



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Generadores termoeléctricos accionados por el calor humano para dispositivos portátiles. Estado del arte y modelado térmico sencillo

Body heat driven thermoelectric generators for wearable devices. State of the art and simple thermal modeling

Autor

Jorge Castillo Fernández

Director

Sergio Usón Gil

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2017



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Generadores termoeléctricos accionados por el calor humano para dispositivos portátiles. Estado del arte y modelado térmico sencillo

Body heat driven thermoelectric generators for wearable devices. State of the art and simple thermal modeling

Autor

Jorge Castillo Fernández

Director

Sergio Usón Gil

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2017

GENERADORES TERMOELÉCTRICOS ACCIONADOS POR EL CALOR HUMANO PARA DISPOSITIVOS PORTÁTILES. ESTADO DEL ARTE Y MODELADO TÉRMICO SENCILLO

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado estudia cómo funcionan y cuál es el alcance de los generadores termoeléctricos que aprovechan el calor producido por el cuerpo humano para generar energía eléctrica.

En primer lugar, se explica qué es la termoelectricidad, detallando el funcionamiento de un generador termoeléctrico y haciendo una clasificación de los mismos según su temperatura de trabajo.

Posteriormente, se describen las aplicaciones más utilizadas para generar energía eléctrica a través de este tipo de dispositivos. En ese capítulo se explican primero las aplicaciones más generalizadas y después las que están relacionadas con dispositivos portátiles sobre el cuerpo humano.

A continuación, se realiza una revisión bibliográfica de diferentes artículos científicos en los que se estudian y analizan este tipo de generadores. Esta revisión es de suma importancia para el diseño posterior debido a que recopila datos importantes y resultados orientativos, que facilitarán las labores de cálculo y análisis de resultados.

Una vez hecha la revisión bibliográfica, se procede a hacer el diseño y modelado de un generador termoeléctrico accionado por el calor corporal mediante el programa de cálculo EES. El capítulo se divide en cinco apartados: en el primero de ellos, se eligen los materiales adecuados; en el segundo se plantea el diseño del generador para una situación concreta; en el tercero se obtienen los resultados; en el cuarto se hacen diferentes análisis paramétricos de la potencia en función de las variables dependientes de cada situación; en el quinto se estudia la viabilidad del generador para accionar diferentes dispositivos.

Por último, se extraen las conclusiones del trabajo. Al comparar los resultados obtenidos de manera experimental en los artículos científicos, con los obtenidos en el modelado, se concluye que el modelado se ha realizado correctamente ya que el rango de magnitud de ambos resultados es muy similar.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. TERMOELECTRICIDAD.....	2
2.1. <i>Introducción a la termoelectricidad</i>	2
2.2. <i>Efecto Seebeck</i>	3
2.3. <i>Generadores termoeléctricos.....</i>	4
2.3.1. <i>Funcionamiento.....</i>	4
2.3.2. <i>Tipos</i>	6
2.4. <i>Ventajas e inconvenientes</i>	8
3. APLICACIONES PARA PRODUCIR ELECTRICIDAD	9
3.1. <i>Calor residual en gases de escape.....</i>	10
3.2. <i>Termopares.....</i>	11
3.3. <i>Producción de electricidad a través del cuerpo humano</i>	11
3.3.1. <i>Reloj analógico</i>	12
3.3.2. <i>Reloj inteligente.....</i>	12
3.3.3. <i>Botas para cargar la batería del móvil</i>	13
3.3.4. <i>Marcapasos.....</i>	13
4. REVISIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS	14
5. DISEÑO Y MODELADO DE UN TEG ACCIONADO POR EL CALOR HUMANO	20
5.1. <i>Elección de los materiales termoeléctricos</i>	20
5.2. <i>Diseño y simulación térmica del sistema de producción de energía.....</i>	21
5.3. <i>Obtención de resultados</i>	26
5.4. <i>Análisis paramétricos de los resultados modificando las variables</i>	28
5.5. <i>Viabilidad en diferentes aplicaciones.....</i>	32
6. CONCLUSIONES.....	33
BIBLIOGRAFÍA.....	35

1. INTRODUCCIÓN

Debido al incremento de la población y al creciente número de aparatos electrónicos, la demanda de electricidad aumenta a un ritmo imparable. Por ello, la dependencia de la sociedad hacia los combustibles fósiles y energías contaminantes es cada vez mayor.

Con el fin de prevenir el calentamiento global y la conservación de los ecosistemas, se están desarrollando nuevas fuentes de energía capaces de producir la energía necesaria para abastecer al mundo de manera sostenible. Las energías renovables se obtienen de fuentes inagotables y contribuyen a la conservación del medio ambiente.

Siguiendo la tendencia global, este trabajo surge de la necesidad actual de reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. La demanda de fuentes de energía limpias está aumentando como consecuencia de la nueva ola ecológica que se está presentando en nuestra sociedad. Por otro lado, el propósito de reducir los largos y frecuentes periodos de tiempo que los dispositivos de uso cotidiano deben estar conectados a la red eléctrica para su correcto funcionamiento, es otra de las razones que han motivado la elaboración de este trabajo.

Para lograr los propósitos mencionados anteriormente, se utilizará la termoelectricidad. Su fuente de energía será el calor humano y la transformación de energía térmica en energía eléctrica se realizará a través de un generador termoeléctrico. En la actualidad, la termoelectricidad comienza a introducirse en el mercado ya que sus aplicaciones son numerosas y variadas.

El objetivo principal es diseñar un termogenerador con el que accionar pequeños dispositivos portátiles gracias al calor humano. Además, se estudiará la influencia que tienen sobre el generador los parámetros de diseño. Por lo tanto, se intentará aprovechar la energía térmica producida por el cuerpo humano transformándola en energía eléctrica con el mayor rendimiento posible. Una vez hechos los análisis, se concluirá si el uso de esta tecnología es viable para accionar diferentes dispositivos.

El alcance de este trabajo aborda principalmente dos temas diferentes: la termodinámica y la tecnología de materiales. Las metas fijadas lograr los objetivos son:

- Revisión del estado del arte de esta tecnología y de las experiencias previas.
- Introducción de los fundamentos teóricos de la termoelectricidad.
- Desarrollo de un modelo térmico sencillo
- Análisis paramétricos variando los parámetros de diseño.
- Estudio de la viabilidad en diferentes aplicaciones.

2.1. Introducción a la termoelectricidad

La termoelectricidad se define como la parte de la física que estudia los fenómenos de producción de energía eléctrica por la acción del calor y viceversa. Tradicionalmente, el término efecto termoeléctrico o termoelectricidad abarca tres efectos identificados separadamente: el efecto Seebeck, el efecto Peltier y el efecto Thomson. ⁽¹⁾

En 1821, el científico alemán Thomas Johann Seebeck (1770 – 1831) descubrió que en un circuito formado por la unión de dos metales distintos, la aguja de una brújula se desviaba al colocar a distintas temperaturas las soldaduras entre ellos. Durante el experimento se dio cuenta de que el diferencial térmico inducía un campo magnético que generaba una corriente eléctrica. De esta manera, se planteó por primera vez la posibilidad de obtener electricidad a partir de un diferencial térmico, denominando a este efecto como efecto Seebeck. ^(2,3)

Trece años más tarde, el relojero y meteorólogo francés Jean Charles Athanase Peltier (1785 – 1845) descubrió la capacidad de generar calor mediante la aplicación de una corriente eléctrica en la unión de dos metales diferentes dando lugar al efecto Peltier. Este efecto es considerado el inverso del efecto Seebeck. ^(2,3)

Otros veinte años debieron pasar para que William Thompson (1824 - 1907), más conocido como Lord Kelvin, desarrollara explicaciones detalladas de los efectos Seebeck y Peltier, describiendo la interrelación termodinámica entre ambos. En este estudio, Thompson predijo además la existencia de un tercer efecto termoeléctrico, hoy conocido como efecto Thomson, en el cual se absorbe o se emite calor cuando una corriente recorre un material en el que existe un gradiente de temperaturas. ^(2,3)

Inicialmente, las aplicaciones del efecto termoeléctrico fueron muy limitadas debido a la falta de desarrollo. Para aplicaciones prácticas se necesitaban materiales con un alto coeficiente Seebeck, alta conductividad eléctrica y baja conductividad térmica. En el siglo XX, impulsado por nuevos avances, las aplicaciones se ampliaron a otros campos diferentes al militar y el espacial. Durante un tiempo se llegó a pensar que sustituiría incluso a los tradicionales sistemas de compresión de vapor. En la actualidad, la termoelectricidad comienza a introducirse en el mercado civil gracias a los progresos experimentados en la tecnología de materiales y en el diseño térmico. ⁽⁴⁾

Para poder entender en qué consiste y cómo se genera el efecto termoeléctrico, es necesario tener claros los conceptos de calor y transmisión de calor integrados en el Anexo 1.

2.2. Efecto Seebeck

El efecto Seebeck es la conversión directa de un diferencial de temperatura en electricidad. Thomas Seebeck descubrió que, en un circuito formado por dos metales distintos unidos en sus extremos, al calentar una de las uniones, se genera una corriente como consecuencia de la diferencia de temperatura entre los extremos. Esto se debe a que los metales responden de diferente manera a la diferencia de temperatura, creando una corriente de circuito, que produce un campo magnético. Seebeck no reconoció en ese momento una corriente eléctrica implicada, así que llamó a este fenómeno el efecto termomagnético, pensando que los dos metales quedaban magnéticamente polarizados por el gradiente de temperatura. Poco tiempo después, gracias a la ayuda del físico danés Hans Christian, se consiguió explicar por completo el efecto Seebeck tal y como lo conocemos hoy en día. Hans Christian jugó un papel vital en la explicación y concepción del término "termoelectricidad".^(2,5)

La figura 2.2. - 1. muestra un circuito formado por dos materiales conductores diferentes.

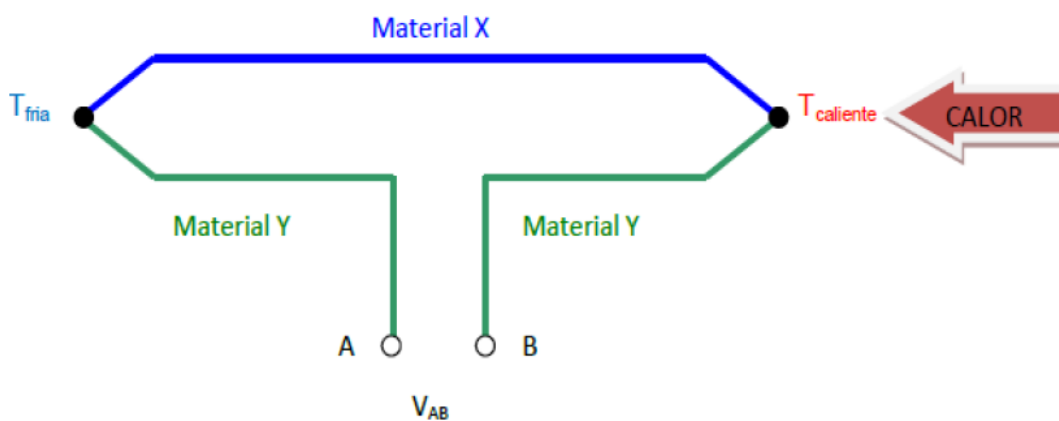


Figura 2.2 - 1. Circuito de termopares⁽⁵⁾

Al aplicar calor en la unión correspondiente al terminal B, se produce una diferencia de potencial entre los terminales A y B, que se denomina fuerza electromotriz de Seebeck. El sentido del flujo de la fuerza electromotriz va desde el terminal de mayor temperatura hacia el de menor temperatura. Esta tensión es proporcional al gradiente térmico impuesto según la siguiente ecuación:⁽²⁾

$$V_{ab} = \alpha \cdot (T_{caliente} - T_{fria})$$

Donde:

V_{ab} : diferencia de potencial entre los puntos A y B.

α : coeficiente Seebeck entre los dos materiales.

$T_{caliente}$: temperatura en la unión caliente.

$T_{fría}$: temperatura en la unión fría.

Los coeficientes Seebeck no son lineales en función de la temperatura y dependen de la temperatura absoluta, el material y la estructura molecular de los conductores. Este efecto es el principio de trabajo de los diodos térmicos y los generadores termoeléctricos, usados para producir potencia a partir de la diferencia de calor. El funcionamiento de estos dispositivos se debe a dos efectos: difusión de portador de carga y arrastre de fonones, tal y como se explica en el siguiente apartado.

En el Anexo 2 se amplía la información de este tema mediante la explicación del efecto Peltier, el efecto Thomson y el efecto Joule.

2.3. Generadores termoeléctricos

Los dispositivos termoeléctricos basan su funcionamiento en los efectos descritos anteriormente. De este modo, se pueden encontrar en el mercado células de efecto Peltier, que transforman energía eléctrica en un diferencial de temperatura para enfriar o calentar y células de efecto Seebeck, que transforman un diferencial de temperatura en energía eléctrica. En lo que a este trabajo concierne, se mostrará especial interés en los generadores termoeléctricos, es decir, en módulos basados en el efecto Seebeck.

