



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

## MATERIALES TERMOELECTRICOS. APLICACIONES PARA LA REFRIGERACION Y LA GENERACION DE ELECTRICIDAD

Autor

Juan Antonio Catalán Solsona

Director

Sergio Usón Gil

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2014



# **MATERIALES TERMoeLECTRICOS. APLICACIONES PARA LA REFRIGERACION Y LA GENERACION DE ELECTRICIDAD**

## **RESUMEN**

En este trabajo fin de grado se realiza una revisión de las aplicaciones de materiales termoeléctricos y un análisis detallado de dos ejemplos de aplicación, con el objetivo de estudiar la viabilidad de esta tecnología en la actualidad.

En primer lugar, se realiza una revisión de las generalidades de los materiales termoeléctricos.

A continuación, se realiza una revisión de las aplicaciones actuales de mayor relevancia que funcionan a partir de la termoelectricidad, tanto para sistemas de refrigeración como para producción de electricidad a partir de calor residual.

Posteriormente, se realiza el diseño y análisis de una aplicación para sistema de refrigeración. A tal fin, se ha elegido diseñar una nevera termoeléctrica, para uso doméstico o en automóvil, mediante una toma de corriente. Primero se muestra el procedimiento y cálculo que se lleva a cabo para elegir los diferentes materiales y componentes de la nevera. Acto seguido se muestran los resultados obtenidos para el funcionamiento de varias temperaturas y se comparan con los de una nevera convencional por compresión, mostrándose las ventajas e inconvenientes de estas neveras termoeléctricas.

Finalmente, se realiza el análisis de una aplicación para producción de electricidad a partir de calor residual. Se ha elegido modelizar un generador termoeléctrico capaz de aprovechar el calor residual de los gases de escape de un automóvil para generar electricidad sin costes adicionales. También, se muestran y verifican los resultados obtenidos comparándolos con algunos modelos realizados con anterioridad en artículos científicos.

La simulación de los dos modelos se efectúa mediante el programa Engineering Equation Solver (EES). Esta simulación se centra en la parte térmica, mientras que el comportamiento de los materiales termoeléctricos se obtiene de la información de hojas de datos de fabricantes.



# INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION. TERMoeLECTRICIDAD .....</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Efecto Seebeck .....</i>	1
1.2	<i>Efecto Peltier .....</i>	2
1.3	<i>Efecto Thomson.....</i>	4
1.4	<i>Efecto Joule .....</i>	5
<b>2</b>	<b>METODOS DE TRANSMISION DE CALOR .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>MODULOS TERMoeLECTRICOS .....</b>	<b>7</b>
3.1	<i>Módulos Peltier .....</i>	7
3.2	<i>Generadores termoeléctricos.....</i>	9
<b>4</b>	<b>APLICACIONES.....</b>	<b>10</b>
4.1	<i>Aplicaciones para refrigeración .....</i>	10
4.1.1	<i>Refrigeración de microprocesadores.....</i>	10
4.1.2	<i>Climatización y calefacción en habitación .....</i>	11
4.1.3	<i>Climatización en asientos de automóviles.....</i>	12
4.1.4	<i>Neveras portátiles .....</i>	13
4.2	<i>Aplicaciones para producción de electricidad .....</i>	14
4.2.1	<i>Industria del automóvil.....</i>	14
4.2.2	<i>Centrales térmicas .....</i>	16
4.3	<i>Otras aplicaciones.....</i>	16
4.3.1	<i>Sensores térmicos.....</i>	16
<b>5</b>	<b>PROGRAMA INFORMATICO .....</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>DISEÑO DE UNA NEVERA TERMoeLECTRICA.....</b>	<b>19</b>
6.1	<i>Introducción .....</i>	19
6.2	<i>Elección del material de la caja y cálculo de flujo de pérdidas .....</i>	19
6.3	<i>Elección de la célula Peltier .....</i>	20
6.4	<i>Elección de los disipadores.....</i>	26
6.4.1	<i>Disipador de la cara caliente.....</i>	26
6.4.2	<i>Disipador de la cara fría .....</i>	29

6.5	<i>Montaje.....</i>	31
6.6	<i>Funcionamiento habitual .....</i>	31
6.7	<i>Resultados.....</i>	34
6.8	<i>Nevera termoeléctrica vs nevera convencional con compresor .....</i>	35
<b>7</b>	<b>GENERADOR RECUPERADOR DE GASES.....</b>	<b>36</b>
7.1	<i>Introducción .....</i>	36
7.2	<i>Características y dimensiones de las células Seebeck .....</i>	36
7.3	<i>Cálculos .....</i>	38
7.3.1	<i>Coeficientes de convección .....</i>	38
7.3.2	<i>Eficiencia de las aletas del disipador interior .....</i>	39
7.3.3	<i>Temperaturas superficiales de las células .....</i>	40
7.3.4	<i>Potencia eléctrica generada por las células.....</i>	41
7.4	<i>Resultados.....</i>	42
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>45</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>47</b>

ANEXO I. TRANSMISION DE CALOR

ANEXO II. CODIGO FUENTE DEL PROGRAMA INFORMATICO EES

ANEXO III. DOCUMENTACION TECNICA DE CELULA PELTIER

ANEXO IV. DOCUMENTACION TECNICA DE DISIPADOR Y VENTILADOR

# 1 INTRODUCCION. TERMOELECTRICIDAD

---

La termoelectricidad es una rama de la termodinámica superpuesta a la electricidad que estudia los fenómenos de conversión de la energía eléctrica a calorífica y viceversa [1].

Aunque los fenómenos termoeléctricos se conocen desde principios del siglo XIX, las aplicaciones tuvieron su origen en entornos restringidos como el militar y el especial. Surge a inicios de los años cincuenta, con grandes expectativas hacia el futuro. Incluso se llegó a pensar que sustituiría a los sistemas de compresión de vapor [2].

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 un control preciso de la temperatura es necesario. 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. [1,2]

Para el correcto entendimiento del funcionamiento del trabajo es necesario conocer los fundamentos teóricos de los fenómenos termoeléctricos y físicos que ocurren en un termoelemento. En este apartado se trata de explicar los fenómenos que tienen lugar cuando se hace circular una corriente eléctrica a través de un termoelemento.

## 1.1 Efecto Seebeck

En 1821, el científico alemán Thomas Seebeck descubrió que se podía obtener electricidad a partir de una diferencia de temperatura. En un circuito formado por dos metales distintos unidos en sus extremos, al calentar una de las uniones se genera una tensión como consecuencia de la diferencia de temperatura entre los extremos. Esta tensión induce una corriente eléctrica, que fluirá por el circuito entre las uniones fría y caliente. Este efecto constituye el fundamento de los pares termoeléctricos [3, 4].

La figura 1.1 muestra un circuito de termopares, formado por dos conductores de diferentes materiales, Material X y Material Y.

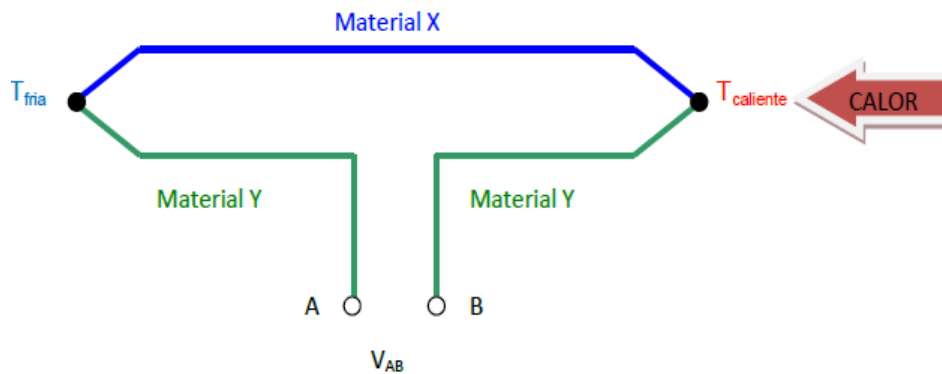


Figura 1.1: circuito termopares

Si se aplica calor en la unión correspondiente al terminal B, aparece una diferencia de potencial entre los terminales A y B, que se denomina fuerza electromotriz de Seebeck. Esta tensión es proporcional al gradiente térmico impuesto. La siguiente ecuación muestra la expresión de esta diferencia de potencial [4]:

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

Siendo:

$V_{ab}$ : diferencia de potencial

$\alpha$ : coeficiente de seebeck entre los dos materiales.

$T_{caliente}$ ;  $T_{fría}$ : temperaturas fría y caliente en las uniones.

El coeficiente de Seebeck entre dos materiales distintos, x e y, consiste en el cociente entre la diferencia de potencial eléctrico ( $\Delta V$ ) entre la unión de a y de b y la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ). El coeficiente de Seebeck también se denomina Poder Termoeléctrico y se mide en V /K [4].

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

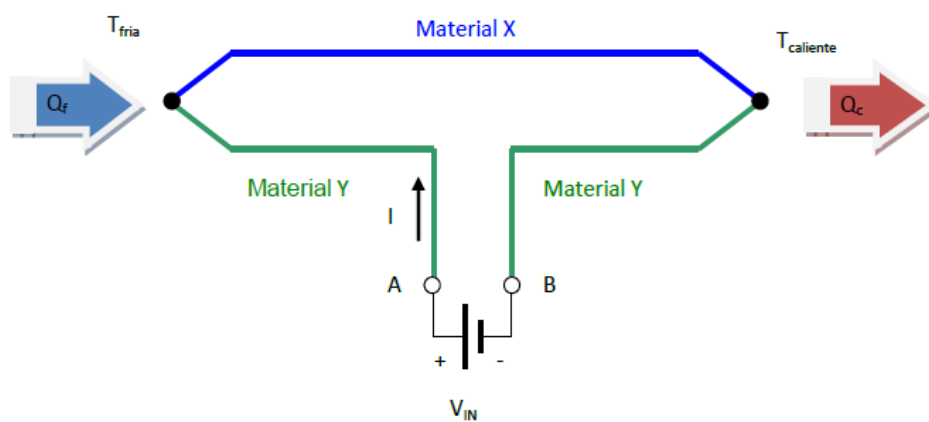
## 1.2 Efecto Peltier

Este efecto fue descubierto en 1843 por el relojero y físico francés Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845) mientras investigaba el efecto Seebeck. Se considera como el inverso del efecto Seebeck, es decir, descubrió la capacidad de generar calor mediante la aplicación de una corriente eléctrica a la unión de dos materiales diferentes [1,5].



El efecto Peltier hace referencia a la creación de una diferencia 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 (estas uniones reciben el nombre de junturas o uniones de Peltier) [2]. La corriente propicia una transferencia de calor de una juntura a la otra: una se enfría en tanto 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 [5].

La figura 1.2 muestra el circuito de termopares anterior modificado, observando ahora el fenómeno Peltier [4].



**Figura 1.2: circuito 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 se enfríe. La unión correspondiente al terminal B genera calor, y como consecuencia esta unión se calienta [4].

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.

La siguiente ecuación muestra la expresión del efecto Peltier matemáticamente [2,4]:

$$Q = \pi_{xy} \cdot I$$

Siendo:

$Q$ : calor absorbido o cedido.

$\pi_{xy}$ : coeficiente de Peltier entre dos materiales.

$I$ : intensidad de la corriente que recorre el circuito.

### 1.3 Efecto Thomson

El matemático y físico británico William Thomson descubrió las relaciones que interrelacionan y complementan el efecto Seebeck y el efecto Peltier, añadiendo un nuevo efecto termoeléctrico, el llamado “efecto Thomson”.

El efecto Thomson es un fenómeno que consiste en que al circular una corriente eléctrica por un conductor en el que existe un gradiente de temperatura, el conductor genera o absorbe calor. El hecho de que se genere o absorba calor, dependerá de la dirección de la corriente eléctrica y del gradiente de temperatura [4,6].

La figura 1.3 muestra el esquema del principio de funcionamiento de este fenómeno.

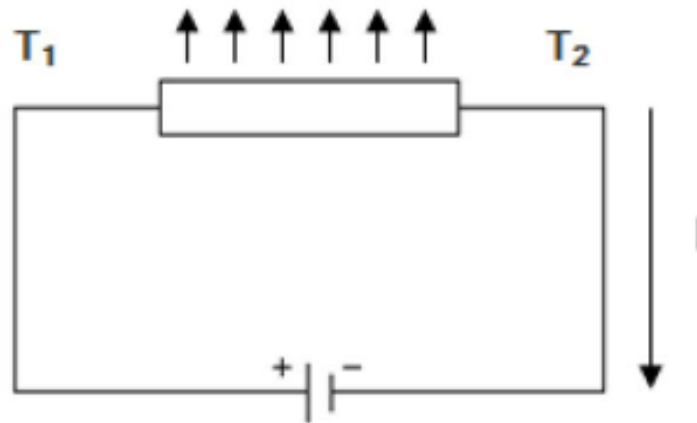


Figura 1.3: esquema del funcionamiento del efecto Thomson

La diferencia fundamental entre los efectos Seebeck y Peltier con respecto al efecto Thomson es que este último existe para un solo material y no necesita la existencia de una soldadura entre dos materiales diferentes [4].

La potencia calorífica generada o absorbida por unidad de volumen en el conductor se expresa según la ecuación siguiente ecuación [4,34]:

$$Q = \tau \cdot I \frac{dT}{dx}$$

Siendo:

Q: calor que se genera

$\tau$ : coeficiente de Thomson.

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

$\frac{dT}{dx}$  : gradiente de temperatura.

## 1.4 Efecto Joule

El efecto Joule fue descubierto por James Prescott Joule en 1852. 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 [3].

El calor generado en un material por efecto Joule es directamente proporcional a la resistencia del conductor y al cuadrado de la intensidad de la corriente, como se observa en la ecuación mostrada a continuación [6]:

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

Siendo:

$Q_J$  : potencia calorífica generada debida al efecto Joule.

R : resistencia eléctrica del material.

I : corriente que atraviesa al material.

El efecto Joule actúa en oposición al efecto Peltier y provoca una reducción total de la refrigeración disponible. Al contrario que en los anteriores efectos, el efecto Joule no es un efecto reversible [6].

## 2 METODOS DE TRANSMISION DE CALOR

---

Una vez mostrados los principales efectos termoeléctricos que nos interesan para nuestro estudio, es importante que entendamos cuales son las diferentes formas de transmisión de calor existentes, ya que estas van a influir en el cálculo teórico de nuestro sistema de refrigeración así como en su rendimiento.

