

El calor es el proceso de intercambio de energía térmica entre dos sistemas debido a una diferencia de temperatura <sup>(4)</sup>. Es importante analizar esta definición ya que es habitual escuchar expresiones en las que se le atribuye una cantidad de calor a un cuerpo. Lo que un cuerpo tiene es energía térmica. El calor, visto desde la física, no se tiene, el calor es una transferencia.

Se entiende como transferencia o transmisión de calor al traspaso de energía térmica entre dos cuerpos sin importar su estado, ya sea sólido, líquido o gaseoso. Según el Primer principio de la termodinámica, cuando dos cuerpos se encuentran en contacto, éstos tienden al equilibrio térmico, es decir, a igualar sus temperaturas. De esta manera, si un cuerpo se encuentra en contacto con otro a una temperatura diferente, se produce una transferencia de calor del cuerpo caliente al frío hasta alcanzar el equilibrio térmico. La transferencia de calor puede producirse por tres métodos: conducción, convección y radiación térmica. <sup>(5)</sup>

### A1.1. Métodos de transmisión de calor

#### A1.1.1. Conducción

La transmisión de calor por conducción es un proceso basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia, por el que el calor fluye desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura. La transmisión se produce por vibración de los átomos del material. El medio puede ser sólido, líquido o gaseoso, aunque en líquidos y gases solo se da la conducción pura si se excluye la posibilidad de convección. <sup>(4,9)</sup>

La ecuación que describe el proceso de conducción de calor se denomina ley de Fourier. Esta ley establece que el flujo de transferencia de calor por conducción en un medio isótropo es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección. La propiedad física de los materiales que determina su capacidad para conducir el calor es la conductividad térmica. Para el caso simplificado de flujo de calor estacionario en una sola dirección, se obtiene la siguiente ecuación: <sup>(26)</sup>

$$\frac{Q}{\Delta t} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{x}$$

Donde:

$\frac{Q}{\Delta t}$  : calor transmitido por unidad de tiempo.

$k$  : conductividad térmica del material.

$A$  : área de la superficie de contacto.

$\frac{\Delta T}{x}$  : diferencia de temperatura por espesor del material.

Materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que otros como el vidrio, poseen conductividades cientos e incluso miles de veces menor. Los materiales cuyos coeficientes de conductividad térmica son pequeños conducen muy mal el calor y se conocen como aislantes. <sup>(4,9)</sup>

### **A1.1.2. Convección**

La transferencia de calor por convección se caracteriza porque se produce por medio de un fluido que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. El proceso real sigue siendo conducción aunque en el caso de la convección, la energía es transportada de un punto a otro del espacio a causa del desplazamiento de la masa fluida. La transferencia de calor por convección se expresa con la Ley del enfriamiento de Newton: <sup>(26)</sup>

$$\frac{Q}{\Delta t} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{inf})$$

Donde:

$\frac{Q}{\Delta t}$  : calor transmitido por unidad de tiempo.

$h$  : coeficiente de convección.

$A_s$  : área del cuerpo en contacto con el fluido.

$T_s$ : temperatura de la superficie del cuerpo.

$T_{inf}$ : temperatura del fluido lejos del cuerpo.

El coeficiente de convección o coeficiente de película depende de múltiples parámetros relacionados con el flujo del fluido a través del cual se da la convección. <sup>(26)</sup>

### A1.1.3. Radiación térmica

El fenómeno de la radiación consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material. Todos los materiales emiten y absorben radiación electromagnética en mayor o menor medida. De este modo, un cuerpo muy caliente emitirá, por norma general, gran cantidad de ondas electromagnéticas. La cantidad de energía radiante emitida o calor radiado viene dada por la Ley de Stefan-Boltzmann: <sup>(27)</sup>

$$P = \varepsilon \cdot (\sigma \cdot T^4) \cdot S$$

Donde:

$P$  : potencia radiada.

$\varepsilon$  : coeficiente que depende de la naturaleza del cuerpo (cuerpo negro:  $\alpha = 1$ ).

$\sigma$  : constante de Stefan – Boltzmann  $\left( \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$

$T$ : temperatura del material radiante.

$S$ : área de la superficie que radia.

