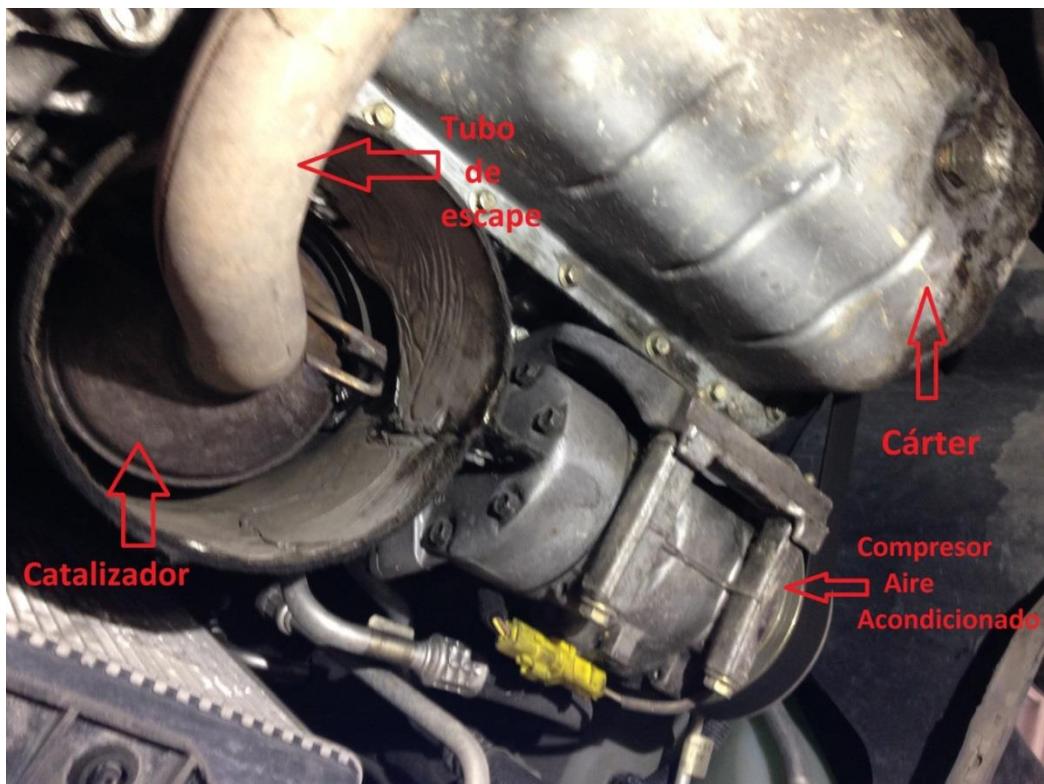


Figura 9.4.1. Vista inferior de la zona de los elementos previos.