Los módulos basados en el efecto Seebeck, también llamados generadores termoeléctricos o placas Seebeck tienen generalmente una construcción robusta y se caracterizan porque convierten un diferencial de temperatura en energía eléctrica de manera directa, sin necesidad de partes móviles.

En el Anexo 3 se explica el funcionamiento de los módulos Peltier. Estos dispositivos sirven para calentar o enfriar y basan su funcionamiento en el efecto termoeléctrico.

2.3.1. Funcionamiento

Los termopares están compuestos por dos materiales semiconductores unidos en sus extremos. Al aplicar un diferencial térmico entre los extremos, los electrones se mueven del extremo caliente al extremo frío, creando electrodos positivos y negativos, y con ello, voltaje eléctrico.⁽⁶⁾

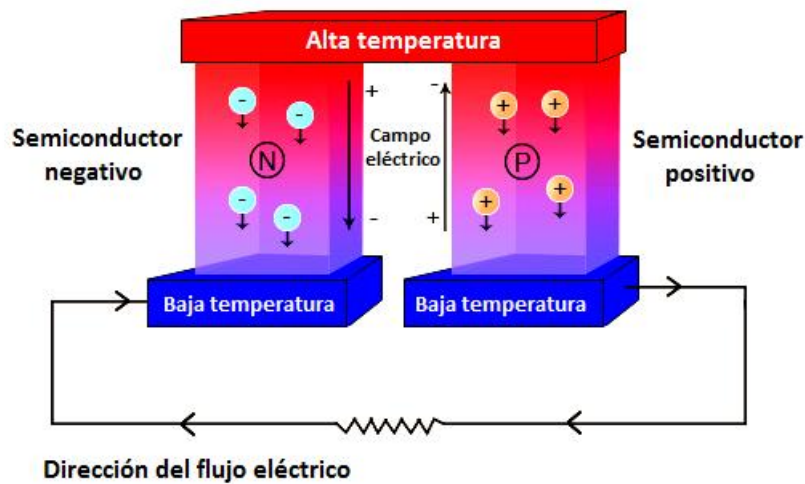


Figura 2.3.1. - 1. Esquema de funcionamiento de un termopar por efecto Seebeck ⁽⁷⁾

Los generadores termoeléctricos (TEG) están formados por un conjunto de transductores, situados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo, de tal forma que absorben el calor por una lado de la placa y lo desprenden por la otra. ⁽⁶⁾

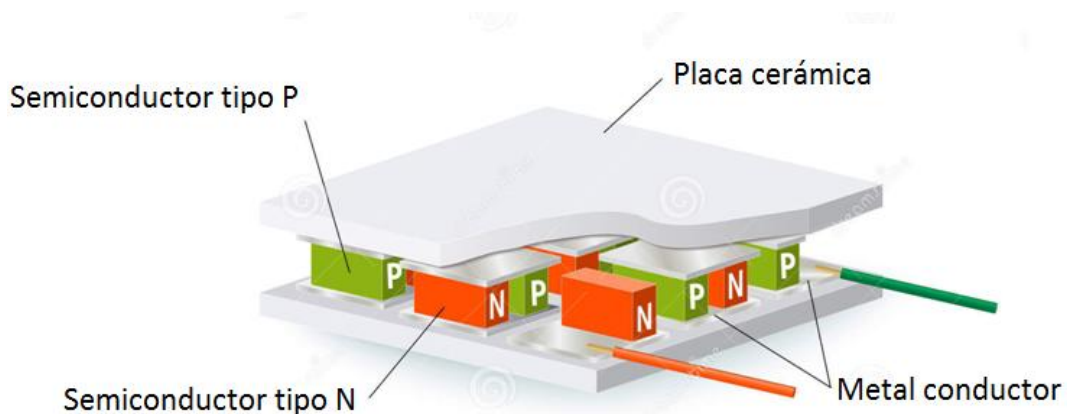


Figura 2.3.1. - 2. Partes de una célula termoeléctrica ⁽⁸⁾

Los materiales que constituyen los transductores son los semiconductores de tipo P y N de forma cúbica. El material semiconductor más utilizado en los TEGs es el telururo de Bismuto, dopado por exceso (tipo N) o dopado por defecto (tipo P). En la parte inferior y superior del módulo se sitúan dos placas cerámicas separadas por los cubos de material semiconductor. Estas placas de cerámica sirven como soporte mecánico de la estructura del dispositivo y como aislamiento eléctrico entre los elementos de la célula y la superficie de montaje externa. ⁽⁹⁾

La aplicación de calor provoca que los electrones se muevan a través del material semiconductor. El semiconductor de tipo N tendrá un exceso de electrones ya que está dopado, es decir, tiene más electrones de los que necesita para completar una perfecta estructura molecular, mientras que los de tipo P tienen una deficiencia de electrones. En un módulo termoeléctrico, si los electrones por exceso de un elemento tipo N (nivel alto de

energía) pasan al elemento tipo P (nivel bajo de energía) se desprenderá energía, ya que estarán pasando de un nivel energético superior a un nivel energético inferior. ⁽⁹⁾

El movimiento de los electrones es contrario al sentido de la corriente. Por lo tanto, cuando la corriente pasa de un elemento N a un elemento P, los electrones pasan del elemento P al N. De este modo, el sentido de la corriente eléctrica producida estará determinado por cuál sea la cara caliente y la cara fría. Es importante tener en cuenta la temperatura máxima que pueden soportar las células termoeléctricas ya que si se sobrepasa dicha temperatura, las células pueden romperse. ⁽⁹⁾

2.3.2. Tipos

Un buen material termoeléctrico es aquel que logra combinar de manera correcta las siguientes variables: coeficiente Seebeck, el cual debe de ser alto; conductividad eléctrica, la cual debe ser alta; y conductividad térmica, la cual ha de ser lo más baja posible. Teniendo en cuenta esto, los metales poseen solo un requerimiento positivo, ya que a pesar de tener una alta conductividad eléctrica, tienen alta conductividad térmica y bajo coeficiente Seebeck. Con los materiales cerámicos ocurre lo contrario, destacan por poseer alto coeficiente Seebeck, baja conductividad térmica y baja conductividad eléctrica. Por ello, los únicos materiales aptos para generar el efecto termoeléctrico son los semiconductores. Además, gracias a la posibilidad de doparlos, es posible obtener conductividades eléctricas mayores a las de los semiconductores convencionales. El balance entre las tres variables queda plasmado en las denominadas figuras de mérito, donde se representa en un diagrama la temperatura frente a el valor ZT del material. Este valor se calcula como $ZT = \frac{\alpha^2 \cdot T}{\rho \cdot \lambda}$, siendo α el coeficiente de Seebeck, T la media entre la temperatura fría y la caliente, ρ la resistividad eléctrica y λ la conductividad térmica del material. Cuanto mayor es el valor ZT, mayor es el rendimiento. ⁽¹⁰⁾

Después de haber optado por los semiconductores como tipo de material gracias a su óptima combinación de propiedades, la nueva variable a tener en cuenta para la selección del material exacto será el rango de temperaturas a las que se utilizará el módulo. Es de suma importancia conocer estos rangos ya que los materiales poseen diferentes comportamientos a diferentes temperaturas y no todos se comportan igual en un mismo rango. ⁽¹⁰⁾

Para analizar la nueva variable, es necesario hacer una clasificación según tres rangos de temperatura diferentes: temperaturas bajas, menores de 350 K; temperaturas medias, entre 350 K y 850 K; y temperaturas altas, entre 850 K y 1300 K.

Baja temperatura

El material más utilizado de los conocidos hasta el momento para bajas temperaturas es la aleación de telururo de bismuto (Bi_2Te_3). ⁽¹⁰⁾

El telururo de bismuto es un semiconductor que posee conductividad de tipo N y de tipo P. Debido a sus buenas propiedades termoeléctricas y a su alta figura de mérito, es un material

muy utilizado pero se ha de tener en cuenta que este buen comportamiento solo se presenta por debajo de los 350 K.

El Bi_2Te_3 es considerado el mejor termoeléctrico a temperatura ambiente, con un ZT alrededor de 1. Este material posee un elevado coeficiente Seebeck debido principalmente a su gran anisotropía. Mediante la aportación de materiales como el antimonio o el selenio se consigue reducir la conductividad térmica. ⁽¹⁰⁾

Los mejores resultados se han obtenido para compuestos de $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ y $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ en materiales tipo P y N respectivamente. ⁽¹⁰⁾

Temperatura media

Para el rango de temperatura desde 350 K hasta 850 K, el material más adecuado es el telururo de plomo, PbTe. ⁽¹¹⁾

Las aleaciones de telururo de plomo fueron los primeros materiales en ser investigados y comercializados para generadores termoeléctricos. Hasta hace poco tiempo se creía que la máxima ZT para un material basado en PbTe era aproximadamente 0.8. En la actualidad se sabe, gracias a los nuevos y más precisos métodos de medición, que la ZT de los materiales N y P de las aleaciones de PbTe es aproximadamente 1.4 para varias muestras en un rango de temperatura de 700 K a 850 K. ⁽¹¹⁾

En la actualidad se ha desarrollado en la Universidad Northwestern, con la colaboración de la universidad estatal de Michigan, un material basado en telururo de plomo con una figura de mérito de 2.3. ⁽¹¹⁾

Alta temperatura

La aleación de silicio y germanio es el material más utilizado para trabajar a altas temperaturas, entre 850 K y 1300 K. ⁽¹²⁾

Los altos puntos de fusión, grandes “gaps” de energía y su resistencia frente a la oxidación atmosférica, los sitúa como los mejores candidatos para materiales termoeléctricos de altas temperaturas. Sin embargo, debido a que la conductividad térmica en ambos materiales es muy alta, sus figuras de mérito son pequeñas. El silicio y el germanio son totalmente miscibles tanto en sus estados líquidos como en sus estados sólidos, sin embargo, existe una gran separación entre el liquidus y el solidus de ambos materiales. Por esta razón, los materiales termoeléctricos de SiGe se obtienen por el prensado en caliente de polvos de silicio y germanio. ⁽¹²⁾

Actualmente se están desarrollando nuevos materiales como el Skutterudite para altas temperaturas. En el Anexo 4 se recoge información relativa a este material.

2.4. Ventajas e inconvenientes

El uso de los dispositivos termoeléctricos no se ha extendido tanto como se pensaba hace algunos años. Esto es debido de que además de presentar ventajas, posee diversos inconvenientes.

Entre las ventajas más significativas, cabe destacar el reducido mantenimiento que se debe prestar a este tipo de dispositivos, porque al no disponer de partes móviles, los elementos que los componen apenas sufren desgaste. Otra de las ventajas más relevantes es que, haciendo uso de esta tecnología, estamos utilizando una energía sostenible, recuperando en muchos casos energía a partir de calores residuales, sin producir gases que dañen el medio ambiente. La versatilidad es otra de las características que definen a los generadores termoeléctricos. El hecho de no necesitar una fuente de energía para hacerlos funcionar, los dota de capacidad para ser utilizados en lugares donde no existen tomas de corriente.

A pesar de contar con las importantes ventajas explicadas en el párrafo anterior, el limitado éxito que han tenido estos dispositivos desde sus orígenes radica principalmente en el bajo rendimiento que producen. El rendimiento siempre se verá limitado de manera doble. Por un lado, nunca se podrá obtener un rendimiento superior al del ciclo de Carnot termodinámicamente reversible, definido por $\eta_{Carnot} = 1 - \left(\frac{T_{fría}}{T_{caliente}}\right)$. Por otro lado, al tratarse de un proceso termodinámicamente irreversible, la fracción del rendimiento máximo de Carnot que se alcanza con este ciclo, se cuantifica por el valor ZT del sistema. El rendimiento total del generador se calcula como:

$$\eta = \eta_{Carnot} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_{Fría}}{T_{Caliente}}}$$

Según la ecuación anterior, cuanto mayor es el valor ZT, mayor será el rendimiento del generador. Por ello, las investigaciones en termoelectricidad se han centrado principalmente en descubrir nuevos materiales con valores altos de ZT. Los materiales más recientes están compuestos por cristales de monoseleniuro de estaño ($SnSe$), con los que se han obteniendo valores de ZT superiores a 2,6 trabajando a temperatura de 600 °C.

De la misma manera que suele pasar con cualquier producto tecnológico, los dispositivos que incorporan las tecnologías más modernas, tienen un elevado coste. Bien es cierto que en los últimos años, al producirse nuevos avances en los materiales, cada vez resulta más económico utilizar estos dispositivos. Otra desventaja importante es la intermitencia que pueden ocasionar durante su funcionamiento. Un claro ejemplo es el caso de aplicaciones en las que se genere electricidad a partir de una temperatura variable, como ocurre con la temperatura ambiente. Según el lugar o la época del año en la que nos encontremos, el rendimiento del dispositivo puede variar en gran medida.

3. APLICACIONES PARA PRODUCIR ELECTRICIDAD

A pesar de haber sido descubiertos hace más de 150 años, no fue hasta finales del siglo XX cuando se empezaron a desarrollar y analizar en profundidad los materiales termoeléctricos. Por ello, en los últimos años se han ido implementando nuevas aplicaciones. Además, los voltajes con los que se trabaja hoy en día, son más bajos gracias a la revolución experimentada en el área de la electrónica, pasando de cientos de voltios, a voltios y milivoltios en objetos de uso común. Por último, pero no menos importante, hay de mencionar la creciente demanda energética en el mundo, que nos obliga a utilizar el más mínimo recurso con el fin de suplir esta nueva necesidad. En este ámbito, es destacable el auge de tecnologías respetuosas con el medio ambiente.