Se entiende como transmisión de calor el traspaso de energía térmica entre dos cuerpos sólidos, líquidos o gaseosos. Cuando dos de estos cuerpos se encuentran en contacto se tiende al equilibrio térmico, de forma que si uno de esos cuerpos está a más temperatura que el otro el calor es traspasado al que está a una temperatura más baja, a una velocidad que depende normalmente de un parámetro llamado conductividad térmica presente en todos los materiales.[7,33]

Existen tres formas de transmisión o transferencia de calor:

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

En el anexo I se muestran detalladamente cada una de estas formas de transmisión de calor.

## 3 MODULOS TERMoeLECTRICOS

Los dispositivos termoelectricos se basan en los efectos descritos con anterioridad. Existen en el mercado dos tipos de células, las células de efecto Peltier que se utilizan para enfriar o calentar (enfriar principalmente) y las de efecto Seebeck para generar corriente eléctrica.

### 3.1 Módulos Peltier

Los módulos Peltier, también conocidos como placas Peltier, son las más utilizadas debido a su menor coste y mayor número de aplicaciones, algunas de ellas se muestran en el capítulo 4.

Estos módulos tienen una construcción muy robusta y convierten la energía directamente, sin necesidad de partes móviles que puedan producir efectos como vibraciones o ruidos [8].

Están formados por un conjunto de termopares, situados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo, de tal forma que todos los termopares que absorban calor están situados a un lado de la placa y los que desprendan calor al otro lado. Las investigaciones realizadas sobre estos dispositivos han determinado que para mejorar sus prestaciones los mejores materiales para constituir los termopares son semiconductores de tipo P y N [8].

Un módulo Peltier se compone por dos o varias placas de cerámica separadas por los cubos de material semiconductor. Dichas placas sirven como soporte mecánico de la estructura del dispositivo y como aislante eléctrico entre los elementos de la célula [4].

La figura 3.1 muestra un esquema de un módulo Peltier donde se pueden observar las partes más significativas. La figura 3.2 se muestra una imagen de una placa Peltier comercial.

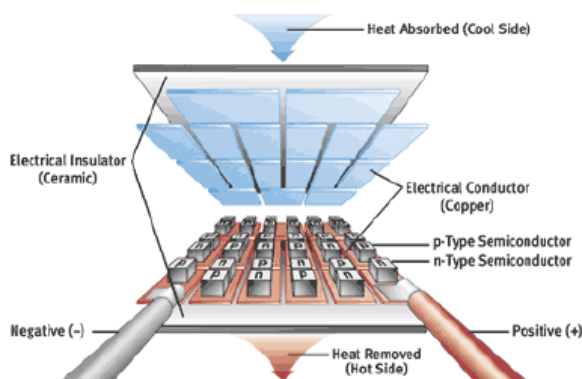


Figura 3.1: esquema de un módulo Peltier

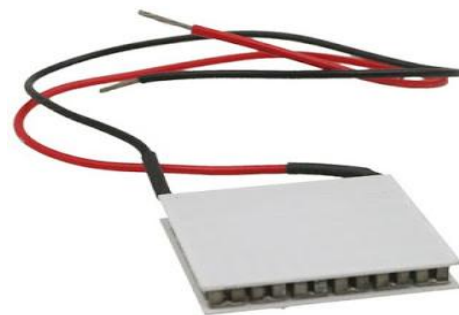


Figura 3.2: imagen de una placa Peltier comercial.

## Funcionamiento

En este apartado se va a proceder a explicar el funcionamiento de una célula Peltier para refrigeración, ya que para calefacción es de menos interés utilizar este tipo de placas.

Los refrigeradores termoeléctricos están gobernados por las mismas leyes termodinámicas que los refrigeradores mecánicos comunes. Ambos sistemas funcionan con los mismos principios, pero de una forma diferenciada [2].

En el caso de un refrigerador mecánico, el compresor aumenta la presión del refrigerante, condensa el gas en líquido en el condensador y hace circular el refrigerante por todo el sistema. En el evaporador, el refrigerante pasa de líquido a vapor, con lo cual absorbe el calor y, de esta manera, disminuye la temperatura en la zona que estamos enfriando [2].

En un sistema de refrigeración termoeléctrica, el compresor se sustituye por una fuente de alimentación y el material semiconductor realiza la función del refrigerante. Al aplicar tensión mediante la fuente de alimentación provoca que los electrones se muevan a través del material semiconductor. La cara caliente de la célula Peltier sustituye al condensador y, finalmente, la cara fría de la célula sería el evaporador, donde se absorbe el calor y de esta manera se disminuye la temperatura de la placa en esa zona.

Si interesa aumentar la diferencia de temperaturas, se pueden montar varios módulos de manera superpuesta. De esta forma se consigue que la temperatura del lado frío del primer módulo sea mayor que la temperatura del lado frío del segundo módulo. En cualquier caso, es necesaria la utilización de un ventilador para ayudar a disipar el calor con mayor facilidad.

La figura 3.3 muestra el esquema del balance energético de un módulo Peltier:

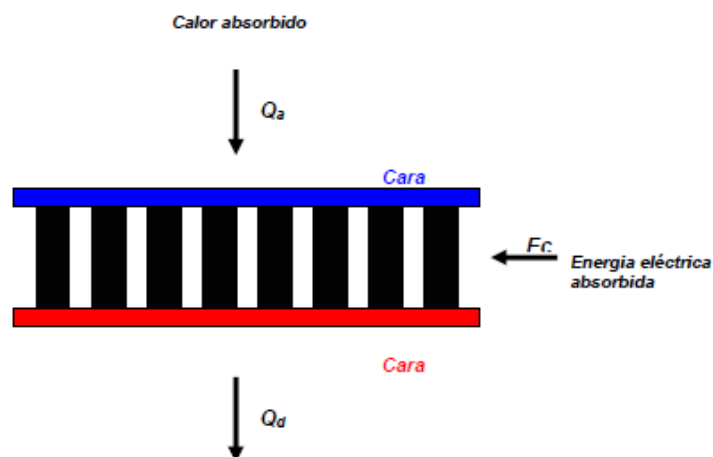


Figura 3.3: esquema del balance energético de un módulo Peltier

### 3.2 Generadores termoeléctricos

Los módulos basados en el efecto Seebeck, también llamados generadores, tienen menor número de aplicaciones, debido a su mayor coste en el mercado.

La construcción de los módulos de generación termoeléctrica es similar a la de las placas Peltier. Estos módulos también están constituidos por parejas de elementos de material semiconductor tipo p y tipo n [9].

Su principal aplicación es la de recuperar la energía perdida en los focos calientes (calor residual). Para conseguir recuperar la mayor parte de energía, se suelen utilizar un conjunto de módulos Seebeck, los cuales se sitúan entre el foco de pérdidas de la fuente de calor y la propia fuente de calor. La diferencia de temperaturas entre ellos genera la energía eléctrica [9]. alguna de las aplicaciones más comunes de este tipo de tecnología se puede observar en el capítulo 4.

Habida cuenta que existe una gran cantidad de energía térmica que se desperdicia en la mayoría de procesos y, además, cualquier fuente de calor puede ser apropiada para generar electricidad, este es un campo en el cual se están dedicando grandes esfuerzos para mejorar la baja eficacia que actualmente tiene esta tecnología.

La figura 3.4 muestra un módulo generador de electricidad a partir de una diferencia de temperaturas:

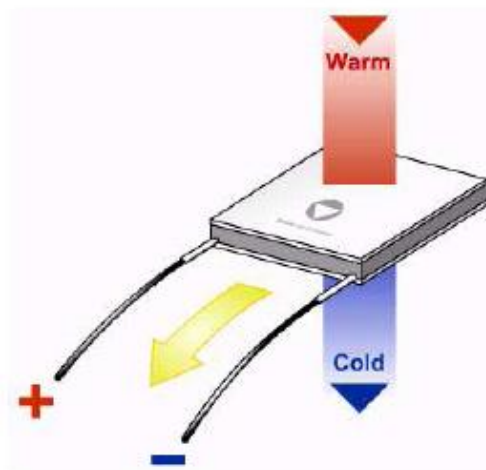


Figura 3.4: módulo generador

Las aplicaciones actuales y potenciales de los materiales termoeléctricos se basan en dos aspectos del efecto Thomson:

Por un lado, el establecimiento de un flujo de calor, opuesto a la difusión térmica, cuando un material sometido a un gradiente de temperatura es atravesado por una corriente eléctrica, permite pensar en aplicaciones de refrigeración termoeléctrica. Muchas de estas aplicaciones funcionan a partir de los módulos de Peltier comerciales comentados en el capítulo 3.

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. 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 [9].

Como consecuencia del impacto negativo sobre el medio ambiente de los combustibles fósiles, se han comenzado a utilizar fuentes alternativas de energía. Una de esas fuentes esta basada en el fenómeno de la termoelectricidad [9]. A continuación se muestran las aplicaciones existentes más importantes basadas en la termoelectricidad como principio de funcionamiento.

### 4.1 Aplicaciones para refrigeración

#### 4.1.1 Refrigeración de microprocesadores

A medida que ha ido avanzando la tecnología en los procesadores se ha vuelto más y más gravitante el problema del calor. Aunque los procesos se hayan optimizado y el problema se haya mitigado y postergado, la amenaza del calor excesivo sigue latente y, tarde o temprano, volverá a ser un obstáculo mayor [10, 11].

Normalmente, la refrigeración de estos microprocesadores se realiza a través de unos ventiladores, los cuales generalmente emiten un elevado ruido y en la mayoría de los casos no son del todo eficientes. Por consiguiente, se ha empezado a implementar la refrigeración de los procesadores mediante placas Peltier [11].



Su funcionamiento está basado en el fenómeno de Peltier, funciona con una o varias células Peltier que al recibir electricidad generan una diferencia de temperatura. Como ya se ha explicado anteriormente, uno de los lados de la placa se enfriará y el otro se calentará. El lado frío debe estar en contacto con el procesador, mientras que el lado caliente debe ser disipado mediante el ventilador. A pesar de que el calor debe ser disipado también mediante el uso de ventiladores, usando estas placas Peltier se consiguen enfriar más los microprocesadores y la velocidad de los ventiladores se reduce considerablemente [12].

La figura 4.1 muestra el esquema de la refrigeración de un microprocesador mediante una célula Peltier:

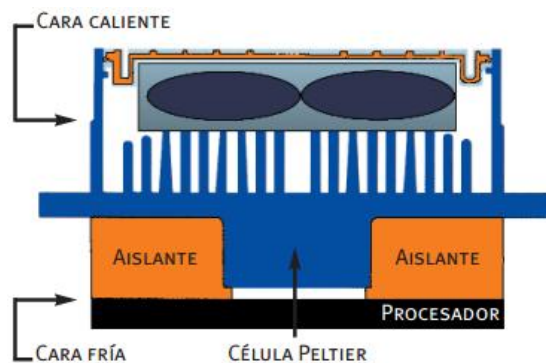


Figura 4.1: esquema de la refrigeración de un procesador mediante tecnología termoeléctrica.

El inconveniente que tiene el uso de estas células para refrigerar un microprocesador es que en la actualidad se requiere una fuente de alimentación adicional.

#### 4.1.2 Climatización y calefacción en habitación

La climatización y calefacción en habitaciones de tamaño limitado se pueden llevar a cabo mediante una o varias ventanas termoeléctricas. La ventana termoeléctrica es una bomba de calor basada en el efecto Peltier, en la cual se insertan varias células Peltier [13]. Estas ventanas termoeléctricas sustituyen a las ventanas comunes, sin ocupar espacio adicional y sin piezas móviles ni refrigerantes. El sistema es válido para aire acondicionado y calefacción, y permite un control preciso y fiable de la temperatura para un consumo sostenible de energía.

La tecnología electrónica de bombeo de calor (efecto Peltier), puede ser instalada en las ventanas comunes con una pequeña reducción de la superficie transparente, para condicionar una habitación o para reducir las cargas térmicas a través de las ventanas. Se trata de una tecnología muy interesante para la climatización de habitaciones con limitaciones de espacio y en la construcción de edificios con grandes superficies de vidrio [14,35].

La figura 4.2 muestra el esquema básico del recorrido realizado por el aire al atravesar la cara fría de la ventana termoeléctrica.

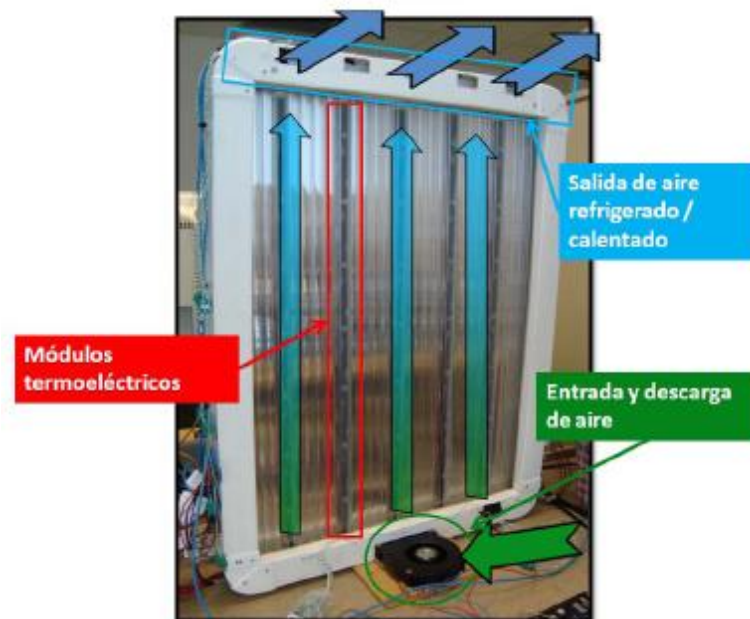


Figura 4.2: esquema básico del recorrido del aire al atravesar la cara fría de la ventana [14]

En la actualidad, debido a la colocación de estos módulos entre las dos capas de la ventana, la transparencia de ésta se ve reducida en aproximadamente un 18%, pero en el futuro será posible desarrollar cadenas translúcidas con la tecnología de película delgada. Actualmente, las cadenas termoeléctricas son opacas, pero en el futuro será posible desarrollar cadenas translúcidas con la tecnología de película delgada [14].

### 4.1.3 Climatización en asientos de automóviles

La climatización del habitáculo y asiento del automóvil tal y como la venimos conociendo hasta ahora es altamente ineficiente, aunque satisface las necesidades de confort se hace necesario ajustar los consumos energéticos.