En la siguiente imagen se muestra, de manera gráfica, un ejemplo en el que existe transferencia de calor según los tres métodos explicados anteriormente.

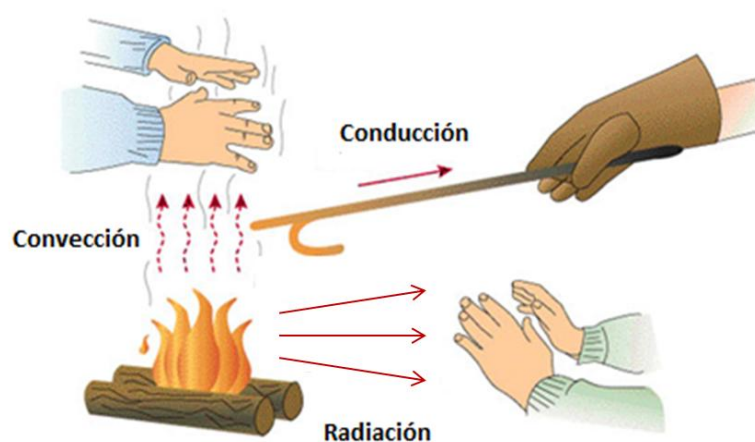


Figura A1.1.3. - 1. Métodos de transmisión de calor <sup>(15)</sup>

### A2.1. Efecto Peltier

El efecto Peltier fue descubierto en 1843 por el relojero y físico francés Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845) mientras investigaba el efecto Seebeck. Este efecto es considerado como el inverso del efecto Seebeck, es decir, es la capacidad de generar calor mediante la aplicación de una corriente eléctrica a la unión de dos materiales diferentes. <sup>(10)</sup>

El efecto Peltier hace referencia a la creación de una diferencia de temperatura debida a un voltaje eléctrico. Sucede cuando se hace pasar una corriente a lo largo de un conductor no homogéneo. La corriente genera la 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. <sup>(28)</sup>

La siguiente figura muestra el circuito de termopares que describen fenómeno Peltier.

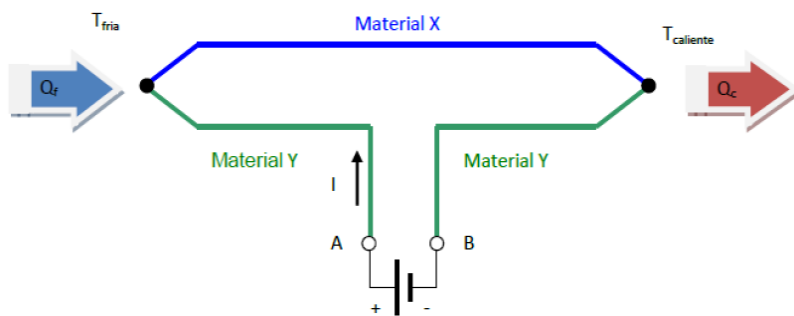


Figura A2.1. - 1. Circuito de termopares. Efecto Peltier <sup>(5)</sup>

Si se aplica un voltaje en los terminales A y B, 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. <sup>(5)</sup>

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

La siguiente ecuación muestra la expresión del efecto Peltier matemáticamente: <sup>(5)</sup>

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

Donde:

$Q$  : calor absorbido o cedido.

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

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

## A2.2. Efecto Thomson

El matemático y físico británico William Thomson descubrió cómo se relacionan y se complementan el efecto Seebeck y el efecto Peltier, añadiendo un nuevo efecto termoeléctrico, el llamado “efecto Thomson”.<sup>(28)</sup>

El efecto Thomson es un fenómeno que consiste en que, al hacer 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.

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

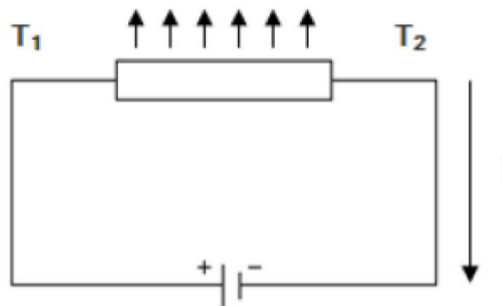


Figura A2.2. - 1. Esquema del funcionamiento del efecto Thomson<sup>(5)</sup>

La diferencia fundamental entre los efectos Seebeck y Peltier con respecto al efecto Thomson es que este último se da sólo para un material y no requiere la existencia de una soldadura entre dos materiales diferentes.