Teniendo en cuenta las tres causas mencionadas anteriormente, las aplicaciones que se pueden encontrar actualmente son numerosas. Estas aplicaciones pueden tener dos objetivos principales, la producción de un diferencial térmico y la producción de electricidad.

En este apartado explicaré algunas de las aplicaciones más importantes para la producción de electricidad, analizando también las que utilizan el diferencial de temperatura existente entre el cuerpo humano y el ambiente. Algunas de las aplicaciones más extendidas para calefacción y refrigeración se recogen en el Anexo 5.

Hoy en día, una gran parte de la electricidad que se genera, proviene de centrales basadas en un ciclo termodinámico con una eficiencia que varía entre el 35% y el 45%. Cuando se habla de automóviles, menos de un 30% del poder calorífico del combustible se transforma en energía útil para mover el vehículo. En la mayoría de conversiones de energía, una gran parte de ella se disipa en forma de calor. Los módulos termoeléctricos nos ofrecen la posibilidad de recuperar parte de esa energía para transformarla en electricidad. ⁽¹³⁾

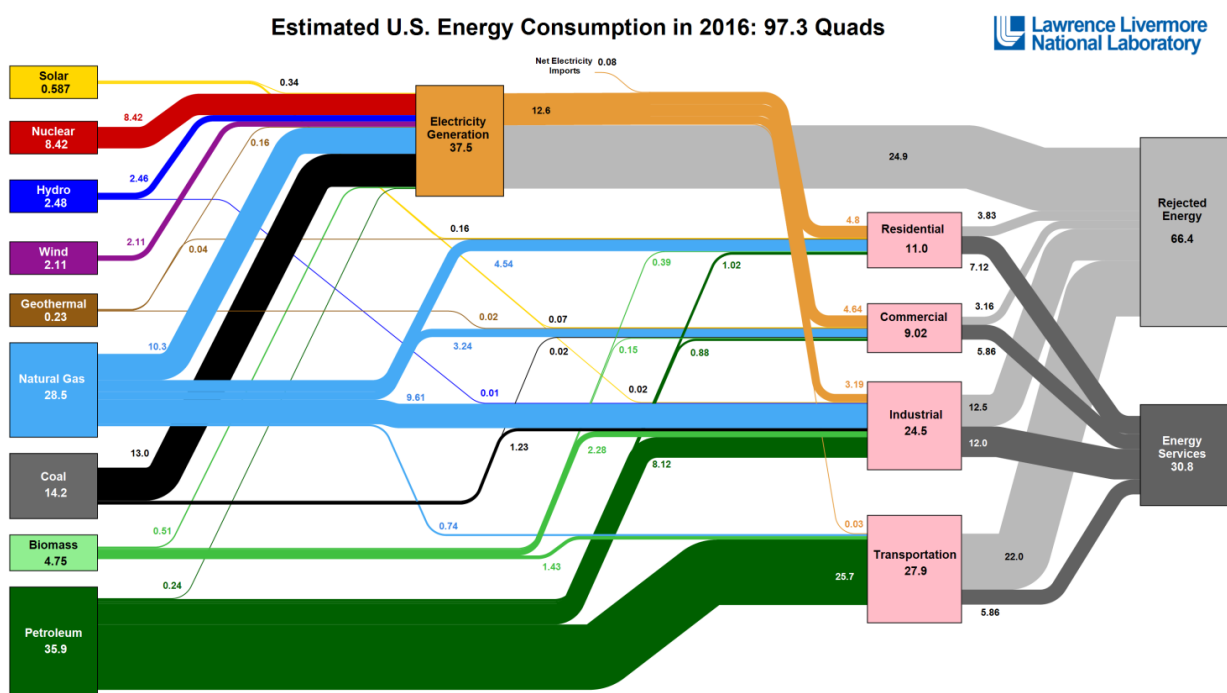


Figura 3. - 1. Diagrama de producción de energía en EE.UU. en el año 2016 ⁽¹³⁾

En la figura anterior se muestra un diagrama de Sankey en el que se recoge el flujo de energías relacionadas con la producción de energía en Estados Unidos durante el año 2016. Se puede observar que más del 65% de la energía primaria se contabiliza en las pérdidas que se generan a lo largo de todo el proceso. Gran parte de esas pérdidas se deben a la disipación de calor. Los materiales termoeléctricos son capaces de aprovechar esas pérdidas para producir electricidad. Sin embargo, la eficiencia de este tipo de materiales es muy limitada, por lo que la termoelectricidad es un campo donde aún deben desarrollarse importantes avances. ⁽¹³⁾

Las aplicaciones de este tipo de generación eléctrica están dirigidas a obtener energía partiendo de calor residual, como es el caso de tubos de escape en los coches, chimeneas de plantas incineradoras o circuitos de refrigeración de diversas centrales eléctricas. Otras aplicaciones de los módulos termoeléctricos podemos encontrarlas en la aviación, aprovechando el gradiente que se crea entre el exterior y la cabina de pasajeros. Este aprovechamiento del calor residual supone una mejora en el rendimiento energético de estos procesos, partiendo de una tecnología limpia. Para poder calificar a esta tecnología como limpia, los materiales utilizados deben presentar un gran potencial de reciclabilidad y no deben contener elementos tóxicos o nocivos para las personas y para el medio ambiente.

3.1. Calor residual en gases de escape

Los motores de combustión equipados en centrales térmicas, vehículos y máquinas, utilizan la energía presente en el combustible para obtener energía cinética o eléctrica. Durante el proceso, gran parte de la energía que se encontraba almacenada en el combustible, no puede ser aprovechada y se pierde en forma de calor expulsado al ambiente. Para aumentar el rendimiento de este tipo de motores, se podría utilizar la termoelectricidad, aunque al tratarse de pequeños diferenciales de temperatura, el aprovechamiento es pequeño. ^(14,15)

Para hacer funcionar este sistema, se debe colocar una o varias células termoeléctricas en el conducto de expulsión de los gases de escape generados tras la combustión. La cara caliente estará en contacto directo con el conducto de gases de escape, mientras que la cara fría se encontrará en contacto con el conducto de líquido refrigerante.

Mediante este sistema, se consigue aprovechar parte de la energía disipada en forma de calor, mejorando el ahorro de combustible entre un 3% y un 5%. En el caso de los vehículos, la energía producida por este método se almacena en la batería, pudiendo incluso llegar a suprimir el alternador. ^(14,15)

Actualmente, el rendimiento de estos dispositivos sigue siendo todavía bajo a la vez que su coste es elevado, por lo que no existen vehículos comerciales que los incorporen.

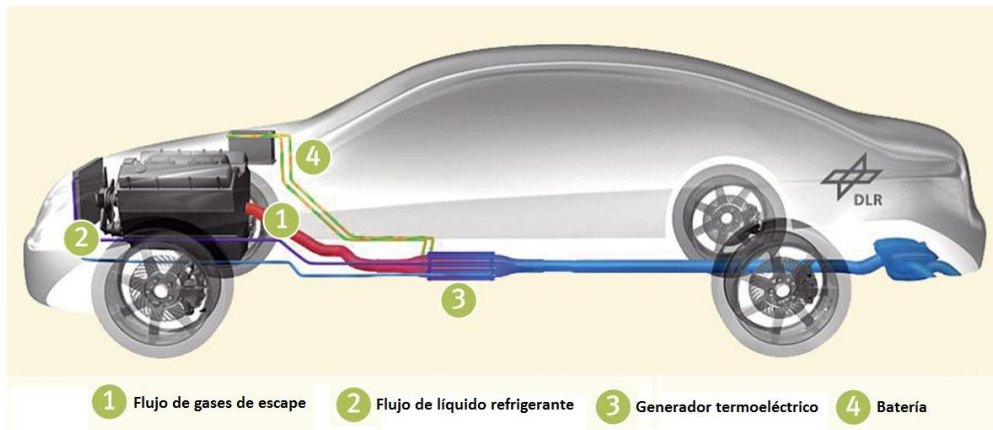


Figura 3.1 - 1. TEG en automóvil ⁽¹⁶⁾

3.2. Termopares

Un sensor térmico o termopar es un dispositivo capaz de medir la temperatura del lugar donde se encuentra. Los termopares producen una corriente eléctrica proporcional a la diferencia de temperaturas entre sus dos caras. ⁽²⁾

Su uso está muy extendido ya que permite generar la electricidad necesaria para poner en funcionamiento el sensor sin estar conectado a la corriente. De este modo, pueden ser utilizados en casi cualquier situación y lugar. Como la energía requerida para hacerlos funcionar es muy pequeña, la diferencia de temperatura que se debe producir entre sus caras ha de ser mínima. Además, son económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Su principal limitación es la exactitud, pues es fácil obtener errores del sistema, sobre todo en bajas temperaturas. ⁽²⁾

3.3. Producción de electricidad a través del cuerpo humano

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es diseñar y estudiar la viabilidad de aplicaciones en las que la producción de energía se genere a través del diferencial térmico existente entre el cuerpo humano y el aire ambiente.

A la hora de plantear este tipo de aplicaciones, es necesario tener en cuenta las dificultades añadidas que este tipo de sistema puede plantear. Es conveniente que el material elegido sea flexible, cómodo al llevar, resistente y ligero. Además, la energía que podamos producir va a ser mínima debido a que la diferencia de temperatura entre el ambiente y el cuerpo humano va a ser muy pequeña. El rendimiento se verá reducido en verano ya que el cuerpo humano y el ambiente tendrán temperaturas cercanas. Por otro lado, el tamaño que pueda tener nuestra célula termoeléctrica estará limitado por la zona del cuerpo en la que la queramos colocar.

3.3.1. Reloj analógico

La historia del reloj analógico de pulsera se remonta a principios del siglo XIX. Durante ese siglo, se creó un reloj, que alimentado por una pequeña pila, conseguía marcar la hora haciendo girar sus agujas. Un siglo después, se inventó el reloj automático, un dispositivo capaz de marcar la hora alimentado por el movimiento que recibía.

En 1998, la empresa de relojes *Seiko* comercializó 500 unidades de su modelo *Seiko Thermic*. Este modelo fue una edición limitada y su precio era 582.400 pesetas de la época.

Este reloj no era alimentado ni por una pila ni por el movimiento, sino por la diferencia de temperatura entre el cuerpo humano y el ambiente. Debido a su elevado precio, la novedosa idea no tuvo demasiado éxito.

3.3.2. Reloj inteligente

En los últimos años, han aparecido los denominados Smartwatch, del inglés, reloj inteligente. Estos dispositivos tienen utilidades muy variadas, desde hacer un seguimiento de la actividad física, como contar los kilómetros recorridos, medir la velocidad y contar las calorías quemadas, hasta hablar por teléfono o enviar mensajes.

El mayor inconveniente que presentan estos aparatos es la necesidad de ser cargados prácticamente a diario. Para solucionar este problema, se está desarrollando un reloj inteligente que pueda ser cargado mediante el efecto termoeléctrico, de la misma manera que ocurrió con el *Seiko Thermic*.

En estos momentos, hay diferentes empresas interesadas en estos dispositivos. La energía que consumen los relojes inteligentes no se puede comparar con la de los relojes analógicos, por lo que de momento las funciones serían muy limitadas. La empresa *Matrix industries* está desarrollando un prototipo que espera comercializar en octubre de 2017.⁽¹⁷⁾



Figura 3.3.2 - 1. Smartwatch termoeléctrico⁽¹⁷⁾

3.3.3. Botas para cargar la batería del teléfono móvil

En el año 2010 la empresa telefónica *Orange* desarrolló unas botas con las que se podía cargar el móvil a través del efecto termoeléctrico. De nuevo, la diferencia de temperatura entre el cuerpo humano y el ambiente era la encargada de producir la energía necesaria.

Su diseño permitía hacer uso del teléfono durante una hora tras haber llevado las botas puestas durante doce horas. Su utilidad era muy limitada debido a la baja eficiencia. Por ello, las botas no tuvieron gran aceptación y la empresa decidió no comercializarlas.



Figura 3.3.3. - 1. Botas termoeléctricas ⁽¹⁸⁾

3.3.4. Marcapasos

Uno de los problemas principales a la hora de instalar un marcapasos, es la necesidad de realizar una operación añadida cuando la pila está próxima a agotarse. Instalando un sistema termoeléctrico en estos dispositivos, es posible eliminar ese problema.

Diversos estudios existentes acerca de esta aplicación termoeléctrica, analizan cómo es su funcionamiento. La cara fría del módulo termoeléctrico se encuentra en contacto con la parte interna de la piel, mientras que la cara caliente está en contacto con el corazón. Aunque la diferencia de temperatura es de tan solo un grado, se puede conseguir cargar la pila a un ritmo superior al de descarga. Además, al no tener partes móviles, la probabilidad de fallo es muy pequeña. ⁽¹⁹⁾

4. REVISIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

En el presente capítulo se pretende, a partir de artículos científicos, analizar los modelos de cálculo y los resultados experimentales obtenidos en diferentes estudios aplicados a generadores termoelectricos en el cuerpo humano.