El automóvil se ha convertido en parte importante de la vida cotidiana, ya que el tiempo que pasamos en él empieza a ser cada vez más significativo. Es conocido que el frío contrae los músculos, dificultando los movimientos y generando estrés, así como que el excesivo calor produce malestar general, somnolencia y pérdida de reflejos. Cualquiera de estas consecuencias, que obviamente imposibilitan el objetivo básico del confort, en el caso del automóvil introduce además un riesgo añadido, en muchas ocasiones crítico, para la conducción.

En la actualidad existen en el mercado sistemas integrados calefactables en asientos, los cuales, mediante resistencias, son capaces de dotar calor a lo largo de su superficie [15]. Mediante el uso de la tecnología termoeléctrica, se ha dado un paso más allá y se ha desarrollado un sistema reversible de generación de frío y de calor, monitorizado por unos sensores de temperatura para determinar las condiciones ambientales del usuario en cada momento. Partiendo de esta premisa, el efecto Peltier permite que, con un mismo dispositivo, se pueda enfriar o calentar a gusto del usuario, siendo su respuesta de actuación muy rápida [16,17].

La figura 4.3 muestra el sistema de control de climatización en un asiento de automóvil.

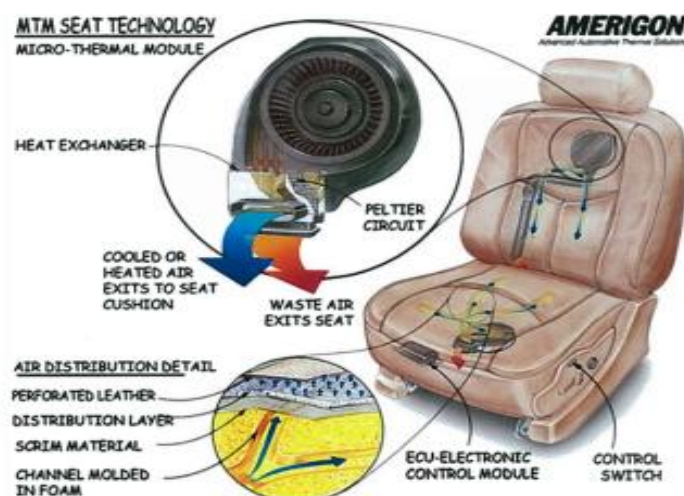


Figura 4.3: sistema de control de climatización en un asiento mediante tecnología termoeléctrica

Existen algunos fabricantes que ya disponen en el mercado de tecnologías termoeléctricas para la climatización de asientos para los automóviles [15]. Por el momento en los habitáculos el sistema de climatización a través de esta tecnología está en fase de desarrollo.

#### 4.1.4 Neveras portátiles

Las neveras portátiles son la aplicación más extendida de todas las aplicaciones basadas en la termoelectricidad, debido a su gran utilidad. Estas tienen tanta influencia en el mercado porque sirven para intercambiar calor, de la misma forma que una nevera convencional, pero sin la necesidad de utilizar partes móviles [18]. Además, sirve para aquellos sistemas en los que se desea invertir el sentido del bombeo de calor (es decir, que pueda calentar o enfriar en ambas direcciones).

Se suelen utilizar en el interior de automóviles, campings, oficinas o en hogares, donde sea conveniente tener un refrigerador pequeño y liviano.

La figura 4.4 muestra una imagen de una nevera termoeléctrica donde se puede observar sus reducidas dimensiones en comparación con un refrigerador convencional por compresión.



**Figura 4.4:** imagen de una nevera termoeléctrica

En el capítulo 6 se ha realizado un diseño de una nevera termoeléctrica y por tanto se puede encontrar información más detallada sobre el funcionamiento de la misma, así como de sus principales características, ventajas e inconvenientes, etc.

## **4.2 Aplicaciones para producción de electricidad**

### **4.2.1 Industria del automóvil**

Los motores térmicos que equipan la mayor parte de automóviles, utilizan la energía térmica de la combustión para transformarla en energía cinética de rotación y permitir así el avance del vehículo. No obstante, 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 a través de los materiales termoeléctricos es aprovechar esta energía térmica residual de los procesos y convertirla en energía eléctrica para otras aplicaciones [19]. 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 y de la refrigeración del motor.

El sistema consiste en colocar dos generadores termoeléctricos, uno en el sistema de refrigeración del motor y el otro en el tubo de escape. La energía generada por estos dispositivos se almacena en la batería. El generador termoeléctrico se utiliza para convertir el calor de los gases del tubo de escape directamente en electricidad, reduciendo el consumo de combustible.

De esta forma se puede reemplazar el alternador del vehículo y producir la electricidad por medio de estos generadores termoeléctricos [20].

Los motores térmicos se caracterizan por tener rendimientos muy bajos, cercanos al 30%, de manera que se tiene un 70% de energía que se disipa en forma de calor. Si se consigue aprovechar parte de esta energía disipada, se aumentará considerablemente el rendimiento de estos motores y se mejorará el ahorro de combustible en un 3-5 por ciento [21]. Este es el principal objetivo de los generadores termoeléctricos en vehículos.

En el capítulo 7 se puede consultar información más detallada acerca de este tipo de aplicación, puesto que se ha realizado el diseño de un generador de electricidad termoeléctrico que aprovecha la diferencia de temperatura existente entre el exterior y los gases para generar electricidad.

La figura 4.5 muestra un esquema de un motor con células termoeléctricas.

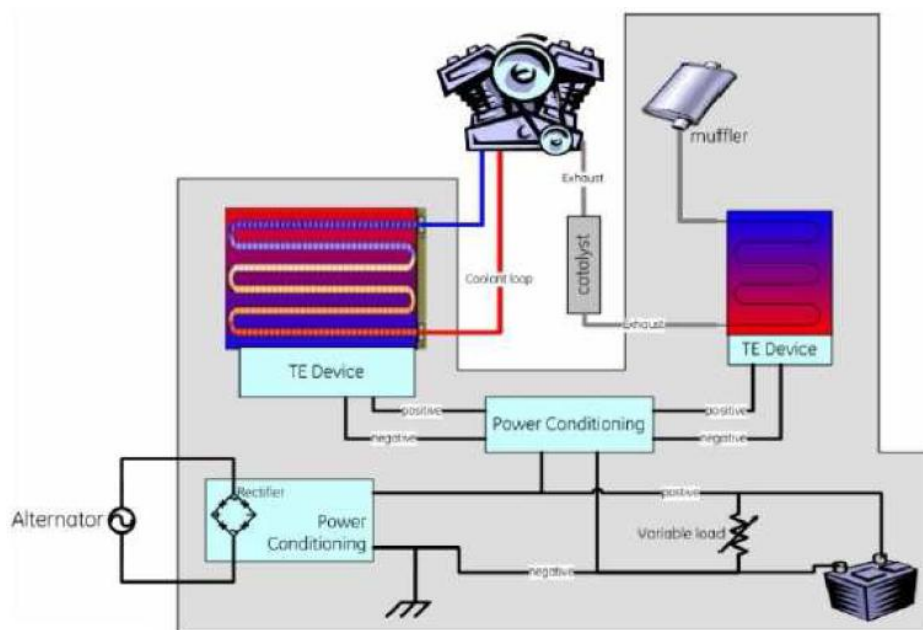


Figura 4.5: Esquema de motor con dispositivos termoeléctricos

Actualmente, el bajo rendimiento y el alto costo de los materiales termoeléctricos ha evitado que estos dispositivos fueran llevados a la práctica en los vehículos.

#### **4.2.2 Centrales térmicas**

La misma técnica utilizada para aprovechar la energía térmica residual de los procesos y convertirla en energía eléctrica mostrada en el apartado anterior se puede extender a otros procesos donde se produce una gran cantidad de energía térmica residual, como pueden ser las centrales térmicas.

En estas centrales se pueden colocar diferentes dispositivos termoeléctricos en función del rango de temperaturas de funcionamiento de los mismos. Aquellos dispositivos termoeléctricos que aseguren un funcionamiento a temperaturas comprendidas entre 1000 y 1200 K se colocarán en las zonas del quemador y de la caldera, mientras que para la chimenea será suficiente con dispositivos que soporten los 500 K [19,22].

El intercambio de calor entre las diferentes secciones de la central térmica y el dispositivo termoeléctrico se puede llevar a cabo de dos formas distintas, cuales son:

La primera consiste en un intercambio directo desde el gas hasta el módulo termoeléctrico, por convección o radiación [22].

La segunda consiste en instalar un conducto secundario que transporte el calor de los gases de combustión mediante aire o un fluido orgánico. En este caso el sistema termoeléctrico puede ser instalado de manera independiente a las calderas y evitar cualquier peligro sobre estos dispositivos [22].

### **4.3 Otras aplicaciones**

#### **4.3.1 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. [3]

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 [3].

La figura 4.6 muestra el esquema de un termopar.

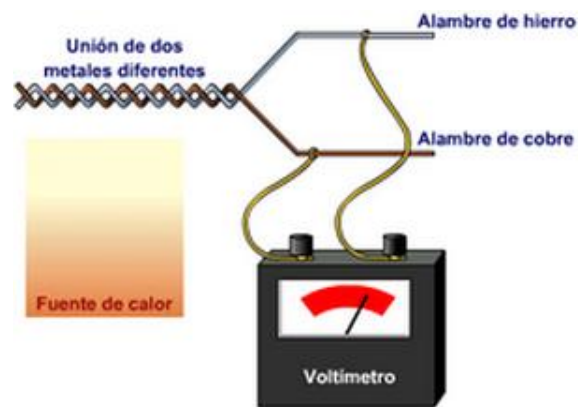


Figura 4.6: termopar

Existen numerosos tipos de termopares en función de los materiales que lo componen. Los diferentes tipos de termopares se diferencian principalmente por el rango de temperaturas al que pueden trabajar y el aislamiento que poseen.

La figura 4.7 muestra la tabla de tipos y materiales con los que se fabrican los termopares.

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 4.7: tabla de tipos y materiales con los que se fabrican los termopares

## 5 PROGRAMA INFORMATICO

---

El programa informático Engineering Equation Solver (EES) ha sido el programa que se ha elegido para apoyarnos en la realización del diseño de los dos modelos termoeléctricos realizados, los cuales se van a mostrar con detalle a continuación. Dicho programa es el más completo para este tipo de análisis, ya que [23]:

- Dispone de una base de datos de propiedades termodinámicas para una gran cantidad de sustancias.
- Permite la inclusión de funciones, procedimientos y módulos descritos por el usuario.
- Permite reordenar automáticamente las ecuaciones con variables desconocidas para obtener una solución eficiente.
- Permite el uso de una interfaz de fácil intuición en los resultados.
- Permite la realización de gráficas personalizadas.
- Dispone de la posibilidad de importar datos de entrada mediante datos externos a través de una tabla, de forma que sea lo mas automático posible.

En el anexo II se muestra el código fuente del programa EES, en el que se realizan los cálculos tanto para el diseño de la nevera termoeléctrica como para el diseño del generador termoeléctrico que permite recuperar energía de los gases de un tubo de escape de automóvil.



## 6 DISEÑO DE UNA NEVERA TERMoeLECTRICA

---

### 6.1 Introducción

En el presente capítulo se va a mostrar el método empleado para realizar el diseño de una nevera termoeléctrica. En él, se va a explicar el procedimiento y cálculo que se ha llevado a cabo para elegir los diferentes materiales de la nevera y cada uno de sus componentes.

Se desea realizar un diseño para una nevera portátil de uso doméstico o de uso en el habitáculo de un automóvil mediante una toma de corriente.

La explicación del cálculo llevado a cabo para conseguir un diseño óptimo de la nevera se puede dividir en:

- Elección del material de la caja
- Elección de la célula Peltier
- Elección del disipador interior de la nevera
- Elección del disipador exterior de la nevera
- Montaje

A continuación de esto, se mostrarán los resultados obtenidos del funcionamiento de la nevera termoeléctrica diseñada, los cuales se compararán con los de una nevera convencional de compresión.

Finalmente, se muestran las ventajas e inconvenientes actuales que posee la energía termoeléctrica aplicada para este tipo de neveras.

### 6.2 Elección del material de la caja y cálculo de flujo de pérdidas

Comenzando por los aspectos prácticos del proyecto, lo primero que se ha estudiado ha sido la elección de la caja idónea para el montaje de la nevera portátil y el flujo de pérdidas de calor que habrá entre el interior y exterior de la caja.

En el anexo I se muestra detalladamente el procedimiento que se ha llevado a cabo para la correcta elección de la caja, además del cálculo realizado para obtener el flujo de pérdidas de calor por transferencia de calor entre el interior y el exterior de la caja.

Para realizar estos cálculos nos hemos apoyado en los conceptos de transmisión de calor, los cuales también se muestran con detalle en el anexo I.

La caja que se ha escogido para la realización de este trabajo es una caja comercializada por el fabricante Porexpan, modelo Hielo Seco 25 de las siguientes características:

- Dimensiones exteriores: 317x317x317 mm
- Dimensiones interiores: 256x256x256 mm
- Volumen interno: 17 L
- Coeficiente de conductividad:  $k = 0,037 \text{ W/mK}$

Se ha calculado el flujo de pérdidas de calor que tiene la caja para la temperatura ambiente más crítica (30°C) a la que pueda estar expuesta la nevera y una temperatura interior de 5°C. Eligiendo la temperatura ambiente más crítica, nos aseguramos elegir los accesorios más robustos para la nevera, los cuales se mostraran a continuación.

Después de realizar los cálculos, el flujo de pérdidas de calor que tendrá la caja será:

- $Q_c = 16 \text{ W}$

### 6.3 Elección de la célula Peltier

Las células Peltier comerciales están caracterizadas por varios parámetros. La diferencia de temperatura, la capacidad de bombeo ( $Q_{\text{max}}$ ), la tensión y la corriente de entrada.

Para la adquisición de una célula es necesario conocer las pérdidas de calor que vamos a tener en el interior de la caja ( $Q_c = 16 \text{ W}$ ), así como la diferencia de temperatura que queremos entre el interior y el exterior de la caja ( $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ ).

En un principio se va a estudiar la posibilidad de extraer toda la potencia calorífica del interior de la nevera mediante una única placa Peltier. Si, tras el cálculo, se observa que con una placa no es suficiente para extraer toda la potencia calorífica, se optará por añadir otra célula.

Tenemos que tener en cuenta que la célula Peltier no va a estar en contacto directo con el cuerpo a refrigerar; por tanto la temperatura en la superficie de la cara fría de la célula y en la superficie del objeto en el interior de la caja van a ser diferentes. Tampoco habrá la misma temperatura en la superficie caliente de la célula que en el interior de la habitación o del automóvil [24].