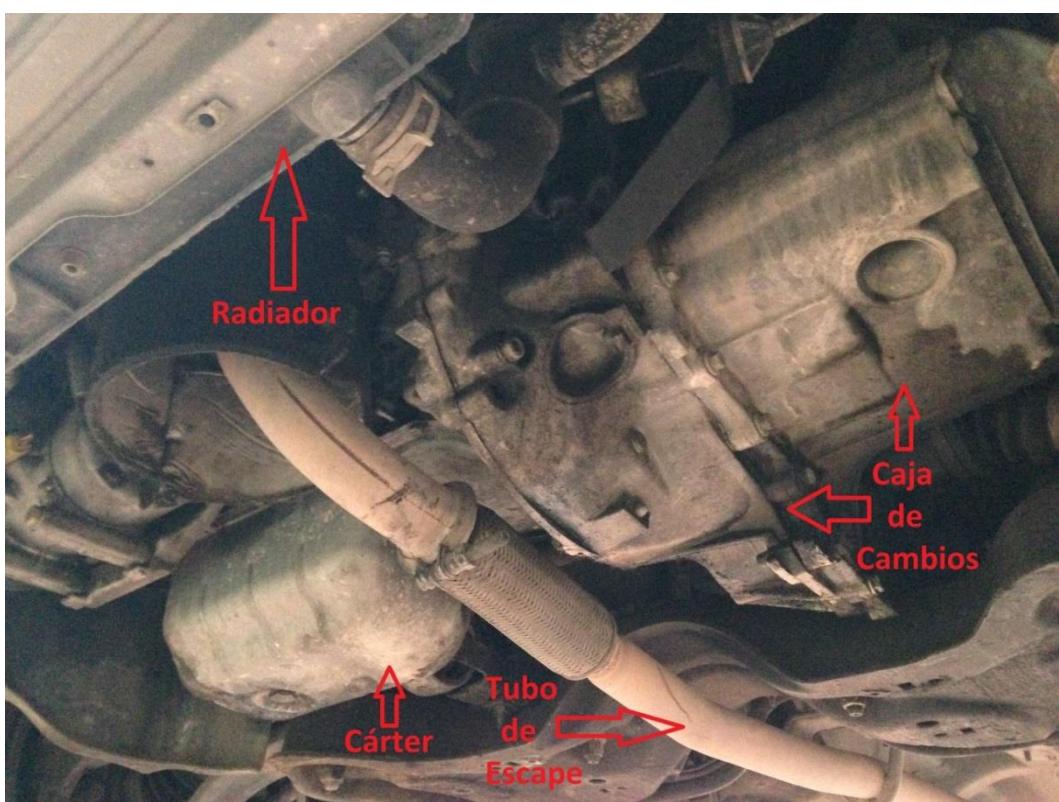


Figura 9.4.2. Vista inferior de la zona de los elementos previos.



Figura 9.4.3. Vista inferior de la zona de montaje.



Figura 9.4.4. Imagen donde se justifica la temperatura de 80°C del líquido refrigerante.

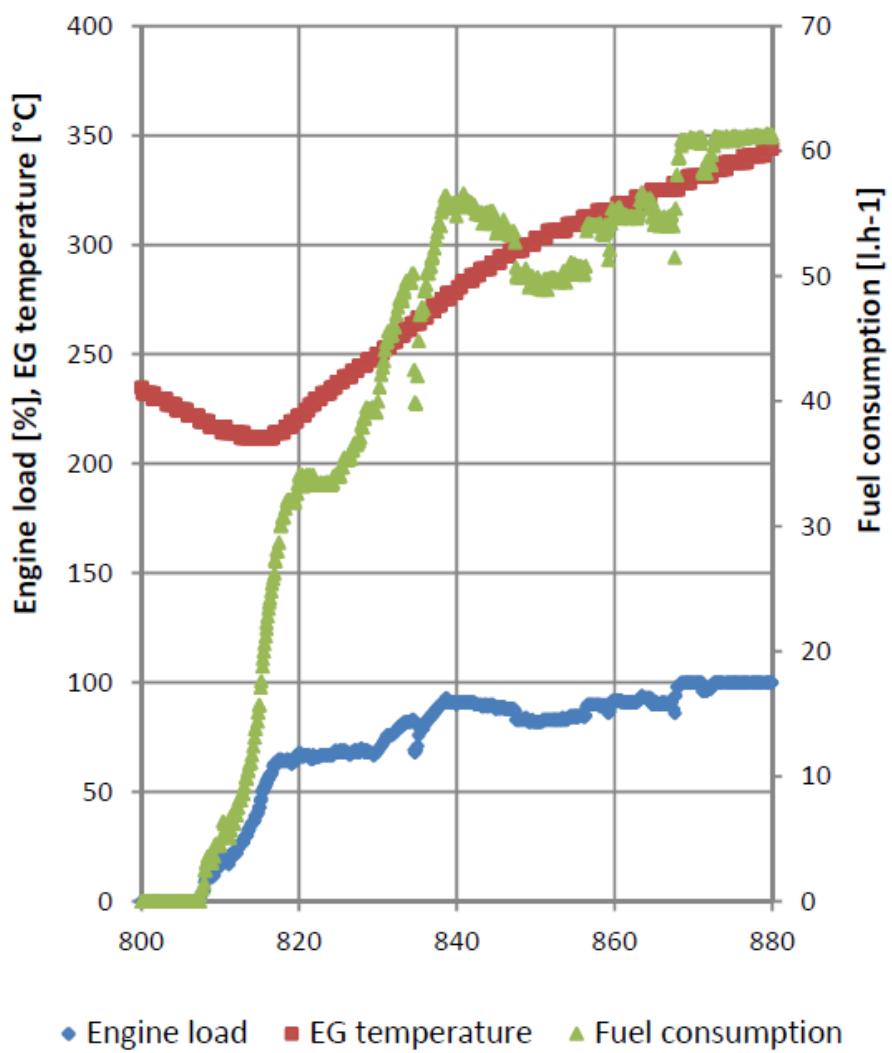


Figura 9.4.5. Gráfica donde se observa la la carga demandada (azul) frente a la temperatura de los gases de escape, EG en rojo. [30]