Desde la revolución industrial, la utilización de gas natural, carbón y baterías químicas ha crecido de manera exponencial, multiplicando las emisiones de gases de efecto invernadero y degradando el medio ambiente. Como solución a estos problemas, se están implantando fuentes de energía renovables como la solar, eólica, hidráulica, maremotriz, etc. En los últimos años, ha aparecido una nueva fuente que basa su funcionamiento en la producción de energía a partir de calor residual. ⁽²⁰⁾

El cuerpo humano es una gran fuente de energía térmica y es responsable de la generación continua de calor a través de funciones metabólicas, liberando entre 100 W y 525 W. Utilizando la técnicas adecuadas, una parte de esa energía térmica puede transformarse en energía eléctrica ⁽²⁰⁾. La temperatura de la piel no es constante sino que varía para cada parte del cuerpo en función la temperatura exterior. En la siguiente figura se muestra la distribución de temperaturas en el cuerpo humano y de manera detallada en una mano:

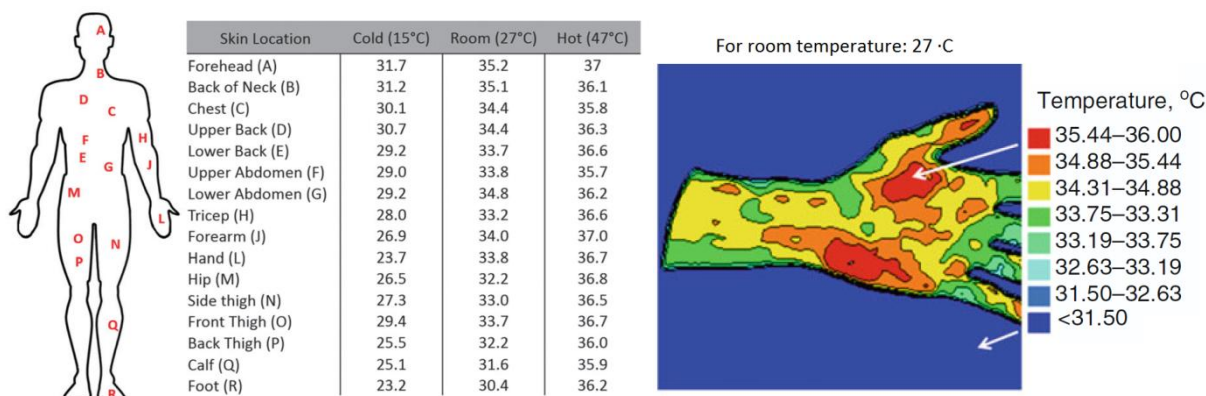


Figura 4. - 1. Distribución de temperaturas en el cuerpo humano y la mano ^(21,22)

Además, en las últimas dos décadas, los desarrollos tecnológicos y la miniaturización de los dispositivos electrónicos han hecho que las demandas de potencia se sitúen en el rango mW a μ W para redes de sensores inalámbricos ⁽²⁰⁾. En la siguiente tabla se muestra el rango de potencia producido según el tamaño del generador.

TEG type	Order of magnitude of power generated	Uses
Large TEGs	> W	Bulk usages for industrial purposes
Small TEGs	\approx mW	GPS, tracking devices, biosensors
Micro TEGs	< mW to μ W	Microelectromechanical (MEMS) devices
Thin Film TEGs	\approx μ W	Combines flexible substrate with micro scale generation

Figura 4. - 2. Rango de potencia en función del tamaño del TEG ⁽²⁰⁾

Los equipos eléctricos de alta tecnología como los relojes inteligentes, las pulseras de actividad (GPS con sistema de monitorización de la salud) o las gafas Google son aplicaciones que empiezan a estar al alcance de los generadores termoeléctricos (TEG) portátiles debido a su bajo consumo de energía. En un futuro próximo, las aplicaciones de monitoreo, vigilancia y rastreo de la salud se expandirán muy rápidamente y utilizarán TEG para alimentar sus múltiples sensores y redes inalámbricas ⁽²⁰⁾. En la siguiente tabla se muestra la energía que consumen diferentes aparatos electrónicos.

Electronic devices	Average power demand (operating time)
Android Mobile Phone (Talking/standby mode)	1 W (5 h)/35 mW
Remote controller (TV/music player/air condition)	100 mW
Music player (MP3)	50 mW (15 h)
FM radio (portable)	30 mW
Hearing aid	1 mW (5 days)
Wrist watch (Quartz/digital)	5 μ W (5 years)
Pacemaker (Heart)	50 μ W (7 years)
Neurological stimulator	Several mW–30 μ W
RFID tracker	< 1.5 mW
Wrist GPS	1.5–10 mW
Wireless sensors nodes	100 μ W

Figura 4. - 3. Consumo de diferentes aparatos electrónicos ⁽²⁰⁾

Un avance importante para la recolección de calor corporal ha sido el desarrollo de generadores termoeléctricos flexibles (FTEG) para usos portátiles. Mediante el uso de un FTEG, es posible mejorar el contacto entre el TEG y la piel, resultando una menor resistencia de la interfaz térmica y aumentando el diferencial de temperatura a través del TEG. ⁽²¹⁾

El telururo de bismuto (Bi_2Te_3) y telururo de antimonio (Sb_2Te_3) son los materiales termoeléctricos más usados debido a su alta eficiencia a temperatura ambiente. Además, con estos materiales es posible crear módulos flexibles. ⁽²⁰⁾

Desde 2001 se han realizado investigaciones sobre las formas de flexibilizar los TEG. Los TEG flexibles tienen muchas ventajas sobre los TEG de tipo rígido. Por ejemplo, tienen un peso ligero, un perfil muy delgado y se adaptan fácilmente a cualquier superficie, aumentando su área de trabajo. ⁽²⁰⁾

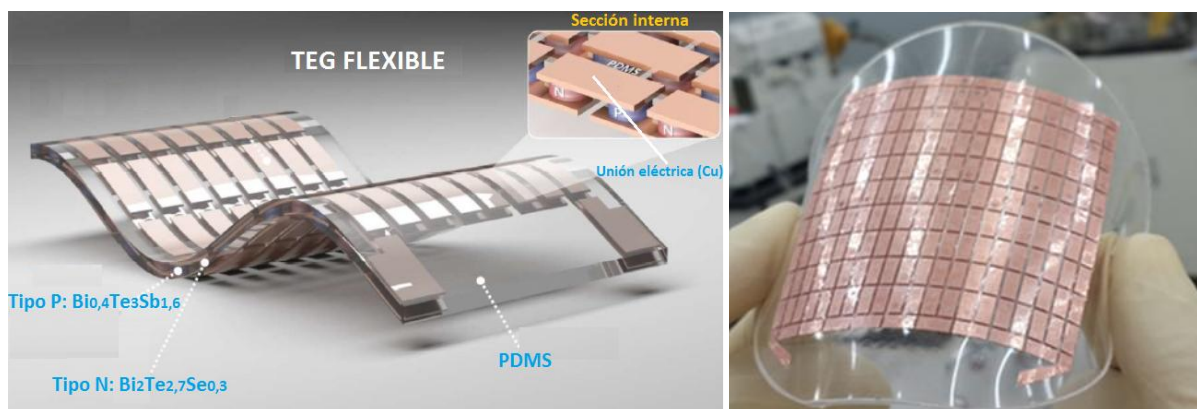


Figura 4. - 4. Generador termoeléctrico flexible

En los últimos años, se han explorado diferentes técnicas de fabricación para aumentar la flexibilidad y la eficiencia de estos materiales. Entre las técnicas más destacadas se encuentran: procedimiento de despegue (lift-off process), método de evaporación instantánea (flash evaporation method), fotolitografía y técnica de grabado (photolithography and etching technique), métodos de impresión por serigrafía y dispensador (printing and dispenser methods), evaporación térmica (thermal evaporation) y nano-materiales (nano-materials).⁽²⁰⁾ La mayoría de los métodos de fabricación son complejos y costosos. Por ello, los generadores termoeléctricos flexibles todavía no están disponibles en el mercado.⁽²³⁾

El coste del telururo de bismuto es mucho mayor que otros materiales termoeléctricos. Por ejemplo, el coste del $Mg_2Si_{0,6}Sn_{0,4}$ es de 4.04 \$ por Kg, mientras que el de $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ es de 125 \$ por Kg.⁽²⁰⁾

Los valores de coeficiente Seebeck y resistividad eléctrica de una aleación de Bi_2Te_3 se recogen en la siguiente tabla:

<i>n</i> -type: Bi_2Te_3	<i>p</i> -type: Sb_2Te_3
$\alpha_n = -195 \times 10^{-6} \text{ V K}^{-1}$	$\alpha_p = 230 \times 10^{-6} \text{ V K}^{-1}$
$\rho_n = 1.35 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \text{ cm}$	$\rho_p = 1.75 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \text{ cm}$

Figura 4. - 5. Tabla de propiedades de Bi_2Te_3 ⁽²⁰⁾

Una mejora de las propiedades termoeléctricas de estos materiales supone un aumento de la figura de mérito. A temperaturas cercanas a 300 °C el valor ZT puede alcanzar el valor de 3, mientras que para temperatura ambiente varía de 0,4 a 1,1. Un valor típico de ZT a temperatura ambiente es 0,8 en materiales como el Bi_2Te_3 para tipo-n y el Sb_2Te_3 para tipo-p.⁽²⁰⁾

Los estudios experimentales son muy utilizados en laboratorios y universidades para comprobar cuál es el alcance de los TEG en el cuerpo humano. Algunos de esos estudios han presentado los siguientes resultados:

Leonov et al. diseñó un generador termoeléctrico de 128 termopares. El material utilizado para las placas superficiales del prototipo fue el tipo de aluminio 6063-T4. Para temperaturas exteriores entre 20 °C y 32 °C, su prototipo generó entre 7 y 30 $\mu W/cm^2$ de potencia. Los autores discutieron el concepto general consiguiéndolo optimizar.⁽²⁰⁾

Funahashi et al. diseñó un generador a partir de tecnología multicapa. Con una diferencia de temperatura de 10 °C, el prototipo produjo 100 μW , energía suficiente para alimentar un transmisor de radio.⁽²⁰⁾

Jo et al. fabricó un prototipo FTEG mediante 8 parejas tipo n-p de Bi_2Te_3 en polidimetilsiloxano (PDMS) con un área de 50 mm · 50 mm de dispositivo. La potencia de salida de su prototipo fue 2,1 μW con un diferencial de temperatura de 19 °C.⁽²⁰⁾

Madan et al. utilizando tecnología similar desarrolló un FTEG con una película delgada compuesta de epoxy integrando 60 pares consiguiendo una potencia de salida de $20,5 \mu W$ para un diferencial de temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.⁽²³⁾

Mediante el uso de un TEG instalado en el cuerpo humano, Hyland et al. [artículo 9], consiguió salida máxima de $6 \mu W/cm^2$ sin movimiento y $20 \mu W/cm^2$ andando a velocidad normal⁽²¹⁾. Los resultados se presentan en la siguiente figura:

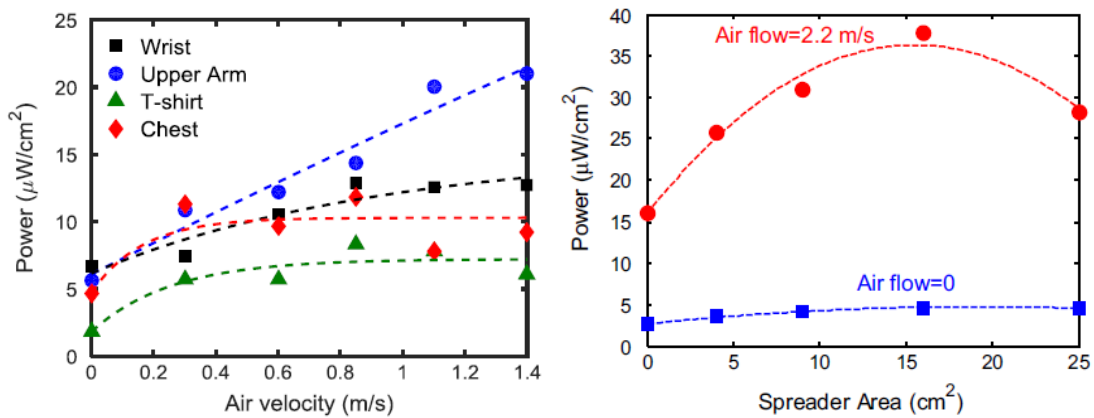


Figura 4. - 6. Potencia en función de la velocidad del aire y en función del área⁽²¹⁾

En este estudio se hizo otro experimento con un TEG cubierto por PDMS para hacer que el dispositivo se acoplara fácilmente a la muñeca. Los ensayos se realizaron a una temperatura ambiente de $17,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Mediante la potencia de la carga, se seleccionó la intensidad óptima de uso y se seleccionó la resistencia de la carga adecuada⁽²¹⁾. Variando la velocidad se obtuvieron los siguientes resultados:

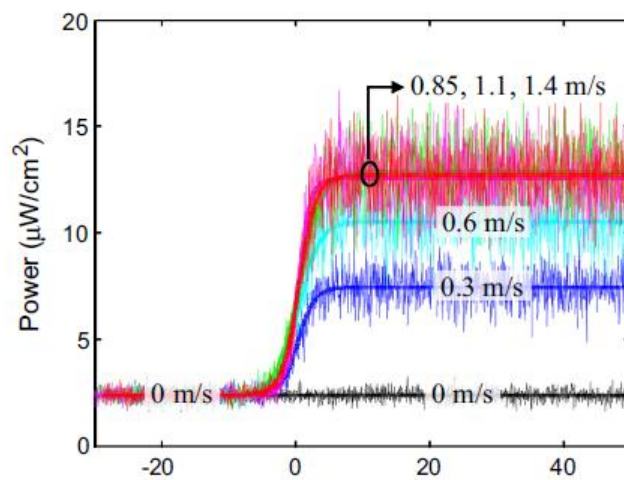


Figura 4. - 7. Potencia en función de la velocidad del aire⁽²¹⁾

Los cálculos de potencia, mostrados en la figura, indican que la potencia máxima se obtiene para una velocidad del TEG más rápida. Sin embargo, la potencia se saturó a la velocidad de $0,85 \text{ m/s}$. Teniendo en cuenta que la velocidad media caminando es de $1,2 \text{ m/s}$, se pudo

estimar que la potencia media caminando sería de aproximadamente $13 \mu W/cm^2$ con este diseño específico. ⁽²¹⁾

En el estudio anterior se demuestra que, una de las condiciones que modifican la potencia de salida, es la velocidad a la que se mueve el TEG. Al aumentar la velocidad del movimiento, se mejorará la potencia ya que se pasa de convección natural a convección forzada aumentando así el coeficiente de convección. Además, si se instalan aletas, la potencia se incrementará considerablemente al disminuir la resistencia de convección del aire. En la figura de la izquierda se muestra un TEG con aletas y en la de la derecha se muestra el perfil de temperaturas de un TEG para dos temperaturas ambiente diferentes.

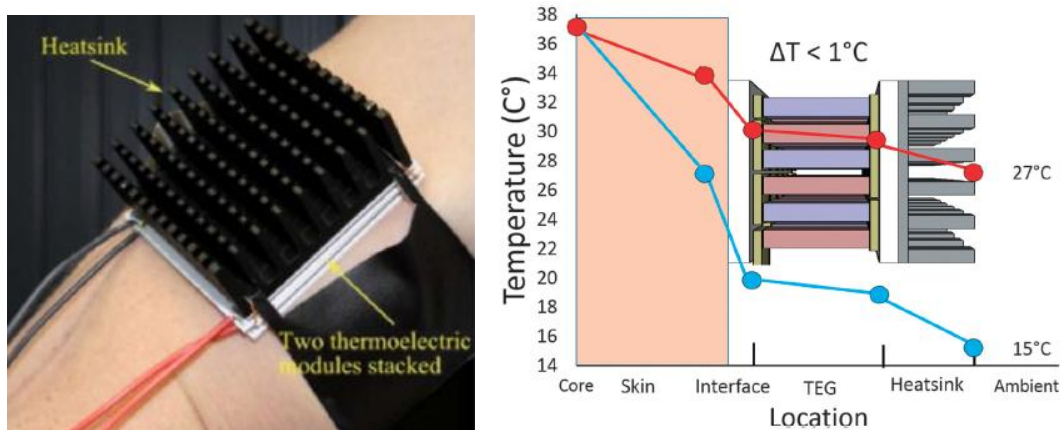


Figura 4. - 8. TEG con aletas y perfil de temperaturas ^(20,24)

Por último, es necesario incluir en esta revisión otro estudio de Leonov en el que coloca diversos generadores termoeléctricos flexibles sobre la superficie de una camisa. Con esta camisa el área del TEG fue aumentada en gran medida, consiguiendo potencias de $0,8 mW$ en reposo y $2,5 mW$ caminando en un lugar cerrado ⁽²²⁾. En la siguiente figura se muestra cómo era el diseño:

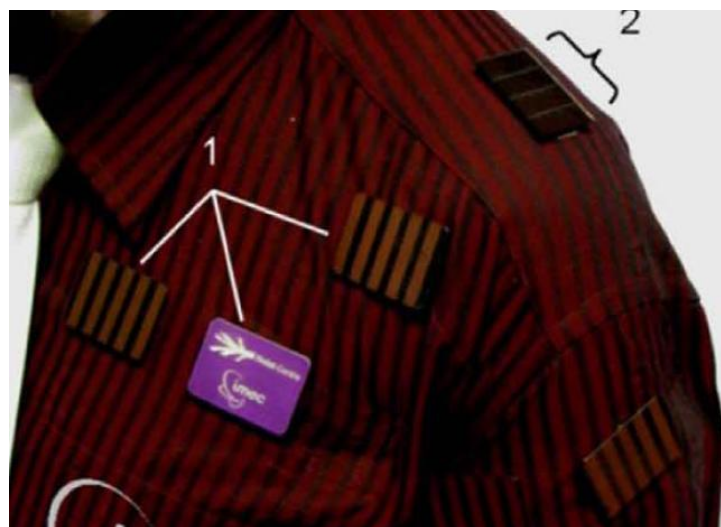


Figura 4. - 9. Camisa envuelta por generadores termoeléctricos ⁽²²⁾

Las conclusiones que se extraen de la revisión bibliográfica son claras. Desde 2001 se han hecho gran cantidad de investigaciones para mejorar las propiedades de los materiales termoeléctricos sobre el cuerpo humano. Los materiales más eficientes son conocidos y se pueden mejorar en función de los metales de aporte que posean y de las técnicas de fabricación que se utilicen. La gran ventaja de estos materiales, además de su buena eficiencia, es la posibilidad de flexibilizarlos para que se adapten a la superficie del cuerpo. Su principal problema es que los procesos de fabricación son complejos y costosos, por lo que aún no se encuentran en el mercado. Acudiendo a catálogos comerciales, se puede observar que los generadores disponibles en el mercado no contemplan la posibilidad de ser utilizados a temperaturas tan bajas. Los resultados obtenidos en los diferentes experimentos varían en función de los materiales utilizados y en función de las condiciones de cada uno. Lo que sí está claro, es el rango de magnitud en el que se mueven todos los resultados, obteniendo en todos los casos potencias de μW . Siempre y cuando la preocupación ambiental continúe, aumente el uso de las energías renovables y se reduzcan los consumos de los dispositivos, las investigaciones de los materiales termoeléctricos seguirán progresando hasta que el uso de los generadores termoeléctricos esté presente en el día a día de la sociedad.

5. DISEÑO Y MODELADO DE UN TEG ACCIONADO POR EL CALOR HUMANO

En el presente capítulo se va a modelar un generador termoeléctrico accionado por el diferencial térmico existente entre el cuerpo humano y el ambiente. El procedimiento de diseño será el siguiente:

1. Elección de los materiales termoeléctricos.
2. Diseño y simulación térmica del sistema de producción de energía.
3. Obtención de resultados.
4. Análisis paramétricos de los resultados modificando las variables.
5. Viabilidad en diferentes aplicaciones.

5.1. Elección de los materiales termoeléctricos

Tras analizar los artículos científicos en los que se investigan y ensayan materiales termoeléctricos para bajas temperaturas, las conclusiones son claras: el material más adecuado para aprovechar el calor corporal es Bi_2Te_3 . Un valor de ZT aproximado se situaría en torno a 0,8.

Para diseñar el modelo de este trabajo, se utilizarán los materiales con los que se han obtenido los mejores resultados hasta hoy. Los semiconductores elegidos son $Bi_2Te_{2,7}Se_{0,3}$ para el tipo N y $Bi_{0,4}Te_3Sb_{1,6}$ para el tipo P, mientras que el recubrimiento aislante será de polidimetilsiloxano (PDMS) en vez de placas cerámicas. El uso de PDMS como recubrimiento no es habitual a la hora de fabricar un TEG pero en nuestro caso va a ser de vital importancia utilizar un material flexible que se adapte al contorno del cuerpo

Las características de los materiales semiconductores elegidos a temperatura ambiente son las siguientes:

	Tipo N: $Bi_2Te_{2,7}Se_{0,3}$	Tipo P: $Bi_{0,4}Te_3Sb_{1,6}$
Coeficiente Seebeck: α [$\frac{V}{K}$]	$195 \cdot 10^{-6}$	$230 \cdot 10^{-6}$
Resistividad eléctrica: ρ [$\Omega \cdot m$]	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$
Conductividad térmica: λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]	1,07	1,28

Tabla 5.1 - 1. Tabla de propiedades de los materiales semiconductores utilizados

5.2. Diseño y simulación térmica del sistema de producción de energía

Para comenzar con este apartado, es necesario explicar cómo es y cómo funciona el circuito eléctrico que compondrá el generador. Su esquema es el siguiente:

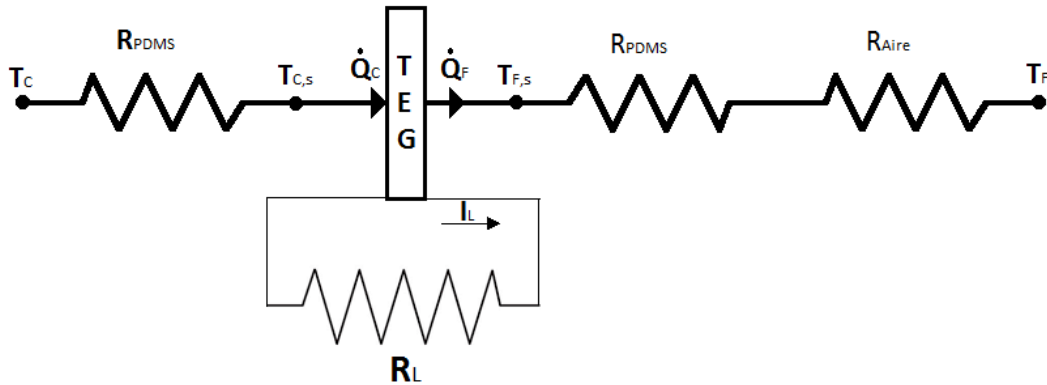


Figura 5.2 - 1. Circuito eléctrico del generador termoeléctrico

Donde:

T_C : temperatura caliente. Esta temperatura será igual a la temperatura de de la piel.

R_{PDMS} : resistencia térmica de conducción del polidimetilsiloxano que recubre el generador termoeléctrico.

$T_{C,S}$: temperatura caliente de la superficie del TEG. Esta temperatura será igual a la temperatura de la piel menos el salto térmico producido en la resistencia del PDMS y se produce en la parte interior del PDMS en contacto con la piel.

\dot{Q}_C : flujo térmico caliente. Es la cantidad de energía que absorbe el generador y depende de T_C , R_{PDMS} y $T_{C,S}$. En este flujo se incluyen las pérdidas de Joule.

TEG : dispositivo termoeléctrico compuesto por los materiales semiconductores.

\dot{Q}_F : flujo térmico frío. Es el calor que disipa el generador y depende de T_F , R_{PDMS} y $T_{F,S}$. En este flujo se incluyen las pérdidas de Joule.

$T_{F,S}$: temperatura fría de la superficie del TEG. Esta temperatura será igual a la temperatura de la fría más el salto térmico producido en la resistencia del aire y la del PDMS y se produce en la parte interior del PDMS en contacto con el aire.

R_{PDMS} : resistencia térmica de conducción del polidimetilsiloxano que recubre el generador termoeléctrico.

R_{Aire} : resistencia térmica de convección del aire.

T_F : temperatura fría. Esta temperatura será igual a la temperatura ambiente.

R_L : resistencia eléctrica del dispositivo al que estemos transmitiendo la energía eléctrica.

I_L : intensidad de la corriente que llegue al dispositivo al que estemos transmitiendo la energía eléctrica.

De manera resumida, el circuito funciona de la siguiente manera: por un lado, el PDMS inferior del generador está en contacto con la piel a su misma temperatura, T_c . Ese calor es transmitido a través del PDMS hasta el interior del generador por conducción. Cuando el flujo de calor entra en contacto con los materiales semiconductores, se encuentra a la temperatura $T_{C,s}$, igual a la caliente menos la caída de temperatura debido a la resistencia de convección. En el otro lado ocurre algo similar, el PDMS superior del generador está en contacto con el aire del ambiente a su misma temperatura, T_f . La temperatura va descendiendo desde la temperatura fría de la superficie del TEG ($T_{F,s}$) hasta la temperatura ambiente por la resistencia de conducción del PDMS y a la resistencia de convección del aire. Es importante que las temperaturas $T_{C,s}$ y $T_{F,s}$ sean lo más dispares posibles para que el intercambio térmico en el generador sea mayor.

Una vez escogido el material y planteado el circuito eléctrico, es el momento de proceder a los cálculos y para ello, es necesario definir la geometría de nuestro diseño. El diseño que plantearé a continuación tendrá geometría cuadrada, con un área (A) igual a 9 cm^2 . El espesor del PDMS (e) serán 3 milímetros y el espesor del material semiconductor (l) serán 5 milímetros.