La figura 6.1 muestra un esquema de las diferencias de temperatura que nos encontramos entre el interior y el exterior de la nevera. Para comprender mejor este esquema se ha dibujado encima el montaje de la célula en la caja, el cual se explicará con mayor atención en el apartado 6.5, una vez calculados todos los parámetros necesarios.

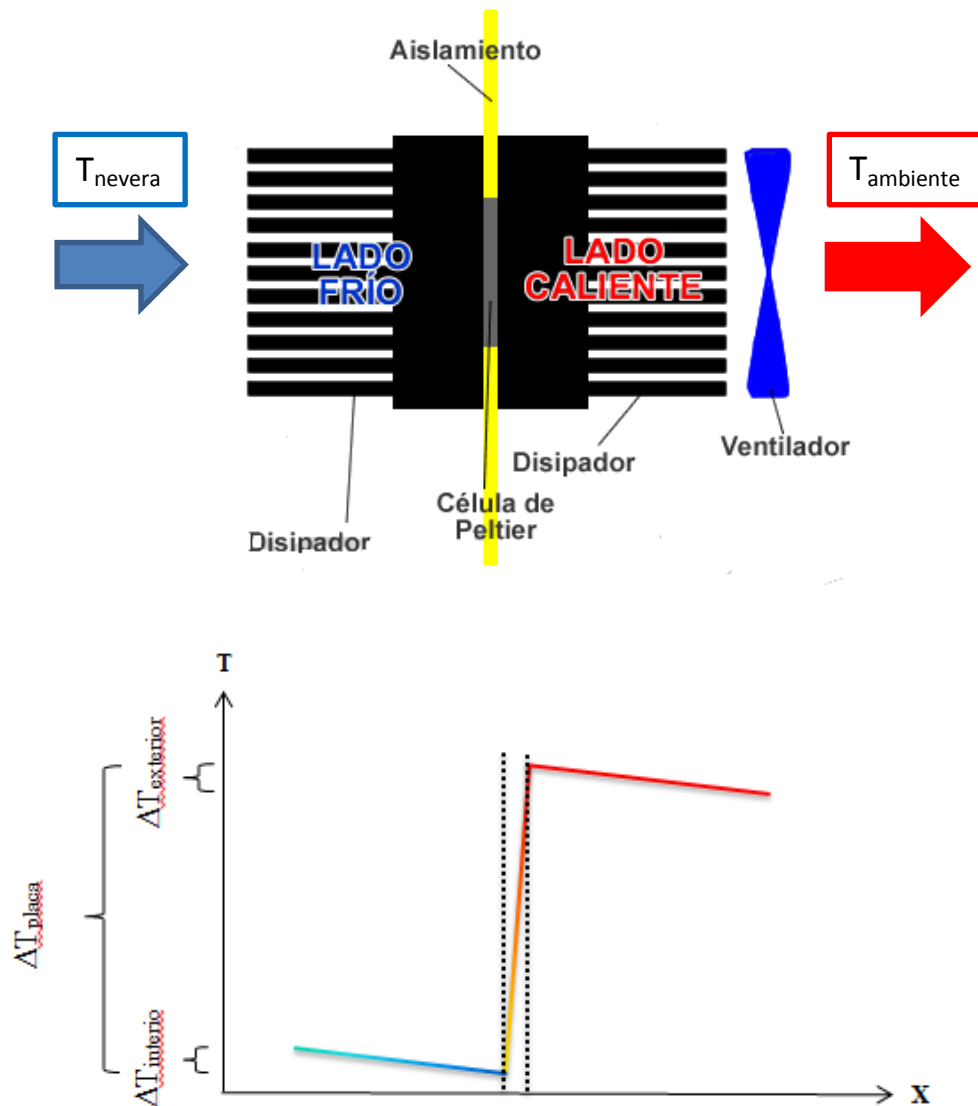


Figura 6.1: esquema de las diferencias de temperatura entre el interior y exterior de la nevera

Para poder elegir la célula Peltier correcta hay que estimar tanto la diferencia de temperatura que hay entre el interior de la nevera y la cara fría de la célula ( $\Delta T_{\text{interior}}$ ), como la diferencia de temperatura que hay entre la temperatura ambiente y la cara caliente de la placa ( $\Delta T_{\text{exterior}}$ ). Esto va a afectar, posteriormente, en la elección de los disipadores (se muestra en el apartado 6.4) y en el rendimiento de la propia célula Peltier.

Se han realizado una serie de iteraciones que comprueban que, con los siguientes incrementos de temperatura, se consiguen unas prestaciones adecuadas de la nevera.

- $\Delta T_{\text{interior}} = 5^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T_{\text{exterior}} = 8^{\circ}\text{C}$

Una vez fijadas las diferencias de temperatura anteriores, se pueden calcular fácilmente las temperaturas superficiales de la célula.

- $\Delta T_{\text{interior}} = T_{\text{nevera}} - T_{\text{superf cara fría}} \rightarrow T_{\text{superf cara fría}} = T_{\text{nevera}} - \Delta T_{\text{interior}} = 5 - 5 = 0^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T_{\text{exterior}} = T_{\text{superf cara caliente}} - T_{\text{ambiente}} \rightarrow T_{\text{superf cara caliente}} = T_{\text{ambiente}} + \Delta T_{\text{exterior}} = 30 + 8 = 38^{\circ}\text{C}$

Finalmente, para poder calcular el resto de parámetros, se necesita conocer el incremento de temperatura que tiene la placa Peltier.

- $\Delta T_{\text{placa}} = 38 - 0 = 38^{\circ}\text{C}$

Una vez conocida la cantidad de calor que se va a transferir del exterior al interior de la caja ( $Q_c$ ) y el incremento de temperatura de la placa ( $\Delta T_{\text{placa}}$ ), se va a elegir una célula Peltier con una máxima capacidad de bombeo ( $Q_{\text{max}}$ ) lo suficientemente grande como para poder evacuar todo el calor de la cara fría de la placa al exterior. Se ha estudiado la posibilidad de instalar la célula TE-127-1.4-2.5 del fabricante TEtechnology con las siguientes características [25,26]:

TE-127-2.0-2.5 Thermoelectric Module (Peltier Module) Specifications		Material Specifications (27 °C hot side temperature)	Material Specifications (50 °C hot side temperature)
	Vmax (V)	16.3	18.1
	I <sub>max</sub> (A)	7.6	7.6
	Q <sub>max</sub> (W)	76.0	83.4
	DT <sub>max</sub> (°C)	72	81
	Operation/storage temperature	-40 °C to +80 °C	

**Figura 6.2: características técnicas de la célula TE-127-1.4-2.5 [25]**

Posteriormente, se va a explicar como se han calculado los parámetros necesarios apoyándonos en la hoja de datos del fabricante, la cual se puede consultar en el Anexo III. Cogiendo la columna que nos indica que la temperatura de la cara caliente es 27°C, se han trazado las líneas adecuadas en las curvas características de la célula con los siguientes datos:

- $Q_c = 16 \text{ W}$
- $\Delta T_{\text{placa}} = 38^{\circ}\text{C}$

Primero, en la figura 6.3 se muestra como se ha calculado el valor de la tensión máxima a la que funcionará la placa mediante las curvas características del fabricante.

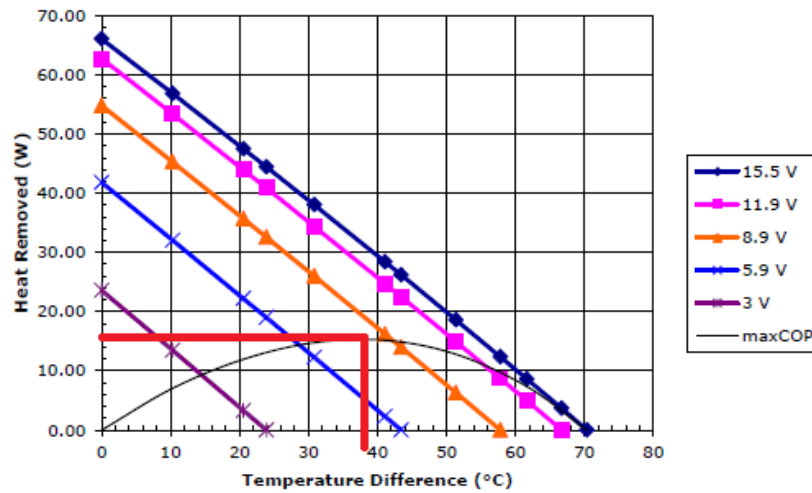


Figura 6.3: curvas célula TE-127-2.0-2.5 ( $\Delta T$  vs  $Q_c$ )

Para saber si se ha elegido una placa que proporcione unas características óptimas para nuestros datos de partida, hay que observar la línea de máximo COP que se muestra en la figura anterior, ya que será la zona de mayor rendimiento de la placa. Tal y como se puede observar, se ha elegido una célula adecuada que funcionará con una tensión de 8,5 V.

Posteriormente, la figura 6.4 muestra como se ha calculado el valor máximo de la cantidad de calor que tiene que disipar la placa ( $Q_h$ ):

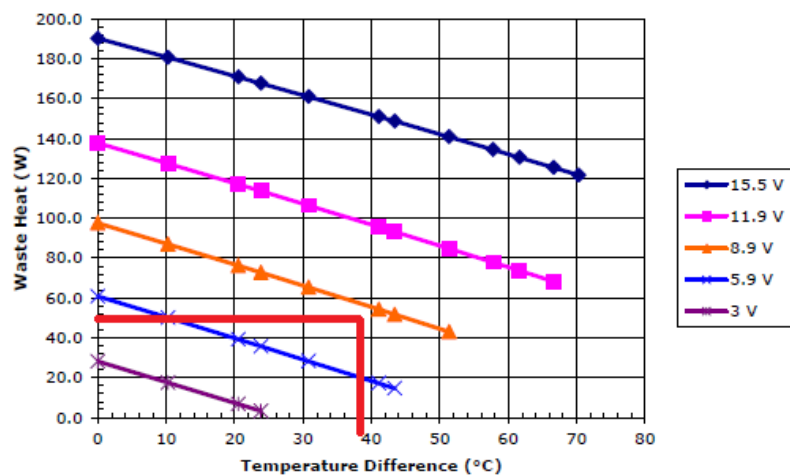


Figura 6.4: curvas célula TE-127-2.0-2.5 ( $\Delta T$  vs  $Q_h$ )

Mediante el incremento de temperatura y la tensión calculada anteriormente como datos de partida, se obtiene que la cantidad de calor que tendrá que disipar la placa será de 50 W.

La figura 6.5 muestra como se ha calculado el valor de la intensidad máxima a la que va a funcionar la placa.

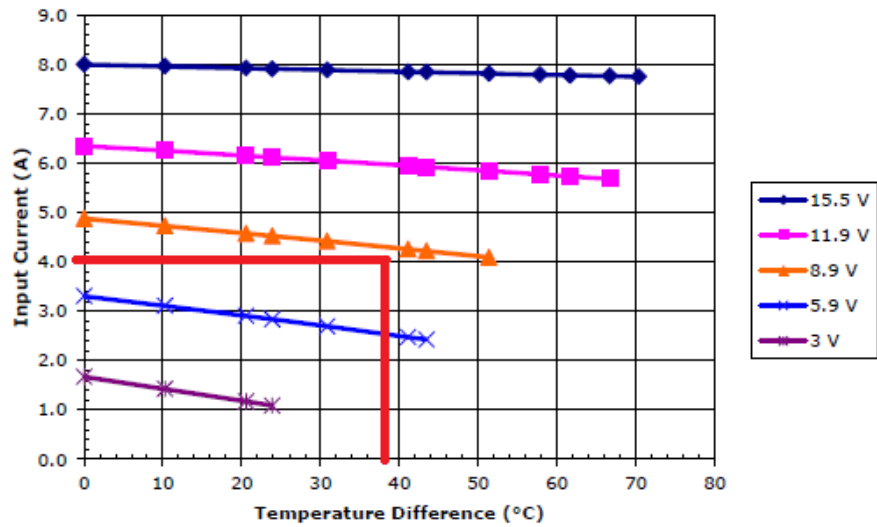


Figura 6.5: curvas célula TE-127-2.0-2.5 ( $\Delta T$  vs  $I$ )

Mediante el incremento de temperatura y la tensión nuevamente como datos de partida se obtiene que la intensidad que consume la placa es de 4 A.

Finalmente, con estos datos se pueden calcular tanto el COP de la célula como la potencia eléctrica que consume la misma. La potencia eléctrica que consume la célula se puede calcular a través de dos formas diferentes, realizando un balance de energía en la célula o apoyándonos en el valor de la tensión e intensidad calculadas en las figuras 6.3 y 6.5.

- $BE \rightarrow P_{elec} = Q_h - Q_c = 50 \text{ w} - 16 \text{ w} = 34 \text{ w}$
- $P_{elec} = V \cdot I = 8,5 \text{ V} \cdot 4 \text{ A} = 34 \text{ w}$

Como se puede comprobar, el valor de la potencia eléctrica que consume la célula Peltier es el mismo calculándolo de formas diferentes. De esta forma se puede comprobar que los cálculos realizados mediante la ayuda de las curvas características proporcionadas por el fabricante tienen una gran fiabilidad.

Por último, se ha calculado el COP de la célula mediante la ecuación la siguiente ecuación:

$$COP = \frac{Q_c}{W_{elec}} = \frac{16 \text{ W}}{34 \text{ W}} = 0,47$$

La figura 6.6 muestra el COP de la célula a través de las curvas proporcionadas por el fabricante, en la misma se puede comprobar que el COP es aproximadamente el mismo que el calculado anteriormente.