La potencia calorífica generada o absorbida por unidad de volumen en el conductor se expresa según la ecuación siguiente ecuación:<sup>(5)</sup>

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

Donde:

$Q$  : calor generado.

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

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

### A2.3. 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 electrones con los átomos del conductor. <sup>(2)</sup>

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 siguiente ecuación: <sup>(10)</sup>

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

Donde:

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

$R$  : resistencia eléctrica del material.

$I$  : corriente que atraviesa el 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. <sup>(8)</sup>

Los módulos Peltier, también conocidos como placas Peltier, son muy utilizados debido a su bajo coste y gran número de aplicaciones.

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. Están formados por un conjunto de termopares, situados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo, de tal forma que todos los termopares que absorben calor están situados a un lado de la placa y los que desprenden 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. <sup>(28)</sup>

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. <sup>(5)</sup>

### A3.1. Funcionamiento

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. 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. <sup>(4)</sup>

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 la cara fría de la célula sería el evaporador, donde se absorbe el calor. <sup>(28)</sup>

Si se quiere 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. Supone de gran ayuda la utilización de un ventilador para favorecer la disipación de calor.

Uno de los nuevos materiales es el denominado Skutterudite, material de pozo cuántico, estructura de super-redes y sistema de bajas dimensiones en desorden.

La palabra Skutterudite proviene de Skotterud, lugar de Noruega donde originariamente fue encontrada esta estructura formada por  $\text{CoAs}_3$ . Es una estructura cúbica y contiene 32 átomos por cada celda unitaria. <sup>(30)</sup>

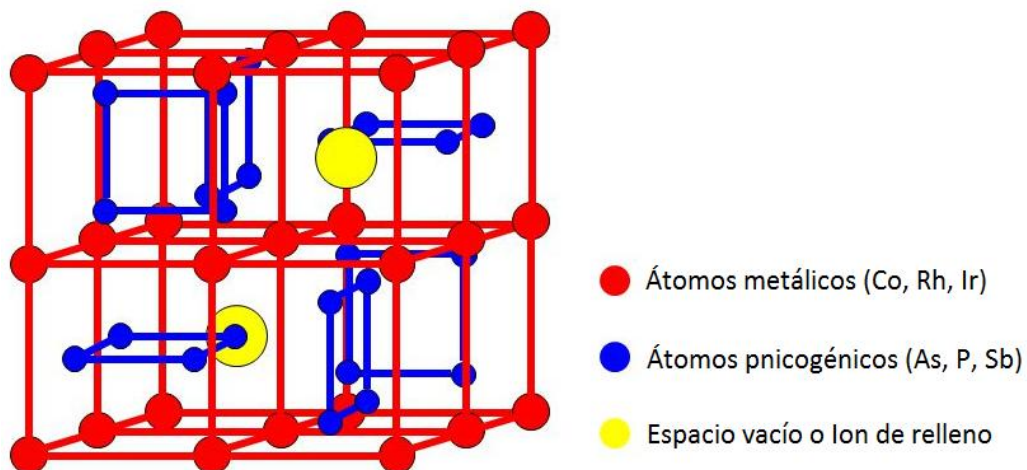


Figura A4. - 1. Estructura de Skutterudite <sup>(30)</sup>

La estructura general del Skutterudite es una estructura cristalina aunque puede variar dependiendo de los compuestos que la constituyen. Las técnicas de elaboración de estos materiales han ido evolucionando y como consecuencia se han podido obtener mejores resultados. Un paso importante lo constituye la posibilidad de realizar “nanoestructuración” lo que confiere una notable mejora en sus características. <sup>(30)</sup>

El sistema Skutterudite posee las condiciones básicas para obtener una figura de mérito Z alta. Los nuevos compuestos se forman a partir de la incorporación de átomos en el vacío intersticial. La incorporación de ciertos átomos en ese vacío intersticial permite reducir la conductividad térmica del material.

En cuanto a la estructura, la flexibilidad de la que carece la cerámica tradicional puede ser un inconveniente. La introducción del Kapton como material sustituto de la cerámica tradicional en el campo de las altas temperaturas, confiere a las células termoeléctricas una mayor adaptabilidad y resistencia a condiciones de trabajo desfavorables.