El objetivo principal del diseño es obtener la potencia del generador. La potencia se puede calcular de dos maneras. Por un lado, se puede calcular como el flujo caliente multiplicado por el rendimiento del generador (determinado por el rendimiento de Carnot y por la figura de mérito). Por otro lado, la potencia es igual al flujo de calor total. Las dos equivalencias conducen al mismo resultado, por lo que en este caso utilizaré la segunda:

$$P = \dot{Q} \quad [1]$$

A partir del dibujo del circuito eléctrico se obtiene la ecuación del flujo de calor total:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{caliente} - \dot{Q}_{frío} \quad [2]$$

Para calcular el flujo caliente y el flujo frío debemos acudir a la ecuación que define el efecto Seebeck (capítulo 2):

$$\dot{Q}_c = \alpha \cdot I_L \cdot T_{C,s} + \kappa \cdot (T_{C,s} - T_{F,s}) - 0,5 \cdot I_L^2 \cdot R_{int} \quad [3]$$

$$\dot{Q}_f = \underbrace{\alpha \cdot I_L \cdot T_{F,s}}_{\text{Efecto Seebeck}} + \underbrace{\kappa \cdot (T_{C,s} - T_{F,s})}_{\text{Conducción térmica}} + \underbrace{0,5 \cdot I_L^2 \cdot R_{int}}_{\text{Efecto Joule}} \quad [4]$$

Donde:

$$\alpha = n \cdot (\alpha_n + \alpha_p) \quad [5]$$

$$\kappa = n \cdot \left(\frac{\lambda_n \cdot A_n}{l} + \frac{\lambda_p \cdot A_p}{l} \right) \quad [6]$$

$$R_{\text{int}} = n \cdot \left(\frac{\rho_n \cdot l}{A_n} + \frac{\rho_p \cdot l}{A_p} \right) \quad [7]$$

Cada generador está compuesto por un número de termopares (conjunto N y P) determinado. El generador planteado tendrá 120 termopares (n) por lo que a cada termopar le corresponderá un área $A_t = \frac{A}{n}$ [8]. El área del material de tipo P y de tipo N es el mismo en cada termopar siendo este $A_n = A_p = \frac{A_t}{2}$ [9], [10].

Los flujos de calor y frío también vienen determinados por las siguientes ecuaciones obtenidas a partir del circuito eléctrico:

$$\dot{Q}_C = \frac{T_C - T_{C,S}}{R_{PDMS}} \quad [11]$$

$$\dot{Q}_F = \frac{T_{F,S} - T_F}{R_{PDMS} + R_{Aire}} \quad [12]$$

Dependiendo de si se trata de un caso de conducción (R_{PDMS}) o de convección (R_{Aire}), habrá que utilizar una u otra de las siguiente ecuaciones:

Resistencia térmica de conducción: $R_{PDMS} = \frac{e}{\lambda_{PDMS} \cdot A} \quad [13]$

Resistencia térmica de convección sin aletas: $R_{Aire} = \frac{1}{h \cdot A} \quad [14.1]$

Resistencia térmica de convección con aletas: $R_{Aire} = \frac{1}{h \cdot \eta_{aletas} \cdot A_{aletas}} \quad [14.2]$

En este caso, no se instalarán aletas debido a que conllevaría un aumento del grosor del generador no deseable, por lo que se utilizará la ecuación [14.1] en vez de la [14.2]. Se supondrá una situación de reposo en la que se producirá convección natural. Si el usuario caminara o hiciera movimientos con el brazo, se pasaría a una situación de convección forzada exterior con mayor rendimiento cuanto más velocidad. Las ecuaciones de cálculo del coeficiente de convección tienen un rango de validez según diferentes parámetros. En este caso, el coeficiente de convección natural se calcula como:

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda_{Aire}}{L} \quad [15]$$

$$Nu = 0,59 \cdot Ra^{1/4} \quad [16]$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_F - T_{F,s}) \cdot L^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad [17]$$

En el caso de convección forzada, el número de Nusselt se calcularía como:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad [18]$$

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad [19]$$

A continuación se muestran una tablas en la que se recogen cuáles serán los datos para el problema planteado:

Datos	Símbolo	Valor	Unidades	Para aumentar la potencia debe	Comentario
Área del generador	A	$9 \cdot 10^{-4}$	m^2	Aumentar	Tabla 5.1 - 1.
Espesor del PDMS	e	0,003	m	Disminuir	La capa de polímero será de 3 mm
Espesor de los materiales semiconductores	l	0,0005	m	Disminuir	La longitud del tipo P y del tipo N serán 5 mm
Número de termopares	n	120	-	Aumentar	El generador tendrá 120 termopares
Coficiente Seebeck del tipo N	α_n	$195 \cdot 10^{-6}$	$\frac{V}{K}$	Aumentar	Tabla 5.1 - 1.
Coficiente Seebeck del tipo P	α_p	$230 \cdot 10^{-6}$	$\frac{V}{K}$	Aumentar	Tabla 5.1 - 1.
Conductividad térmica del tipo N	λ_n	1,07	$\frac{W}{m \cdot K}$	Disminuir	Tabla 5.1 - 1.
Conductividad térmica del tipo P	λ_p	1,28	$\frac{W}{m \cdot K}$	Disminuir	Tabla 5.1 - 1.
Resistividad eléctrica del tipo N	ρ_n	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$\Omega \cdot m$	Disminuir	Tabla 5.1 - 1.

Resistividad eléctrica del tipo P	ρ_p	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$\Omega \cdot m$	Disminuir	Figura 5.1 - 1.
Intensidad en la carga	I_L	$8,5 \cdot 10^{-4}$	A	Buscar el valor óptimo	Parámetro de diseño, dependiente de manera directa de la resistencia del aparato al que estemos transfiriendo la energía *
Temperatura caliente	T_C	306,8	K	Aumentar	El dispositivo se colocará en la muñeca por lo que según la Figura 6. - 1, la temperatura caliente será 33,8 °C
Temperatura fría	T_F	294	K	Disminuir	La temperatura exterior media a la que se utilizará el generador serán 21°C
Conductividad térmica del PDMS	λ_{PDMS}	0,2	$\frac{W}{m \cdot K}$	Aumentar	Depende del material y de la temperatura. Valor tomado para 20 °C (las posibles variaciones en este rango de temperatura son despreciables)
Longitud de intercambio	L	0,03	m	Aumentar	La longitud de intercambio de calor entre el generador y el aire es igual al largo del generador
Conductividad térmica del aire	λ_{Aire}	$26,3 \cdot 10^{-3}$	$\frac{W}{m \cdot K}$	Aumentar	Depende del fluido y de la temperatura. Valor tomado para 20 °C (las posibles variaciones en este rango de temperatura son despreciables)
Aceleración de la gravedad	g	9,81	$\frac{m}{s^2}$	Aumentar	Aceleración gravitatoria en la Tierra
Coefficiente de expansión térmica del aire	β_{Aire}	$3,33 \cdot 10^{-3}$	K^{-1}	Aumentar	Es igual al inverso de la media entre la temperatura caliente y la fría
Viscosidad cinemática del aire	ν_{Aire}	$14,01 \cdot 10^{-6}$	$\frac{m^2}{s}$	Disminuir	Depende del fluido y de la temperatura. Valor tomado para 20 °C (las posibles variaciones en este rango de temperatura son despreciables)
Número de Prandtl del aire	Pr_{Aire}	0,719	-	Aumentar	Depende del fluido y de la temperatura. Valor tomado para 20 °C (las posibles variaciones en este rango de temperatura son despreciables)

Tabla 5.2 - 3. Tabla de datos del problema

* En este caso se transferirá la energía a un reloj analógico con una potencia de 1 μW . Aunque un dispositivo como un reloj, no disipa la energía mediante una resistencia eléctrica pura sino que lo hace a través de un conversor de tensión, para simplificar los cálculos se considerará la disipación mediante una resistencia pura. Primero habrá que comprobar cuál es la intensidad óptima para la que se obtiene el mayor flujo de calor y posteriormente, según la ecuación $P_L = I_L^2 \cdot R_L$, habrá que adaptar la resistencia eléctrica a la intensidad calculada.

5.3. Obtención de resultados

A continuación se muestra una tabla con la incógnitas del problema:

Incógnitas	Símbolo	Valor (tras realizar los cálculos)	Unidades
Número de Rayleigh	Ra	37445	-
Número de Nusselt	Nu	8,207	-
Coficiente de convección	h	7,195	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
Resistencia térmica del aire	R_{Aire}	154,4	$\frac{K}{W}$
Resistencia térmica del PDMS	R_{PDMS}	16,67	$\frac{K}{W}$
Coficiente de Seebeck total	α	0,051	$\frac{V}{K}$
Conductancia térmica	κ	0,2115	$\frac{W}{K}$
Resistencia interna	R_{int}	4,96	Ω
Área de cada termopar	A_t	$7,5 \cdot 10^{-6}$	m^2
Área de cada par tipo N	A_n	$3,75 \cdot 10^{-6}$	m^2
Área de cada par tipo P	A_p	$3,75 \cdot 10^{-6}$	m^2
Temperatura caliente de la superficie del TEG	$T_{C,S}$	305,7	K
Temperatura fría de la superficie del TEG	$T_{F,S}$	305,4	K
Flujo caliente	\dot{Q}_C	0,06683	W
Flujo frío	\dot{Q}_F	0,06682	W
Flujo de calor total	\dot{Q}	$7,398 \cdot 10^{-6}$	W
Potencia	P	$7,398 \cdot 10^{-6}$	W

Tabla 5.3. - 1. Tabla de resultados del problema

Una vez clasificados los datos y las incógnitas, hay que introducirlos en sus correspondientes ecuaciones. Utilizaré desde la ecuación [1] hasta la [17] (exceptuando la [14.2]), obteniendo de este modo 17 ecuaciones y 17 incógnitas que serán introducidas junto con los datos en el programa informático de cálculo EES (Anexo 6.1.). Los resultados obtenidos se han insertado en la tabla anterior.

A continuación se debe elegir la intensidad óptima con la que se consigue la potencia máxima. Para ello, se elabora un gráfico en el que se representa la potencia en función de la intensidad.

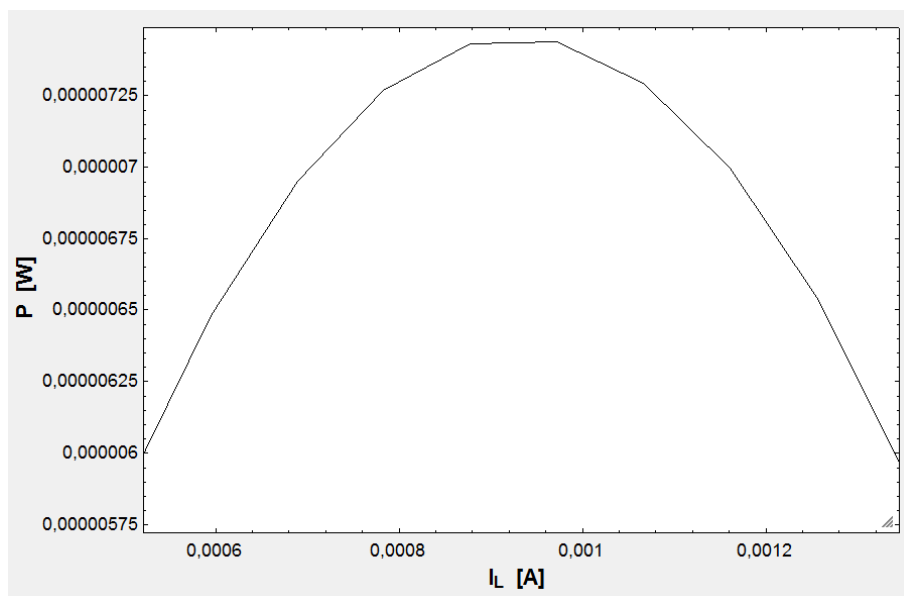


Figura 5.3. - 2. Potencia en función de la intensidad

Observando la gráfica, se comprueba que la intensidad para la que más potencia se obtiene es $I_L = 0,00098$ A. Para conseguir esa intensidad simplemente se tendrá que ajustar la resistencia del aparato al que estemos transfiriendo la energía. Si se está alimentando un aparato que consume $1 \mu\text{W}$, la resistencia de la carga deberá ser $1,04 \Omega$ (tratándose de una resistencia eléctrica pura).

Rehaciendo los cálculos para esa intensidad, obtenemos la siguiente tabla, donde se muestra el valor definitivo de las incógnitas (las unidades coinciden con las de la tabla 5.3. - 1.):

Símbolo	Ra	Nu	h	R _{Aire}	R _{PDMS}	α	κ	R _{int}
Valor	37472	8,209	7,196	154,4	16,67	0,051	0,2115	4,96

Símbolo	A_t	A_n	A_p	$T_{C,s}$	$T_{F,s}$	\dot{Q}_C	\dot{Q}_F	P
Valor	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$3,75 \cdot 10^{-6}$	$3,75 \cdot 10^{-6}$	305,7	305,4	0,06689	0,6688	$7,433 \cdot 10^{-6}$

Tabla 5.3. - 3. Tabla de incógnitas para la intensidad óptima

Debido a las diferentes resistencias, el salto térmico en el TEG es de sólo 0,3 °C, obteniendo por ello una potencia muy pequeña. Si las condiciones planteadas se mantuvieran constantes, el generador termoeléctrico calculado suministraría algo más de 7,4 μW . Esta energía sería suficiente para mantener encendido tanto un reloj analógico de pulsera como un reloj digital de pulsera en todo momento. En el siguiente apartado se analizará cómo varía la potencia en función de diferentes parámetros.