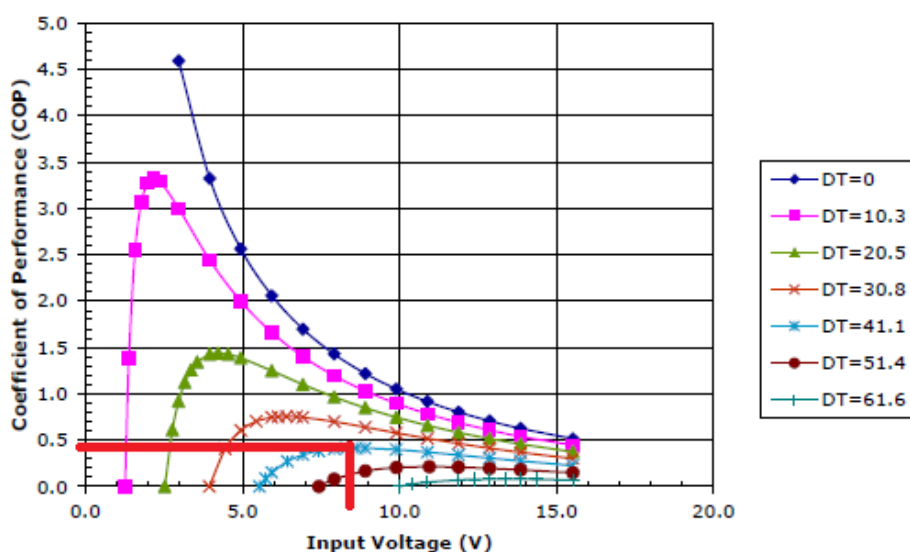


Figura 6.6: curvas célula TE-127-2.0-2.5 (V vs COP)

Como se puede observar, se puede confirmar que se ha elegido una célula adecuada como se preveía anteriormente, puesto que se consigue el máximo COP posible para un incremento de temperatura de 38°C.

Por lo tanto, ya tenemos todos los parámetros necesarios de la célula calculados para un funcionamiento de la nevera a una temperatura ambiente máxima de 30 °C.

La tabla 6.1 muestra un resumen de los resultados obtenidos en el presente apartado.

CELULA	Voltaje (V)	$Q_h$ (w)	I (A)	COP	$P_{elec}$ (w)
TE-127-2.0-2.5	8,5	50	4	0,47	34

Tabla 6.1: resumen de los resultados

La cantidad de calor que tiene que bombear la placa ( $Q_h = 50$  w) se tendrá que disipar instalando un radiador lo suficientemente grande en la cara caliente de la célula, con el fin de que no se creen potencias parásitas que nos hagan tener que recalcular todo el sistema. La elección del radiador se va a calcular en el siguiente apartado.

## 6.4 Elección de los disipadores

### 6.4.1 Disipador de la cara caliente

Hemos calculado la potencia calorífica total que va a ser generada en la cara caliente de nuestra célula, la cual es la suma del calor absorbido en la cara fría y el calor generado por la potencia consumida.

En el caso de que no hagamos nada para disipar de alguna manera esta potencia, se convertirá en calor que aumentará la temperatura de la cara caliente de la célula de forma extraordinaria. Este calor volverá a la cara fría por el efecto de conducción interna haciendo que la célula no refrigere y pudiendo incluso destruirla, haciendo que se fundan los termopares de silicio que la componen [27].

Es, pues, absolutamente necesario que ese calor acumulado sea disipado al ambiente de alguna manera. La célula por si sola no es capaz de disipar todo el calor que genera de forma eficaz, por lo tanto será necesario instalar algún tipo de dispositivo que nos ayude a transportar ese calor de la cara caliente al exterior. Estos dispositivos se llaman radiadores o disipadores [24].

Lo que va a conseguir el radiador es una transferencia de calor por conducción de la cara caliente a la estructura de este. Esta estructura se calentará más o menos en función del material y forma que tenga, y en función también del buen contacto que tenga con la célula. Así conseguiremos que en lugar de calentarse la célula (que es lo que no podemos permitir), se caliente el radiador. Al radiador se le suele aplicar también un ventilador que fuerce que todo ese calor que “extrae” de la célula sea enviado rápidamente al ambiente haciendo que este sea capaz de absorber todavía más calor [24].

El diseño de estos consta de una superficie lisa, para hacer un buen contacto con la superficie del componente electrónico, y un cuerpo con múltiples aletas que hacen que la superficie en contacto con el aire sea máxima para una mejor disipación del calor.

Sabiendo que la potencia calorífica que tenemos que disipar es de  $Q_h = 50 \text{ W}$ , tal como se ha calculado en el apartado anterior, y el incremento de temperatura entre la superficie de la cara caliente de la placa y la temperatura ambiente es de  $\Delta T_{\text{exterior}} = 8^\circ\text{C}$ , podemos realizar una analogía eléctrica, para poder averiguar analíticamente que disipador vamos a necesitar.

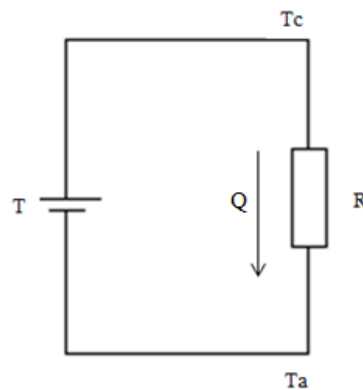


De esta forma podemos suponer las siguientes equivalencias:

Analogía térmica – Ley de Ohm	
Intensidad (I)	Calor (Q)
Tensión (V)	Temperatura (T)
Resistencia (R)	Resist. térmica (R)
$V = I \cdot R$	$T = Q \cdot R$

**Tabla 6.2: tabla de equivalencias**

La figura 6.7 muestra el circuito equivalente en la disipación de calor.



**Figura 6.7: circuito equivalente**

Siendo:

$T_c$ : Temperatura en la superficie de la cara caliente de la célula ( $38^{\circ}\text{C}$ )

$T_a$ : Temperatura ambiente ( $30^{\circ}\text{C}$ )

$R$ : Resistencia térmica del disipador ( $R$ )

$Q$ : calor (50 w)

Despejando de la ecuación de la ley de Ohm térmica, podemos conocer la resistencia térmica máxima que deberá tener el disipador.

$$R = \frac{T_c - T_a}{Q_h} = \frac{8}{50} = 0,16 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

De este modo tenemos que la resistencia térmica máxima que debe tener el disipador ha de ser de  $0,16 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ . Si intentamos buscar disipadores encontramos que para conseguir un disipador con esas características, las dimensiones de este han de ser muy elevadas, incluso el disipador tendría que tener unas dimensiones tan o más grandes que la propia nevera. De esta forma se complicaría mucho el montaje y aumentaría el peso de la caja considerablemente.

La figura 6.8 muestra las dimensiones de un disipador comercial del fabricante ABL como ejemplo. Este disipador, modelo 500SP, puede conseguir una resistencia térmica de 0,16 °C/W. Como se puede comprobar, las dimensiones del disipador (500x160x84) son incluso mayores que las de la propia caja [28].

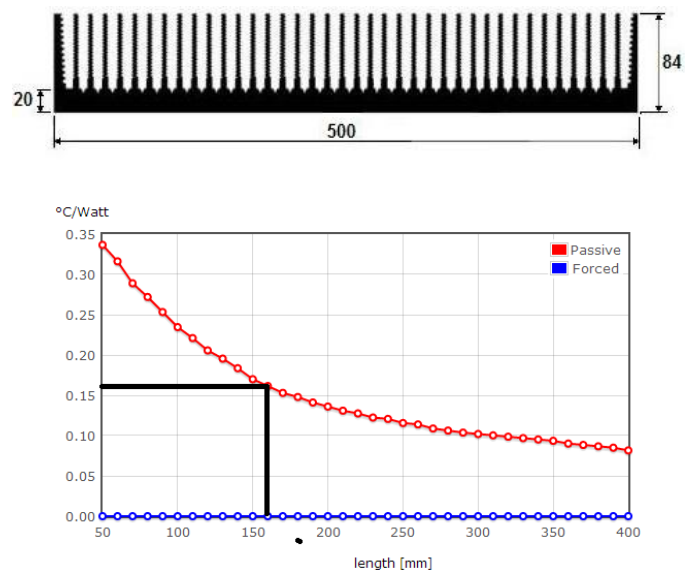


Figura 6.8: dimensiones del disipador ABL 500SP [28]

Para reducir las dimensiones del disipador y conservar sus características, debemos considerar de forma obligada la necesidad de montar un ventilador que fuerce la extracción de calor. Aun así, sigue siendo difícil conseguir que éste sea de unas dimensiones aceptables para conseguir un buen rendimiento de la célula.

Finalmente, se ha elegido un radiador con un ventilador acoplado que es capaz de disipar la cantidad de calor necesaria. El disipador elegido es del fabricante ALPHA, modelo ALPHA FH8040MU [29]. En el anexo IV se puede observar la hoja de datos proporcionada por el fabricante para este modelo en concreto.

Como se puede comprobar en la figura 6.9 este disipador presenta unas características óptimas para conseguir disipar el calor con el incremento de temperatura establecido, por cuanto que posee una resistencia térmica de 0,16 °C/W.

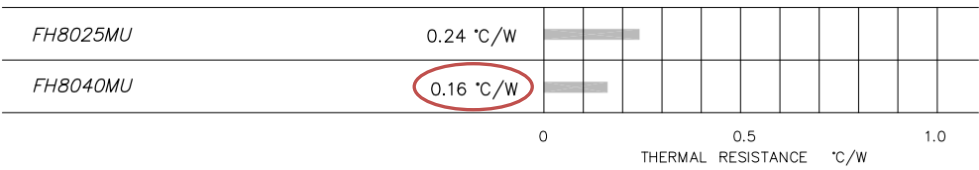
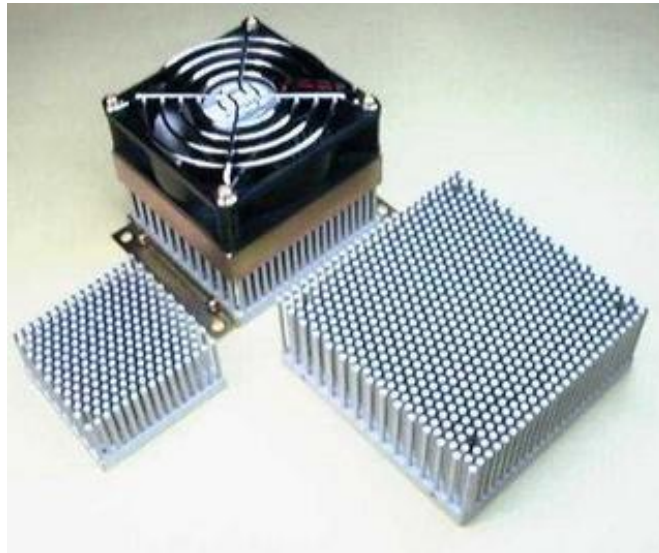


Figura 6.9: resistencia térmica disipador ALPHA FH8040MU

Además las dimensiones del disipador ALPHA FH8040MU (80x80x40 mm) son adecuadas para adaptarlas a las de la nevera (317x317x317 mm) [29]. Aunque los disipadores son algo más grandes que la célula, se ha rellenado esta zona con material aislante, como se puede observar en la figura 6.12.

La imagen figura 6.10 muestra un ejemplo de varios disipadores del modelo ALPHA FH con diferentes dimensiones.



**Figura 6.10: disipadores modelo ALPHA FH y ventilador [29]**

#### **6.4.2 Disipador de la cara fría**

Como se ha comentado previamente, también es necesario que el calor absorbido en la cara interior sea transmitido a todo el volumen interno de la caja. Para ello también es necesario incorporar un disipador en contacto directo con esa parte. De esta forma, el calor presente en el interior de la caja es conducido con mayor eficacia hacia la cara fría de la célula que lo absorberá enviándolo hacia la cara caliente donde estará el otro disipador, que extraerá ese calor hacia el ambiente.

Se va a estudiar la posibilidad de instalar en el interior de la nevera un disipador sin ventilador, puesto que la potencia calorífica que absorbe la célula del interior de la caja ( $Q_c$ ) es menor que la potencia calorífica que cede al exterior ( $Q_h$ ). Por tanto, el tamaño de este disipador no ha de ser tan grande como el elegido para disipar el calor en la cara caliente en el apartado anterior.

Sabiendo que la potencia calorífica absorbida en la placa es de  $Q_c = 16 \text{ W}$  y que el incremento de temperatura entre el interior de la nevera y la cara fría de la placa es de  $\Delta T_{\text{interior}} = 5^\circ\text{C}$ , se realiza la misma analogía eléctrica mostrada en el apartado anterior, con el fin de averiguar analíticamente que disipador vamos a necesitar.

Despejando de la ecuación de la ley de Ohm térmica, podemos conocer la resistencia térmica máxima que deberá tener el disipador.

$$R = \frac{T_c - T_a}{Q_c} = \frac{5}{15.97} = 0,313^\circ\text{C/W}$$

De esta forma tenemos que la resistencia térmica máxima que debe tener el disipador ha de ser de  $0.313^\circ\text{C/W}$ . Si intentamos buscar disipadores, encontramos que para conseguir un disipador con esas características las dimensiones del disipador siguen siendo elevadas. Pero a diferencia que lo que sucedía en el apartado anterior, ahora si que tenemos la posibilidad de instalar un disipador sin ventilador acoplado con unas dimensiones adecuadas y con una resistencia térmica de valor  $R_{\text{termica}} = 0,313^\circ\text{C/W}$ .

Se ha elegido un disipador comercial del fabricante ABL, modelo 160AB que puede conseguir una resistencia térmica de  $0,313^\circ\text{C/W}$  con las dimensiones (200x210x40) [28]. La figura 6.11 muestra las dimensiones del disipador 160AB para conseguir la resistencia térmica calculada.

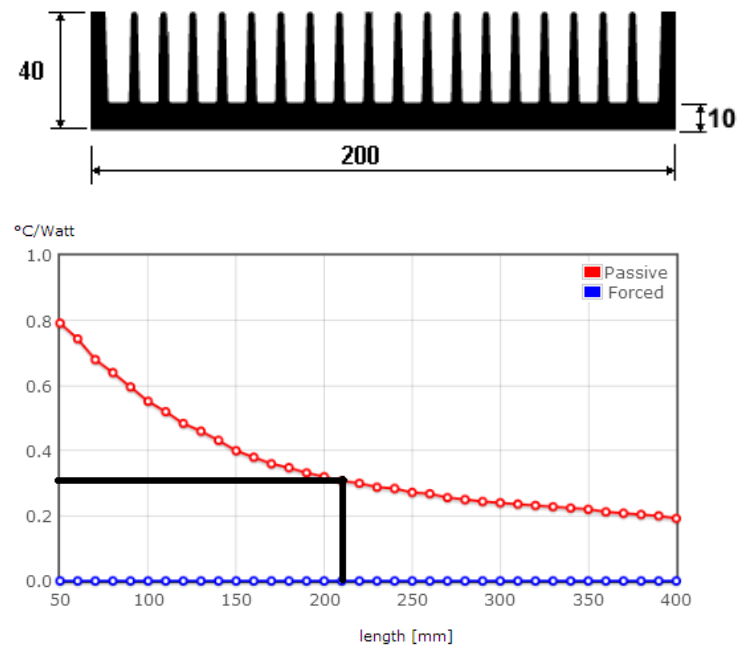


Figura 6.11: dimensiones del disipador ABL 500SP [28]

## 6.5 Montaje

El montaje de la célula en la caja es algo que ya se ha ido comentado en todos los apartados anteriores de alguna u otra forma.

Haciendo un resumen de todo, necesitamos una célula en la que tenemos que montar un disipador suficientemente efectivo en la cara que vamos a calentar; un disipador de menor tamaño en la cara que va a absorber calor; hemos de aislar térmicamente los dos disipadores y hemos de montar todo el conjunto en la caja dejando la parte que ha de disipar el calor en el exterior y la parte que tiene que absorber el calor en el interior. Para que haya las mínimas fugas de frío también debemos aislar el interior del exterior lo máximo posible.

El montaje de la célula y los radiadores en la caja queda esquematizando en la figura 6.12.

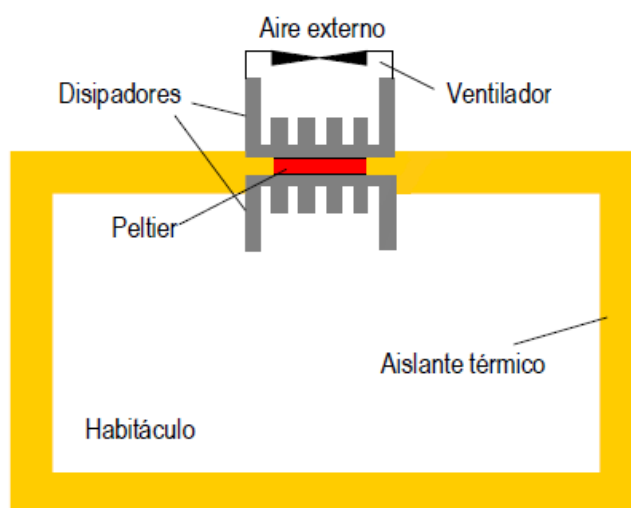


Figura 6.12: esquema del montaje de la célula y los radiadores en la caja

## 6.6 Funcionamiento habitual

Como se ha comentado anteriormente, para calcular el diseño que tendrá la nevera y cada uno de sus componentes se ha utilizado la temperatura más crítica a la que pueda estar expuesta la caja ( $T_{\text{ambiente}} = 30^{\circ}\text{C}$ ). Una vez calculado este diseño, se va a estudiar cual es el funcionamiento habitual de la nevera para uso doméstico o para transporte mediante un vehículo. Para ello, se ha estimado un funcionamiento habitual a una temperatura ambiente de  $23^{\circ}\text{C}$ .

El proceso para realizar el cálculo es similar al realizado en los apartados anteriores y por tanto se va a mostrar de forma resumida en el presente apartado.

Primero se va a calcular la resistencia térmica de la caja y el flujo de pérdidas de calor en la caja. Después de realizar los cálculos con ayuda del programa EES (Se pueden observar los cálculos y resultados en el II), el flujo de pérdidas de calor que tendrá la caja será:

- $Q_c = 10,7 \text{ W}$

Después, una vez calculado el valor de la resistencia térmica del disipador interior en el apartado 6.4.2, se puede calcular mediante la siguiente ecuación el incremento de temperatura entre el interior de la nevera y la cara fría de la placa Peltier.

$$\Delta T_{int} = R_{int} \cdot Q_c = 0,31 \cdot 10,7 = 3,35 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 3,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

En cambio, la diferencia de temperatura entre la superficie caliente de la placa y la temperatura ambiente se tiene que estimar ya que a priori no conocemos la potencia calorífica que tendrá que disipar la célula ( $Q_h$ ). Se ha estimado también un incremento de temperatura de  $3,5^{\circ}\text{C}$ , más adelante se comprobará si es válida dicha estimación.

La figura 6.13 muestra los siguientes incrementos de temperatura elegidos.

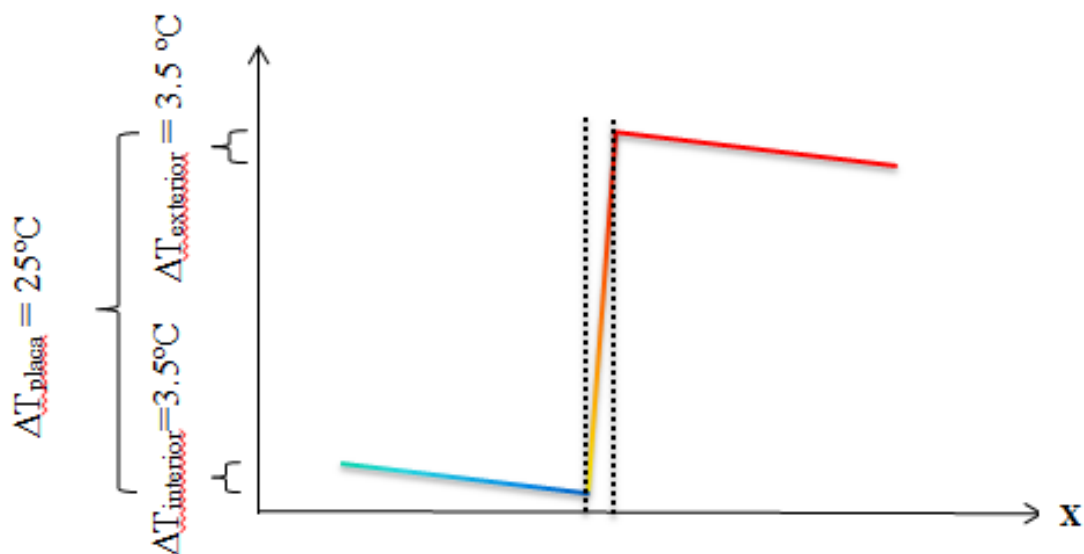


Figura 6.13: esquema de las diferencias de temperatura elegidas

Posteriormente, se van a calcular, de idéntica forma que en apartado 6.3, los parámetros necesarios apoyándonos en la hoja de datos del fabricante del módulo TE-127-1.4-2.5, la cual se puede consultar en el Anexo III.

En la figura 6.14 se han trazado las líneas adecuadas en las curvas características de la célula con los siguientes datos de partida :

- $Q_c = 10,7 \text{ W}$
- $\Delta T_{\text{placa}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

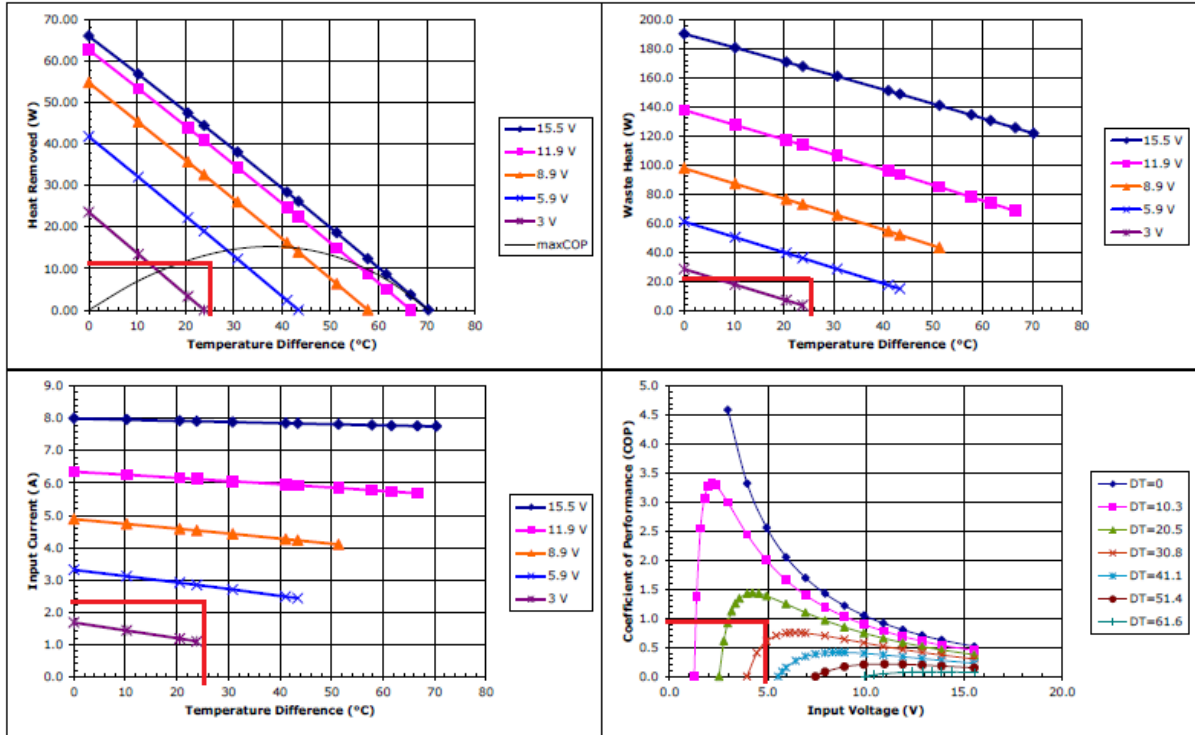


Figura 6.14: curvas características de la célula.

La tabla 6.3 muestra un resumen de los resultados obtenidos para una  $T_{\text{amb}}=23^{\circ}\text{C}$ .

CELULA	Voltaje (V)	$Q_h$ (w)	I (A)	COP	$P_{\text{elec}}$ (w)
TE-127-2.0-2.5	4,9	22	2,3	0,95	11,3

Tabla 6.3: resumen de los parámetros de la célula

Finalmente, se puede comprobar mediante la siguiente ecuación que la estimación realizada en el presente apartado ( $\Delta T_{\text{exterior}} = 3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) es válida.

$$\Delta T_{\text{ext}} = R_{\text{ext}} \cdot Q_h = 0,16 \cdot 22 = 3,52 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 3,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

## 6.7 Resultados

En los apartados previos se han mostrado los resultados correspondientes al funcionamiento de la célula Peltier exclusivamente. El objetivo final del trabajo es evaluar cual es el rendimiento de la nevera en su conjunto. Para ello, hay que tener en cuenta todos los accesorios que se le han ido colocando en su montaje y que utilicen como principio de funcionamiento algún consumo de energía, en este caso energía eléctrica.

En la nevera diseñada en este trabajo hay que recordar que el único accesorio que se ha montado a la caja y consume energía eléctrica, además de la propia célula, es el ventilador que se ha necesitado para conseguir disipar toda la energía calorífica del foco caliente.

El ventilador utilizado, el cual va acoplado al disipador ALPHA FH8040MU, es del fabricante ORIENTAL MOTOR, modelo T-MD825B-12-G [30]. EN el anexo IV se muestran las especificaciones de dicho modelo. Sus principales características son:

- Dimensiones: 80x80x25.4
- Voltaje DC: 12 V
- Intensidad: 0,25 A
- Potencia eléctrica: 3W
- Rev/min: 3800 RPM

Ya conocemos cual es el consumo eléctrico del ventilador y de la célula utilizada en la nevera y, por consiguiente, ya podemos calcular teóricamente el COP de la nevera en su conjunto mediante la siguiente ecuación:

$$COP = \frac{Q_c}{W_{elec}} = \frac{Q_c}{W_{célula} + W_{ventilador}}$$

Mediante la ecuación anterior se ha calculado el valor del COP de la nevera termoeléctrica, tanto para el funcionamiento habitual de la nevera ( $T_{ambiente} = 23^{\circ}C$ ) como para el funcionamiento en condiciones extremas de la nevera ( $T_{ambiente} = 30^{\circ}C$ ).

En la tabla 6.4 se muestran los resultados obtenidos.

Tambiente	Qc (W)	Wcélula (W)	Wvent (W)	Wtotal (W)	COP
30°C	16	34	3	37	0,432
23°C	10,7	11,3	3	14,3	0,748

Tabla 6.4: resumen de los resultados obtenidos a diferente temperatura ambiente



## 6.8 Nevera termoeléctrica vs nevera convencional con compresor

En este apartado se pretende comparar el funcionamiento de la nevera termoeléctrica que hemos diseñado con el de una nevera convencional con compresor. Para comparar técnicamente ambas neveras el valor más significativo que podemos cotejar es el coeficiente de rendimiento energético (COP) que tiene la nevera en su conjunto. Este rendimiento va a indicar cuál tiene mayor capacidad de refrigeración con una misma potencia eléctrica consumida.

La tabla 6.5 muestra el coeficiente de rendimiento energético que nos proporciona tanto la nevera termoeléctrica que hemos diseñado como una nevera convencional con compresor que podemos encontrar en el mercado.

Nevera	COP
Termoeléctrica	0,432 - 0,748
Convencional con compresor	3 – 5,5

Tabla 6.5: Nevera termoeléctrica vs nevera convencional (COP)

Se puede observar en la tabla que, nitidamente, el coeficiente de rendimiento energético (COP) que nos proporciona una nevera convencional con compresor es mucho más elevado, incluso 6-7 veces mayor. A pesar de ello, la nevera termoeléctrica que hemos diseñado puede ser útil en algunas situaciones ya que tiene una serie de ventajas adicionales que se muestran a continuación [18].

### Ventajas de una nevera termoeléctrica

- Capacidad de enfriar y calentar en el mismo módulo
- Reducido tamaño
- Reducido peso
- No produce prácticamente ruidos
- No tiene partes móviles

## 7 GENERADOR RECUPERADOR DE GASES

---

### 7.1 Introducción

En el presente capítulo se va a estudiar la modelización de un generador termoeléctrico Seebeck colocado en los gases de escape de un automóvil. Este generador termoeléctrico se va a modelizar con diferentes células Seebeck, las cuales van a aprovechar la diferencia de temperatura existente entre el exterior del tubo de escape y los propios gases de escape, para generar electricidad de forma sin costes adicionales.

### 7.2 Características y dimensiones de las células Seebeck

Lo primero que se va a realizar es la elección del diseño que van a tener las células Seebeck, así como el acoplamiento al tubo de escape de las mismas. Las células que vamos a colocar van a ser un modelo HZ-2 de 29x29 mm cada una, con las siguientes características [31]:

$\alpha = 0,008 \text{ V/}^{\circ}\text{C}$  (coeficiente de Seebeck)

$R_g = 3.89 \text{ } \Omega$  (resistencia térmica)

$k = 0,097 \text{ W/K}$  (conductividad)

Para acoplarlas al tubo de escape se van a utilizar una serie de canales, por los cuales se forzarán circular a los gases de escape. Estos canales realmente están formados mediante disipadores de aluminio ( $k=209,3 \text{ W/mK}$ ) a los que, además, se les han añadido aletas. Justo en la parte inferior de estos disipadores se colocarán las células Seebeck. Se ha elegido colocar 25 células por cada canal, por tanto, cada canal tendrá 725mm de longitud. Este es un parámetro se puede modificar en función de las necesidades y de las dimensiones del tubo de escape.