5.4. Análisis paramétricos de los resultados modificando las variables

En el presente apartado se va a estudiar la influencia que tiene sobre la potencia cada uno de los parámetros más relevantes en el diseño del generador. Estos parámetros toman unos u otros valores dependiendo de la situación en la que se encuentre el generador, por lo que también se intentará analizar las causas que los pueden modificar.

En el primer análisis se va a variar del coeficiente Seebeck de los materiales semiconductores:

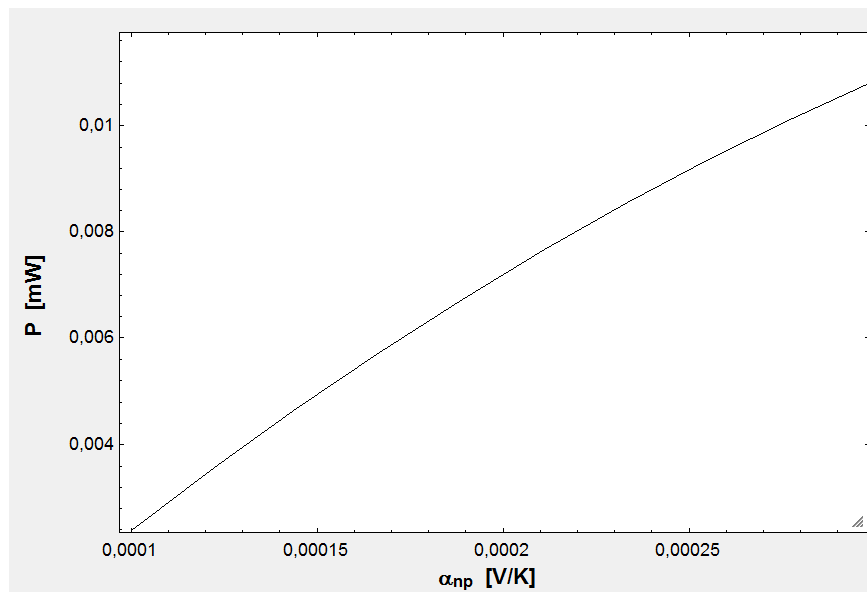


Figura 5.4. - 1. Potencia en función del coeficiente Seebeck

Los materiales tradicionales no superaban 100 $\mu\text{V/K}$ mientras que los materiales actuales superan los 200 $\mu\text{V/K}$ de coeficiente Seebeck. Siguiendo con las investigaciones sobre el comportamiento de los materiales termoeléctricos, se conseguirán coeficientes de Seebeck superiores a 300 $\mu\text{V/K}$. Si en el diseño se hubiera utilizado un coeficiente de 300 $\mu\text{V/K}$ de media entre el material de tipo N y el de tipo P, se podría haber conseguido una potencia superior a 10 μW .

El siguiente análisis se va a centrar en la variación de la temperatura caliente para una temperatura fría constante de 21 °C:

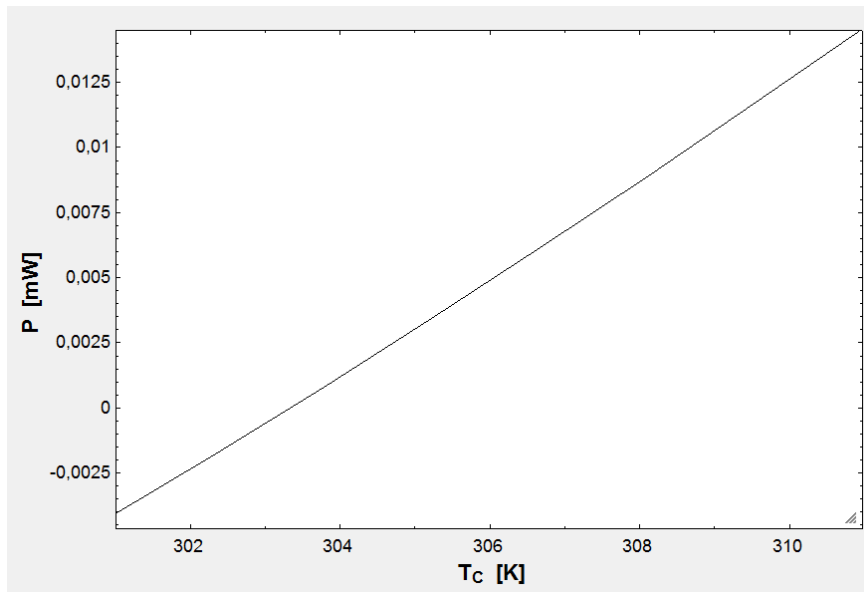


Figura 5.4. - 2. Potencia en función de la temperatura caliente

La temperatura de la piel varía principalmente por dos factores: dependiendo de la actividad que se esté realizando (reposo, andar, deporte...) y dependiendo de la temperatura exterior. Cuanto mayor sea el esfuerzo físico y cuanto mayor sea la temperatura exterior, mayor será la temperatura de la piel. Como se observa en la gráfica, para temperaturas inferiores a la temperatura ambiente no se obtendrá potencia y para temperaturas de la piel superiores a 38 °C, se obtienen casi 15 μW de potencia.

Variando la temperatura fría y manteniendo la caliente constante a 33,8 °C, los resultados son los siguientes:

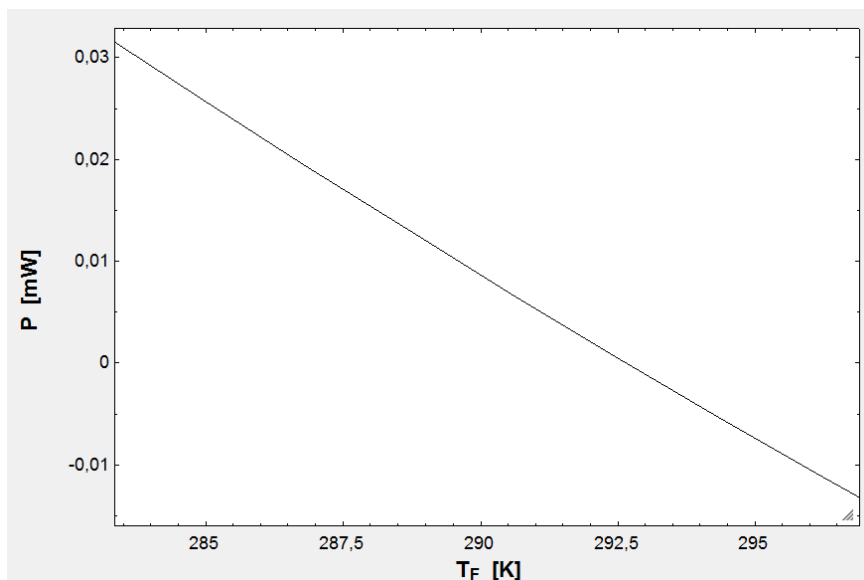


Figura 5.4. - 3. Potencia en función de la temperatura fría

De manera contraria a lo que ocurriría con la temperatura caliente, para valores pequeños de temperatura fría se obtienen mejores resultados. Por ejemplo, para 10 °C de temperatura

ambiente, la potencia es superior a 30 μW , reduciéndose conforme se acerca a la temperatura de la piel. En ese punto no se obtendrá potencia. La variación de la temperatura fría viene determinada por las condiciones ambientales. Por ejemplo, la época del año, si se está en un lugar interior o exterior, el país en el que se encuentre, etc.

En el siguiente gráfico se analiza la potencia en función del área.

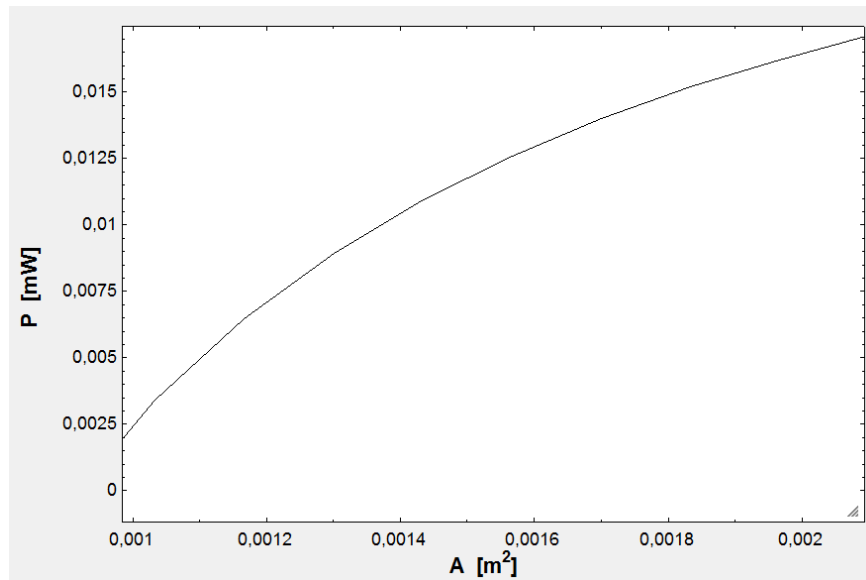


Figura 5.4. - 4. Potencia en función del área

Suponiendo que la superficie que ocupa la caja de un reloj más su correa es de $0,0021 \text{ m}^2$, fabricándola de material termoeléctrico, la potencia podría llegar hasta casi $17 \mu\text{W}$. En el caso de diseñar una camiseta compuesta por termogeneradores, la potencia se vería intensamente afectada.

En todos los casos anteriores se ha supuesto que el fluido de intercambio en la convección era aire. Si se consiguieran aislar los materiales semiconductores, se podría utilizar el generador debajo del agua. En ese caso, las propiedades que determinan el coeficiente de convección variarían. A continuación se muestran los resultados obtenidos en las mismas condiciones que el apartado 5.2. cuando el fluido de intercambio es el agua (las unidades coinciden con las de la tabla 5.3. - 1.). En el Anexo 6.8. se detallan los cálculos completos.

Símbolo	Ra	Nu	h	R_{Aire}	$T_{C,S}$	$T_{F,S}$	P
Valor	$4,93 \cdot 10^6$	27,8	555,8	154,4	301,4	300	$6,761 \cdot 10^{-5}$

Figura 5.4. - 5. Tabla de resultados con las propiedades del agua

Debido al cambio de fluido, el coeficiente de convección se incrementa notablemente, pasando de $7,196 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ a $555,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$. Por consiguiente, el salto térmico en el TEG se ve fuertemente afectado. Debido al aumento en el salto térmico, la potencia se multiplica casi por 10. Anteriormente, la potencia obtenida era de $7,4 \mu\text{W}$ y ahora es superior a $67 \mu\text{W}$.

En el siguiente análisis paramétrico se estudia la influencia que tiene la velocidad a la que se mueve el generador sobre el coeficiente de convección, siendo el fluido de intercambio nuevamente aire. En este caso, se pasa de la convección natural que se produce en reposo, a la convección forzada que se produce cuando el generador está en movimiento. Una persona andando a un ritmo normal, se desplaza a una velocidad de 1,2 m/s. En el caso de estar corriendo, la velocidad se incrementa hasta 2,5 m/s. Para el cálculo es necesario cambiar las correlaciones del coeficiente de convección. En el Anexo 6.9. se detallan los cálculos.

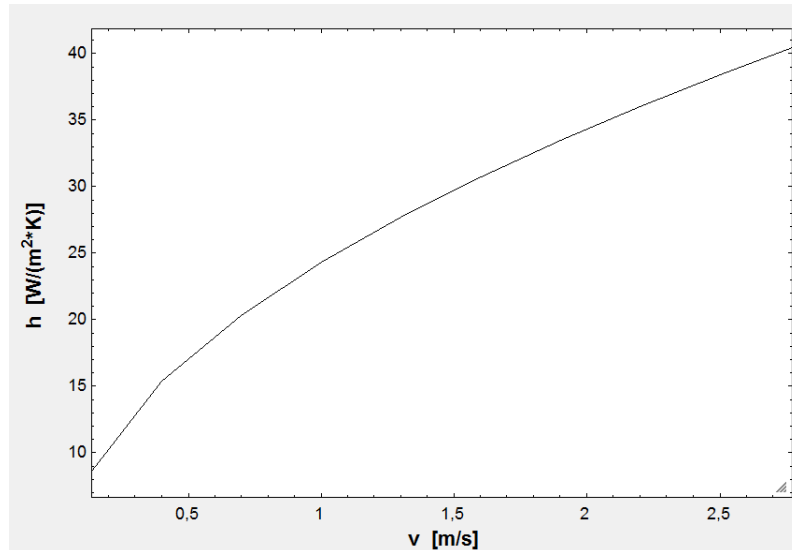


Figura 5.4. - 6. Coeficiente de convección en función de la velocidad

En valores de velocidad próximos a 0, el coeficiente de convección se sitúa en torno a $7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Este valor es muy próximo al que se obtenía con la convección natural. Conforme se aumenta la velocidad, el coeficiente de convección aumenta en gran medida.