Para entender mejor el diseño del modelo que se va a realizar se muestra la figura 7.1, donde se pueden observar las dimensiones de un único canal y el recorrido de los gases a través del canal. En él también se pueden observar las diferentes temperaturas que nos encontramos, las cuales se van a explicar detalladamente en el apartado 7.3.3.

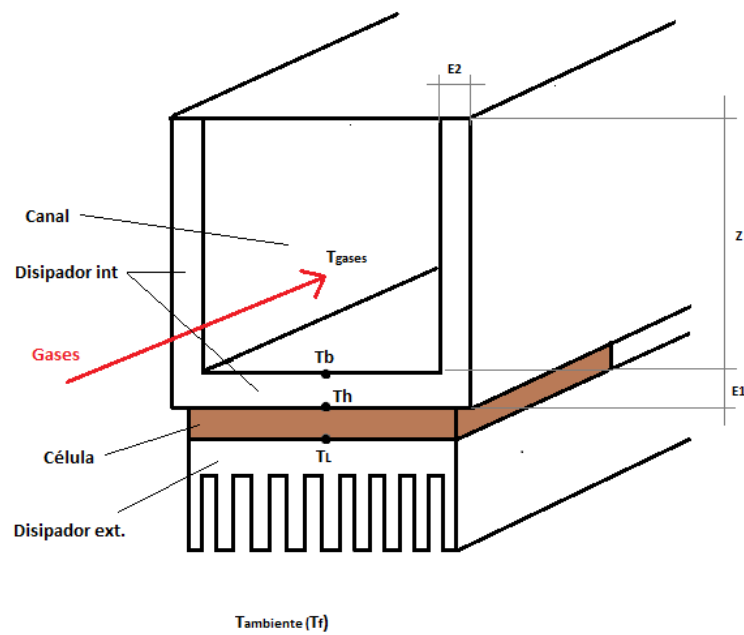


Figura 7.1: esquema de recorrido de los gases a través de un canal

Siendo:

$e1 = 5 \text{ mm}$

$e2 = 5 \text{ mm}$

$z = 58 \text{ mm}$

La figura 7.2 muestra como podría ser el acoplamiento de varios canales en el tubo de escape.

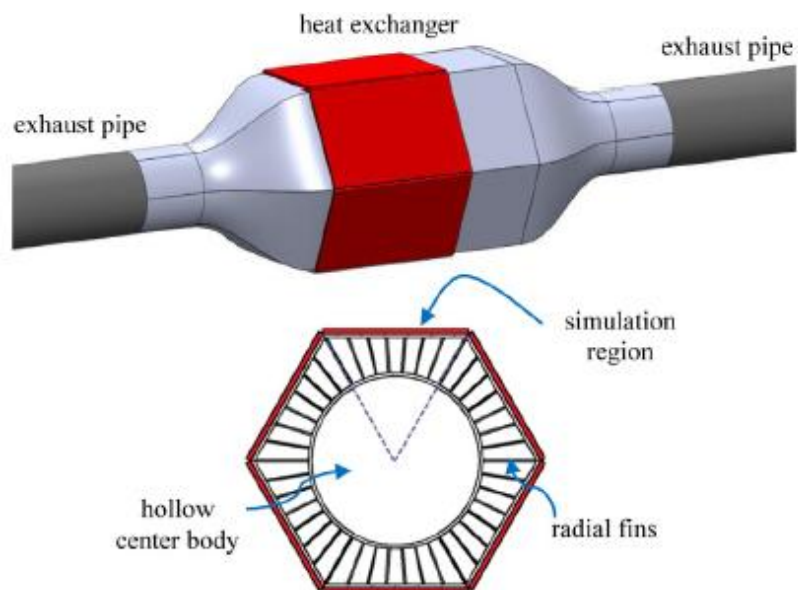


Figura 7.2: esquema del acoplamiento de varios canales en el tubo de escape [32]

## 7.3 Cálculos

Una vez conocidas las dimensiones para el acoplamiento en el tubo de escape, se van a realizar los cálculos para conocer la potencia eléctrica que pueden conseguir la suma de las células Seebeck. La potencia eléctrica de cada una de las células será:

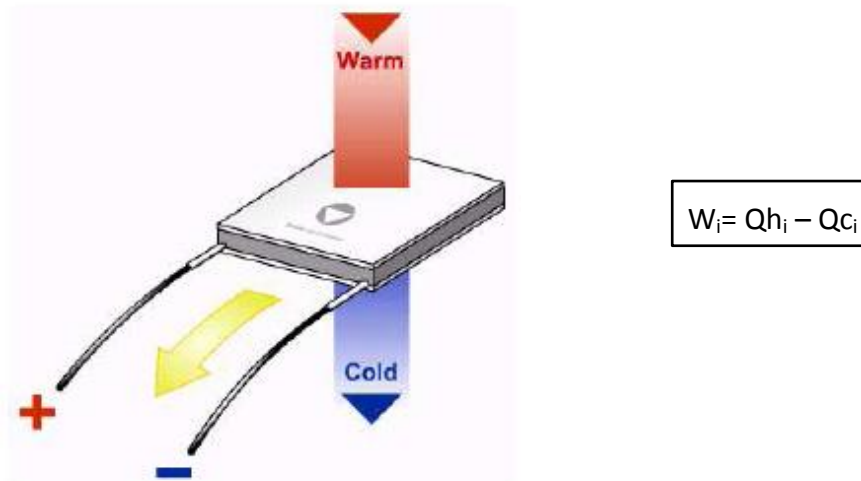


Figura 7.3: esquema de un módulo generador

En este apartado se van a mostrar, de forma sintetizada, los cálculos realizados para conocer la potencia eléctrica que nos generará la célula. Estos cálculos se han realizado de forma más compleja y detallada en el anexo II con la ayuda del programa informático EES.

### 7.3.1 Coeficientes de convección

En el modelo habrá que calcular tanto el coeficiente de convección interior como el exterior. El coeficiente de convección interior será el formado entre la cara caliente de la célula Seebeck y los gases de escape que circulen a través de los canales; mientras que el coeficiente de convección exterior será el formado entre la cara fría de la célula y el exterior.

#### Coeficiente de convección exterior

Para calcular el coeficiente de convección exterior, se han colocado junto al disipador unas aletas y se ha estimado un coeficiente de convección equivalente, con equivalente se quiere decir que la  $h$  es menor pero se compensa con una superficie extendida ( $h_{\text{ext}} = 600 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) [32].

### Coeficiente de convección interior

El coeficiente de convección interior se ha calculado de forma empírica mediante la correlación de Gnielinski [33], a continuación se muestra de forma simplificada las ecuaciones utilizadas.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}$$

$$Nu = \frac{h_{int} \cdot D_h}{k_{aire}}$$

Los cálculos se pueden consultar en el código fuente del programa EES en el anexo II. Una vez realizados estos cálculos el resultado obtenido ha sido  $h_{int} = 28,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### **7.3.2 Eficiencia de las aletas del disipador interior**

Para realizar el modelo con mayor exactitud, se ha calculado la eficiencia de las aletas del disipador interior [33]. Mediante la siguiente ecuación y estimando aletas rectangulares rectas, se ha calculado la eficiencia de las aletas:

$$\eta = \frac{\tanh(m \cdot L)}{m \cdot L}$$

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot h_{int}}{k \cdot e2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 28,33}{209,3 \cdot 0,005}} = 7,358$$

$$\eta = \frac{\tanh(7,358 \cdot 0,058)}{7,358 \cdot 0,058} = 0,9434$$

Siendo:

L: altura de las aletas (Z en la figura 7.1)

$h_{int}$  : coeficiente de convección interior

k : conductividad del material (aluminio)

e2: espesor de la aleta

### 7.3.3 Temperaturas superficiales de las células

Para calcular la potencia eléctrica que nos va a proporcionar cada una de las células necesitamos conocer, entre otras cosas, la temperatura superficial caliente y fría de la placa seebeck. Como puntos de partida, las únicas temperaturas que podemos conocer son la temperatura inicial de los gases ( $T_{\text{gases}}=773 \text{ K}$ ) y la temperatura ambiente ( $T_f= 300 \text{ K}$ ) [32].

Como se ha explicado a lo largo del trabajo, la temperatura superficial de las placas no coincide con la temperatura ambiente o de los gases, ya que se suelen colocar unos disipadores. Por tanto, para calcular las temperaturas superficiales de cada una de las placas se han aplicado principalmente, los conceptos de transferencia de calor que se pueden consultar en el anexo I.

Conocer el valor de la temperatura superficial de la cara fría de cada una de las placas es relativamente sencillo, puesto que se produce transferencia de calor por convección ( $h_{\text{ext}}$ ) entre la temperatura ambiente y la superficial de la cara fría de la célula. Esta temperatura se puede calcular aplicando la ecuación de convección, habida cuenta que conocemos todos los datos necesarios a excepción del calor cedido ( $Q_c$ ), que se calculará próximamente.

$$Q_c[i] = (T_L[i] - T_f) \cdot \text{delta\_x} \cdot \text{delta\_x} \cdot h_{\text{ext}}$$

Siendo:

$$\text{Delta\_x} = 29 \text{ mm (dimensiones de la célula)}$$

Por contrario, conocer la temperatura superficial de la cara caliente de las placas posee mayor dificultad ya que cada placa tendrá una temperatura superficial diferente. Esto se produce debido a la reducción de temperatura en los gases de escape a lo largo del tubo de escape.

Primero, se ha elegido una velocidad de los gases de valor  $v=12 \text{ m/s}$  [32]. Posteriormente, para realizar el cálculo se ha realizado un módulo dentro del programa EES, el cual nos permite calcular de forma iterativa la temperatura superficial de la cara caliente de cada una de las 25 placas del canal. El procedimiento que tiene el programa de forma resumida es el siguiente:

- Calcula la reducción de temperatura mediante un balance de energía entre una célula y la siguiente.

$$m \cdot c_p \cdot (T[i-1] - T[i]) = Q_h[i]$$

- Calcula mediante convección la temperatura en la base del disipador interior ( $T_b$ ), aplicándole el coeficiente de las aletas explicado anteriormente.

$$Q_h[i] = (T_{\text{celda}}[i] - T_b[i]) \cdot h_{\text{int}} \cdot (\text{delta\_x} \cdot (\text{delta\_x} - e_2) + (2 \cdot \text{delta\_x} \cdot z) \cdot \eta_{\text{aleta}})$$

- Calcula mediante conducción del propio disipador la temperatura superficial de la cara caliente de cada célula ( $T_h$ ).

$$Q_h[i] = (T_b[i] - T_h[i]) \cdot (\text{delta\_x} \cdot \text{delta\_x}) \cdot k_{\text{aluminio}} / e_1$$

### 7.3.4 Potencia eléctrica generada por las células

Finalmente, para poder calcular la potencia eléctrica que nos va a generar el conjunto de placas de un canal, se tendrá que calcular tanto el calor absorbido ( $Q_h$ ) como el calor cedido ( $Q_c$ ) de cada una de las células.

Una vez conocida la temperatura superficial caliente y fría de cada una de las células, mediante el mismo módulo predicho realizado en el EES se van calculando de forma iterativa tanto el calor absorbido ( $Q_h$ ) como el calor cedido ( $Q_c$ ) de cada una de las células. En el cálculo de la cantidad de calor absorbido y cedido por la célula estarán presentes los efectos Seebeck, Joule y la conductividad térmica de la propia célula. A continuación, se muestra el cálculo [31].

$$Q_{hi} = \alpha \cdot I \cdot T_h + k \cdot (T_h - T_L) - 0,5 \cdot I^2 \cdot R_g$$

$$Q_{ci} = \alpha \cdot I \cdot T_L + k \cdot (T_h - T_L) + 0,5 \cdot I^2 \cdot R_g$$

$$W_i = Q_{hi} - Q_{ci}$$

Como se puede comprobar, gracias a los cálculos realizados en este capítulo, podemos conocer todos los datos necesarios para calcular la potencia eléctrica que nos va a generar el conjunto de células, a excepción del valor de la intensidad al que estarán funcionando las placas. Como el valor de la intensidad se puede regular, se ha realizado una tabla paramétrica con la ayuda del programa EES, que nos permite conocer el valor de la intensidad para el cual se obtiene la potencia eléctrica más elevada. El resultado se va a mostrar en el siguiente apartado. El valor de la intensidad que circulará por las células se puede regular a través de una resistencia tal y como se muestra en la figura 7.4.

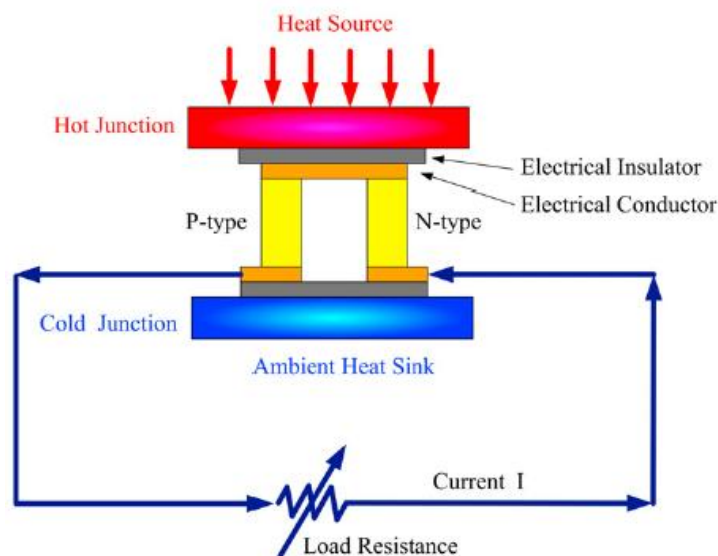


Figura 7.4: esquema de regulación de la intensidad en función de una resistencia [31]

## 7.4 Resultados

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos. Como se ha comentado con anterioridad, primero se ha calculado la potencia eléctrica que nos va a proporcionar cada una de las placas ya que no todas las células están funcionando con las mismas diferencias de temperatura debido a que se produce una disminución de temperatura en los gases de escape y, por tanto, cada célula nos proporcionará una potencia eléctrica diferente.

Después, se ha calculado la potencia eléctrica que nos va a generar el conjunto de células de una canal en función de la intensidad. Hay que recordar que se pueden colocar tantos canales como nos lo permitan las dimensiones del diseño. La potencia eléctrica total será la suma de todos estos canales.

También se ha evaluado el rendimiento del canal de la célula que será aproximadamente el mismo para todos los canales, el cual se ha calculado mediante la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{Welec}{Qh}$$

La tabla 7.1 muestra los resultados para cada canal (25 células) en función de la intensidad de funcionamiento de las células. Dicha tabla se ha realizado mediante el programa EES.

Int	Qc	Qh	W	$\eta$
0	514.6	514.6	-8.674E-18	-1.685E-20
0.05	515.3	517.2	1.867	0.003611
0.1	516.4	519.6	3.226	0.006209
0.15	517.8	521.9	4.078	0.007813
0.2	519.6	524	4.423	0.008441
0.25	521.6	525.9	4.263	0.008106
0.3	524.1	527.7	3.599	0.006821
0.35	526.9	529.3	2.433	0.004597
0.4	530	530.8	0.7657	0.001443
0.45	533.5	532.1	-1.402	-0.002635

Tabla 7.1: resultados de cada canal en función de la intensidad de funcionamiento



Como se observa en la tabla 7.1 tanto el mayor rendimiento como la potencia eléctrica generada por el conjunto de células se produce cuando se le aplica una intensidad de 0.2 A. Los resultados obtenidos por cada canal con esta intensidad han sido:

- $Q_c = 519,6 \text{ W}$
- $Q_h = 524 \text{ W}$
- $W_{elec} = Q_h - Q_c = 4,423 \text{ W}$
- $\eta = \frac{W_{elec}}{Q_h} = 0,0844 \rightarrow \boxed{\eta = 0,84 \%}$

Como colofón, se han calculado el número de canales por los que se va a obligar a circular a los gases. Para ello, necesitamos conocer el flujo másico total de fluido que estará circulando por el tubo de escape y el que está circulando por cada canal.

El flujo másico total podemos estimarlo a partir de la información dada en [32], utilizando las dimensiones donde se van a colocar el conjunto de canales [32], la velocidad [32] y densidad de los gases (suponiendo que se encuentra a presión atmosférica). El cálculo del flujo másico total se muestra a continuación:

$$M_t = A \cdot v \cdot \rho = 0,01269 \text{ m}^2 \cdot 12 \text{ m/s} \cdot 0,4566 \text{ kg/m}^3 = 0,0695 \text{ kg/s}$$

El flujo másico que circulará por cada canal se calcula de la misma forma a excepción de que las dimensiones serán menores (área de un canal). Este cálculo se ha realizado con la ayuda del programa EES y se puede consultar en el anexo II. Con todo ello se ha obtenido un flujo másico por cada canal de  $m_{canal} = 0,007626 \text{ kg/s}$ . Mediante la siguiente ecuación se pueden calcular el número de canales:

$$N^{\circ} \text{ canales} = \frac{m_t}{m_{canal}} = 9,11 \sim 9 \text{ canales}$$

$$\boxed{W_{elec} = 9 \cdot 4,423 = 39,807 \text{ W}}$$

Como se puede observar, la potencia eléctrica total que nos proporciona el conjunto de células es relativamente minúscula en comparación a la potencia que consume un motor de automóvil.

La potencia eléctrica total proporcionada por las células se puede mejorar modificando algunos parámetros del modelo realizado en el programa EES. Algunas de estas mejoras podrían ser:

- Colocar un número mayor de aletas.
- Colocar las aletas del disipador con más longitud.
- Utilizar un número mayor de células Seebeck.
- Seleccionar células Seebeck fabricadas con unos materiales que posean mejores características.

No obstante, se han realizado varios estudios y, en la actualidad, no es rentable utilizar este tipo de células en los tubos de escape de los automóviles, como ejemplo se muestra en la figura 7.5 los resultados obtenidos en un estudio realizado en un artículo durante el año 2013 [32].

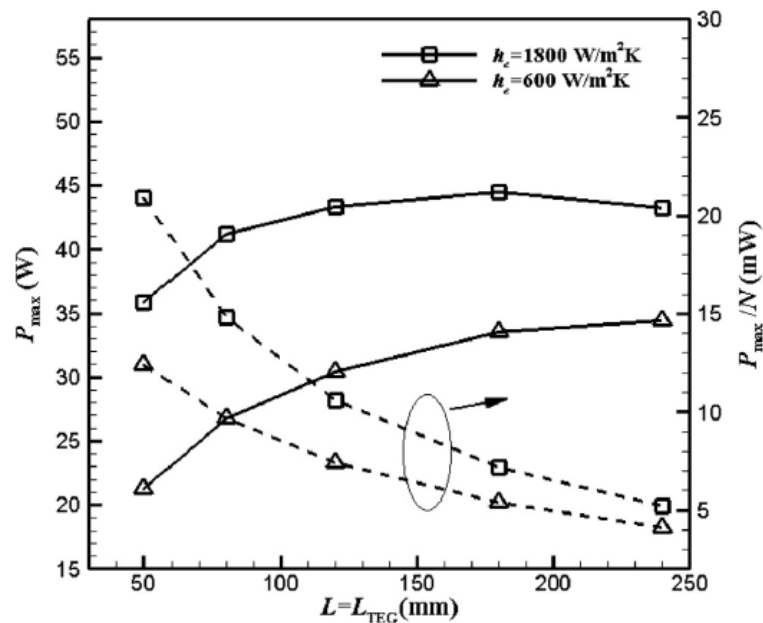


Figura 7.5: resultados obtenidos en un estudio realizado en 2013. [32]

En la figura se puede observar que para un coeficiente de convección exterior igual que el calculado en este trabajo ( $h_{ext} = 600$ ), la potencia que producen el conjunto de canales es similar al calculado en este trabajo, incluso menor debido a que en ese estudio se decidió colocar una menor distancia de células en serie.

## 8 CONCLUSIONES

---

En este trabajo se ha realizado una revisión de las aplicaciones termoeléctricas de mayor relevancia y un análisis detallado de dos ejemplos de aplicación con el objeto de estudiar la viabilidad de esta tecnología en la actualidad, tanto para refrigeración como para generación de electricidad a partir de calor residual.

Con el fin de realizar el análisis del ejemplo para refrigeración, se ha elegido diseñar una nevera termoeléctrica. Para ello, las aportaciones de mayor relevancia han sido:

- **Seleccionar los materiales y componentes de la nevera idóneos.** Se han calculado los materiales y componentes de la caja para un correcto funcionamiento de la nevera. Posteriormente se han consultado catálogos e información técnica de fabricantes para así, poder adecuarnos a los materiales y componentes existentes en el mercado.
- **Realizar una simulación del modelo mediante el programa informático EES.** Se ha realizado una simulación del modelo que se centra principalmente en la parte térmica.
- **Mostrar resultados del funcionamiento de la nevera diseñada.** Se han mostrado los resultados del funcionamiento en condiciones habituales y extremas de la nevera llegando a la conclusión de que este tipo de nevera tiene unas características técnicas inferiores a las neveras convencionales. En cambio, tiene la ventaja del confort que supone una nevera que no produce prácticamente ruido y puede enfriar o calentar con reducido tamaño y peso, lo cual obedece a que no posee partes móviles.

Con el fin de realizar el análisis del ejemplo para producción de electricidad se ha elegido modelizar un generador termoeléctrico capaz de aprovechar el calor residual de los gases de escape de un automóvil para generar electricidad sin costes adicionales. Para ello, las aportaciones de mayor relevancia han sido:

- **Diseñar el acoplamiento de las células al tubo de escape.** En este análisis se han elegido un conjunto de células Seebeck ya diseñadas y se ha propuesto una primera integración de las mismas en el tubo de escape de un automóvil.
- **Calcular los parámetros característicos.** Se ha realizado una primera simulación con la ayuda del programa EES que nos permite calcular los parámetros característicos del modelo para obtener unos resultados fiables.

- **Mostrar resultados prácticos del funcionamiento del generador Seebeck.** Se han mostrado resultados tanto de la potencia eléctrica que produce el generador termoeléctrico como el rendimiento que posee el mismo para una primera integración en el tubo de escape. Los resultados obtenidos han sido ratificados mediante una revista realizada el año 2013, donde se pueden observar unos resultados similares.
- **Proponer una serie de mejoras en el modelo.** Finalmente, se han propuesto una serie de soluciones para mejorar la eficiencia del modelo realizado, el cual es el primer paso.

Mediante la realización de ambos modelos termoeléctricos en este trabajo se ha comprobado que:

- **La tecnología termoeléctrica empieza a ser rentable para aplicaciones concretas.** Un ejemplo de ello es el caso de la nevera termoeléctrica realizada en este trabajo.
- **Se podrán desarrollar modelos más eficientes.** Se conseguirán desarrollar modelos que obtengan mejores resultados en el caso de que aparezcan nuevos materiales que garanticen una mejor eficiencia y un menor coste.
- **Posee una elevada importancia la correcta integración térmica.** se ha comprobado que, además de la correcta elección de los materiales termoeléctricos, también tiene una elevada importancia realizar un modelo con la integración térmica adecuada.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Miguel Angel Roque Serrano. "Diseño de un sistema de almacenaje de puros habanos controlando temperatura y humedad mediante termoelectricidad". Proyecto fin de carrera, Universitat Politècnica De Catalunya.
- [2] Rosa Angelica Angeles Zurita, José Eduardo Márquez Tavera. "Estudio de las características de los sistemas termoelectricos y su aplicación den refrigeración". Proyecto fin de carrera, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica, Unidad Profesional Azcapotzalco, Mexico.
- [3] Santiago Torno Tejedor y Andrés E. Sotelo Mieg. "Termoelectricidad, la energía del desequilibrio". Artículo: técnica industrial 262. (2006).
- [4] Libro: Aldo da Rosa, capítulo 5 "Thermoelectricity". (2009)
- [5] Artículos: Celdas Peltier. <http://www.hardside.com.ar/utills/peltier.htm> (2005).
- [6] D. M. Rowe "Thermoelectric handbook". Macro to Nano.
- [7] Jose M<sup>a</sup> Marín, Carlos monné, Javier Uche. "Transferencia de calor". Libro Área de Máquinas y Motores Térmicos, Ed. . Universidad de Zaragoza. P.3-20. (2007).
- [8] Descripción Células Peltier. <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/PELTIER.htm>
- [9] Basel I. Isamil, Wael H. Ahmed. "Thermoelectric Power Generation Usin Washte-Heat Energy as an Alternative Green Technology". Trabajo:Department of mechanical Engineering, Lakehead University, Canada. P 2,27-39. (2009).
- [10] Robert A. Taylor, Gary L. Solbrekken. "Comprehensive system-level optimization of thermoelectric devices for electronic cooling applications". Artículo Technol 31(1). (2008).
- [11] Titan Amanda TEC Cooler. (2006) <http://www.chw.net/2006/10/titan-amanda-tec-cooler/>
- [12] Reiyu Chein, Guanming Huang. Thermoelectric cooler application in electronic cooling. Artículo: Applied thermal Engineering 24. P 2207-2217. (2004).
- [13] Dongliang Zhao, Gang Tan. "A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications". Artículo: Applied thermal Engineering 66. P. 15-24. (2014).
- [14] Alejandro Nectalí Fernández. "Climatización mediante ventanas termoactivas basadas en células Peltier". Proyecto fin de carrera, Madrid. (2010).
- [15] Hyeung-sik Choi, Sangkook Yun, Kwang-il Whang. "Development of a temperature-controlled car-seat system utilizing thermoelectric device." Artículo: Applied thermal Engineering 27. P 2841-2849. (2007).
- [16] Thermal management applications. <http://www.gentherm.com/page/thermal-management-applications>
- [17] Daly, S. "Automotive air conditioning and climate control systems". (2006).

- [18] D. Astrain, J.G. Vian, J. Albizua. "Computational model for refrigerators based on Peltier effect application". Artículo Applied thermal Engineering 25. P 3149-3162. (2010).
- [19] BCS, Incorporated. "Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry" Trabajo:Industrial technologies program. (2008).
- [20] Francis Stabler. "Automotive Thermoelectric Generator Design Issues". Trabajo: DOE Thermoelectric Applications Workshop.
- [21] Molan Li. "Thermoelectric-Generator-Based DC-DC Conversion Network for Automotive Applications. Master of Science Thesis Stockholm, Sweden. (2011).
- [22] Takenobu Kajikawa. "Overview of Progress in R&D for Thermoelectric Power Generation Technologies in Japan". Trabajo: Shonan Insititute of Technology, Japan. (2012).
- [23] Manual de instrucciones del programa informático Engineering Equation Solver <https://engineering.purdue.edu/ME300/documents/EES-manual.pdf>
- [24] Antonio Ayala del Rey. "Diseño de una caja de refrigeración por termocélulas". Proyecto fin de carrera, Universitat Politècnica De Catalunya. (2009).
- [25] Documentación técnica de Células Peltier y Seebeck. <https://www.tetech.com/>
- [26] Documentación técnica de Células Peltier y Seebeck. <http://www.lairdtech.com/>
- [27] Franciso Javier Meca Meca, José Antonio Jiménez Calvo. "Horno-nevera basado en células Peltier para ensayo térmico de dispositivos electrónicos". Trabajo: Departamento de electrónica, Escuela Politécnica Universidad de Alcalá. (2007).
- [28] Documentación técnica de disipadores comerciales. <http://www.abl-heatsinks.co.uk/>
- [29] Documentación técnica de disipadores, ventiladores y células Peltier y Seebeck. <http://alphanovatech.com/en/index.html>
- [30] Documentación téccnica ventiladores <http://www.orientalmotor.es/>
- [31] Y.Y. Hsiao, W.C. Chang, S.L. Chen. "A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine". Energy 35. P. 1447-1454. (2010).
- [32] Chien-Chou Weng, Mei-jiau Huang. "A simulation study of automotive waste heat recovery using a thermoelectric power generator". International journal of thermal sciences 71. P. 302-309. (2013).
- [33] Yunus A. Çengel. "Trasnferencia de calor y masa". P.473-479. (2007).
- [34] Efecto Joule. <http://mantenimientoelectricojep.blogspot.com.es/2011/11/ley-de-joule.html>
- [35] Ventana termoelectrica. <http://www.negociotecnologico.com/2012/01/ventana-termoelectrica/>