El último análisis paramétrico estudia la influencia que tiene el coeficiente de convección sobre la potencia del generador. Aunque en el caso del agua, el coeficiente era superior a $500 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, sólo se hará el estudio para el rango de valores del aire.

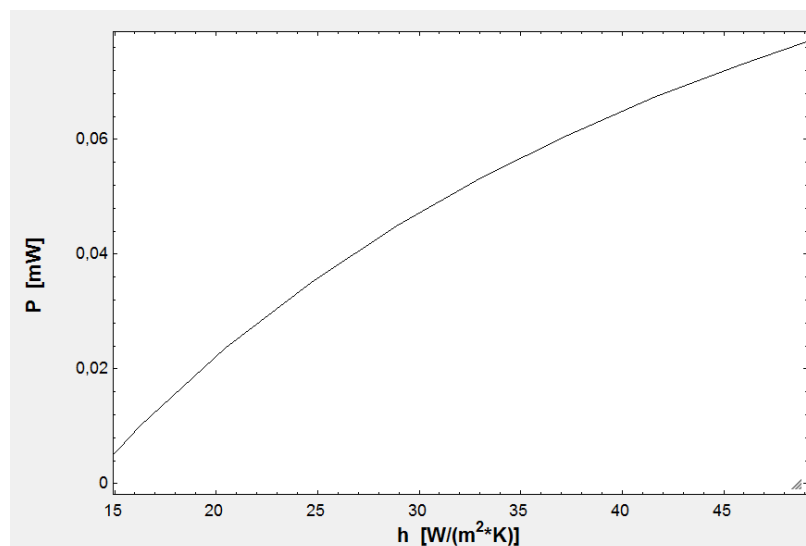


Figura 5.4. - 7. Potencia en función del coeficiente de convección

Cuando el coeficiente de convección asciende hasta valores cercanos a $40 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, como en el caso en el que el generador se mueve a 2,5 m/s, la potencia que obtenida es de 70 μ W. Observando el gráfico anterior, se puede comprobar la gran influencia que tiene el coeficiente de convección sobre la potencia.

Para terminar este apartado, me gustaría estudiar un caso en el que nos encontráramos todas las variables de manera favorable para el aumento de la potencia. Por ejemplo, unos materiales con coeficiente Seebeck de 300 μ V/K, una temperatura caliente de 37 °C, una temperatura fría de 10 °C, un área de 0,0024 m^2 y un coeficiente de convección de 30 $W/(m^2 \cdot K)$. La potencia obtenida para este caso aumenta en gran medida, alcanzando 0,8378 mW. Los cálculos se recogen en el Anexo 6.11.

5.5. Viabilidad en diferentes aplicaciones

Acudiendo a la tabla de consumos de diferentes aparatos tecnológicos (Figura 4. - 3.), se puede concluir que si las condiciones son favorables, el generador podría alimentar un reloj de pulsera, un marcapasos, un sensor inalámbrico o un audífono de manera continua.

En el caso de un reproductor de música o un GPS de pulsera, la energía producida no sería suficiente para satisfacer la demanda continuamente. Esto no quiere decir que no puedan ser alimentados por los generadores. El consumo de estos dispositivos varía en función del uso que se les da. Los momentos en los que el dispositivo no fuera utilizado, serían aprovechados para cargar la batería, que suministrará la energía necesaria en los momentos de mayor consumo. Estos dispositivos son viables cuando el uso que se hace de ellos es limitado y las condiciones del generador son favorables.

Los relojes inteligentes también tienen un consumo variable según su uso. El consumo en standby es 0,14 mW mientras que en uso consume 20 mW. Si se limitaran las funciones de estos dispositivos, en un futuro próximo se verán relojes inteligentes accionados por el calor humano.

Los teléfonos móviles quedan fuera del alcance de esta tecnología ya que su consumo es muy superior a los de los dispositivos analizados anteriormente. No hay previsiones a corto plazo pero se podría considerar un gran reto reducir notablemente el consumo de los teléfonos móviles y mejorar la eficiencia de los generadores hasta el punto de poderse accionar por el calor humano exclusivamente.

No hay que olvidar que los resultados obtenidos en el modelado y en los análisis paramétricos sólo se pueden producir en situaciones muy concretas y constantes. El hecho de que la temperatura ambiente varíe considerablemente según se esté en el interior o en el exterior de un edificio, en verano o invierno, en un país o en otro, etc., puede generar una intermitencia en el funcionamiento del generador, dependiente de la situación en la que se encuentre.

6. CONCLUSIONES

Para poder entender cómo se ha realizado el diseño del generador termoeléctrico accionado por el calor del cuerpo humano, es necesario comprender previamente qué es la termoelectricidad, qué son y para qué sirven los generadores termoeléctricos y cuáles son sus principales aplicaciones. Por ello, a lo largo de todo el trabajo se ha procurado seleccionar y detallar la información más importante para responder a esas preguntas.

Aunque el término termoelectricidad es desconocido para una parte de la sociedad, su uso está mucho más extendido de lo que nos podemos imaginar. Haciendo una minuciosa investigación es posible disponer de innumerables estudios realizados acerca de los generadores termoeléctricos accionados por el calor humano.

El éxito actual de esta tecnología radica principalmente en la búsqueda de energías limpias y respetuosas con el medio ambiente. Por ello, a pesar de haber sido descubiertos a principios del siglo XIX, no fue hasta finales del siglo XX cuando se empezaron a hacer investigaciones trascendentes para implementar los generadores termoeléctricos.

A la hora de plantear el diseño, es necesario plantear unas condiciones (hipótesis) en las que trabajará el generador. Es de gran importancia que estas hipótesis se asemejen lo máximo posible a la realidad ya que los resultados obtenidos sólo serán válidos en el caso en el que se produzcan esas condiciones.

La revisión bibliográfica fue determinante para el diseño, ya que algunos parámetros elegidos, estuvieron directamente condicionados a ella. Además, fue de gran ayuda comprobar que los resultados obtenidos en el diseño realizado, se asemejaban por completo a los resultados experimentales obtenidos en la revisión bibliográfica.

Aunque se le otorgue gran importancia a los materiales, durante los análisis paramétricos, es fácil darse cuenta de que hay otros parámetros con mayor influencia sobre la potencia de salida. El ejemplo más claro es la diferencia de temperaturas aunque no debemos olvidarnos de otros como el coeficiente de convección o el área. El coeficiente de convección se ve muy afectado cuando el fluido de convección es diferente al aire. En el caso de realizar el intercambio de calor mediante agua, este coeficiente se veía multiplicado por cincuenta y la potencia de salida aumentaba de manera notable.

Según los resultados, son muy pocos los dispositivos que pueden ser accionados hoy en día por esta tecnología. En un futuro no muy lejano se espera que, siguiendo con las investigaciones, se consigan realizar grandes avances, pudiendo así aumentar el número de aplicaciones. Pese a que en este trabajo no se ha analizado la dimensión económica, hay que tener en cuenta que es una de las variables que más peso tienen a la hora de desarrollar nuevas aplicaciones.

Aunque el alcance de este trabajo es limitado, se podrían incluir nuevos contenidos para ampliarlo. Algunos de los más importantes son:

- Añadir aletas al disipador.
- Ampliar los análisis paramétricos.
- Sustituir los materiales utilizados conforme avanzan las tecnologías de los materiales.
- Introducir una modelización de la transferencia interna de calor en el cuerpo humano, añadiendo de esta manera una resistencia de conducción al circuito eléctrico.
- Realizar un análisis económico.
- Realizar pruebas experimentales.

Por último, cabe destacar que los objetivos fijados antes del comienzo de este trabajo se han cumplido. A partir de la revisión bibliográfica se ha conseguido crear un modelo térmico sencillo con el que se ha comprobado la viabilidad de la tecnología estudiada en el accionamiento de diferentes dispositivos.

BIBLIOGRAFÍA

- ⁽¹⁾ Diccionario de la Real Academia Española. Definición de "Termoelectricidad".
- ⁽²⁾ Santiago Torno Tejedor y Andrés E. Sotelo Mieg: "Termoelectricidad, la energía del desequilibrio", 2006.
- ⁽³⁾ Grupo de Investigación de Ingeniería Térmica de la Universidad de Navarra: "Introducción a la Termoelectricidad".
- ⁽⁴⁾ Rosa Angelica Angeles Zurita, José Eduardo Márquez Tavera: "Estudio de las características de los sistemas termoeléctricos y su aplicación en refrigeración", 2005. Páginas 9-10.
- ⁽⁵⁾ Aldo Vieira da Rosa: "Fundamentals of Renewable Energy Processes", 2009. Academic Press. Capítulo 5, Thermoelectricity.
- ⁽⁶⁾ Dpto. Máquinas y Motores Térmicos de la Escuela Universitaria Politécnica de Donostia San Sebastián: "Análisis del funcionamiento de una célula Peltier", 2015.
- ⁽⁷⁾ Bob Yirka: "Researchers find tin selenide shows promise for efficiently converting waste heat into electrical energy", 2014
- ⁽⁸⁾ Nicholas Brown: "GMZ TEG Module Successfully Generates 200W From Engine Heat", 2014
- ⁽⁹⁾ Ricardo Muñoz Zurdo: "Diseño de un sistema termoeléctrico aprovechando características geotérmicas", 2013. Páginas 22-25.
- ⁽¹⁰⁾ D.M. Rowe: "Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano", 2005. CRC Press
- ⁽¹¹⁾ Aaron D. LaLonde, Yanzhong Pei, J. Jeffrey Sinder: "Reevaluation of PbTe_{1-x} as high performance n-type thermoelectric material", 2011.
- ⁽¹²⁾ Mateo Duque Solís: "Diseño de paneles generadores de electricidad por efecto Seebeck", 2013. Páginas 29-34.
- ⁽¹³⁾ Aritz Undurraga Almaraz: "Viabilidad de los materiales termoeléctricos", 2014. Páginas 1-2.
- ⁽¹⁴⁾ Molan Li: "Thermoelectric-Generator-Based DC-DC Conversion Network for Automotive Applications", 2011.
- ⁽¹⁵⁾ Gonzalo Gainza Moreno: "Simulación de un recuperador de calor para gases de escape basado en materiales termoeléctricos", 2015.
- ⁽¹⁶⁾ BINE Information Service: "Thermoelectrics: power from waste heat", 2016.
- ⁽¹⁷⁾ Andrew Liszewski: "This Smartwatch powered by your body heat never needs charging", 2016.
- ⁽¹⁸⁾ Rob Nichols: "Orange Power Wellies. Eco-Friendly mobile phone charger", 2010.

- ⁽¹⁹⁾ Tushar Sharma, Sahil Naik, Ashwini Gopal, John X.J. Zhang: "Emerging trends in bioenergy harvesters for chronic powered implants", 2015.
- ⁽²⁰⁾ Abu Raihan Mohammad Siddique, Shohel Mahmud, Bill Van Heyst: "A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73 (2017) 730–744.
- ⁽²¹⁾ Melissa Hyland, Haywood Hunter, Jie Liu, Elena Veety, Daryoosh Vashaee: "Wearable thermoelectric generators for human body heat harvesting". *Applied Energy* 182 (2016) 518–524.
- ⁽²²⁾ Leonov V: "Energy Harvesting for Self-Powered Wearable Devices", 2009.
- ⁽²³⁾ Abu Raihan Mohammad Siddique, Ronil Rabari, Shohel Mahmud, Bill Van Heyst: "Thermal energy harvesting from the human body using flexible thermoelectric generator (FTEG) fabricated by a dispenser printing technique". *Energy* 115 (2016) 1081-1091.
- ⁽²⁴⁾ Francisco Suárez, Amin Nozariasbmarz, Daryoosh Vashaee and Mehmet C. Öztürk: "Designing thermoelectric generators for self-powered wearable electronics". *Energy Environ. Sci*, 2016, 9, 2099.
- ⁽²⁵⁾ Heikes R. R, Ure R. W: "Thermoelectricity: Science and Engineering", 1961.
- ⁽²⁶⁾ Anthony F. Mills: "Transferencia de calor", 1995
- ⁽²⁷⁾ Yunus A. Çengel: "Transferencia de calor y masa", 2007
- ⁽²⁸⁾ Juan Antonio Catalán Solsona: "Materiales termoeléctricos. Aplicaciones para la refrigeración y la generación de electricidad", 2014.
- ⁽²⁹⁾ G. S. Nolas, H. B. Lyon, J. L. Vohn, T. M. Tritt, G. A. Slack: "16th Int. Conference on Thermoelectrics", 1997. Pp. 321-325
- ⁽³⁰⁾ Reiyu Chein, Guanming Huang: "Thermoelectric cooler application in electronic cooling", 2004. *Applied thermal Engineering* 24. P 2207-2217.
- ⁽³¹⁾ D. Astrain, J.G. Vian, J. Albizua: "Computational model for refrigerators based on Peltier effect application", 2010. *Applied thermal Engineering* 25. P 3149-3162.
- ⁽³²⁾ Steven Daly: "Automotive Air Conditioning and Climate Control Systems", 2006.