Recientes experimentos han demostrado que Skutterudites rellenas como el  $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$  consiguen una menor conductividad térmica interna que favorece el proceso termoeléctrico. Se obtienen valores de ZT muy eficientes en estos compuestos para temperaturas entre 770 K y 875 K. Desafortunadamente las figuras de mérito para valores de temperatura inferiores a 300 K son todavía pequeñas y los compuestos de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  son todavía más eficientes. <sup>(30)</sup>



## ANEXO 5. APLICACIONES PARA REFRIGERACIÓN Y CALEFACCIÓN

Todas las aplicaciones relacionadas con la refrigeración y la calefacción a través de materiales termoeléctricos basan su funcionamiento en el efecto Peltier.

Las uniones termoeléctricas consiguen alcanzar entre el 5% y el 10% de la eficiencia de un refrigerador ideal mientras que los sistemas convencionales de ciclo de compresión se sitúan entre el 40% y el 50%. Dada su relativa poca eficiencia, la refrigeración termoeléctrica suele utilizarse solo en entornos en los que importa más el mantenimiento que la eficiencia.

El rendimiento del refrigerador termoeléctrico de Peltier es función de la temperatura ambiente, la eficiencia de los intercambiadores de calor de las partes fría y caliente, la carga térmica, la geometría del módulo Peltier y sus parámetros eléctricos.

### A5.1. Refrigeración de microprocesadores

La refrigeración de los microprocesadores de algunos aparatos electrónicos como son los ordenadores, se realiza generalmente mediante ventiladores. Estos ventiladores producen un elevado ruido, son propensos a tener averías y no presentan gran eficiencia. Por ello, se han realizado diversos estudios para implementar un sistema de refrigeración termoeléctrica aplicable a este tipo de dispositivos.<sup>(30)</sup>

A través de una o varias células Peltier se transforma la energía eléctrica en un diferencial de temperatura. El lado frío de la célula se pondrá en contacto con el microprocesador mientras que calor generado en el otro lado de la célula se disipará mediante un pequeño ventilador. En este caso, sigue siendo necesario el uso de un ventilador pero se podrá reducir en gran medida su tamaño y velocidad. De esta manera, se consigue disminuir el ruido y el consumo del dispositivo a la vez que se reduce su peso y tamaño.<sup>(30)</sup>

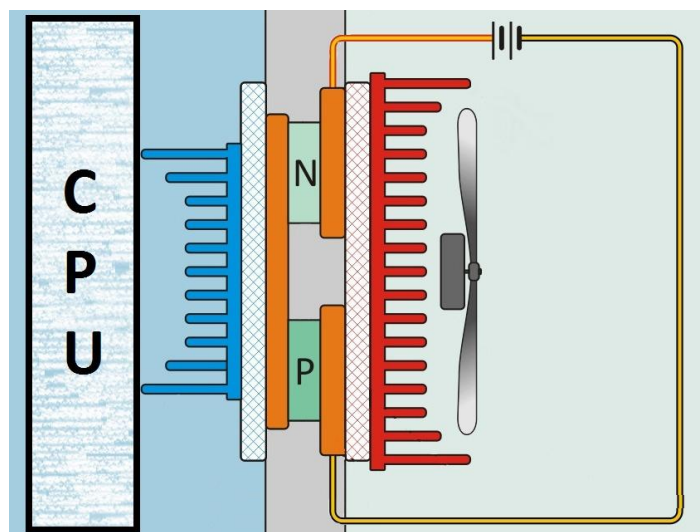


Figura A5.1. - 1. Refrigerado termoeléctrico en microprocesador<sup>(30)</sup>

## **A5.2. Refrigeración de neveras portátiles**

Una de las aplicaciones más extendidas de la termoelectricidad es la refrigeración de nevera portátiles. Estos dispositivos generan gran interés ya que además de poder transportarlos a cualquier lugar, no poseen partes móviles, por lo que el mantenimiento resulta muy sencillo.<sup>(31)</sup>

Sus principales inconvenientes son el precio y la necesidad de hacer uso de una fuente de corriente en todo momento.

## **A5.3. Calefacción y refrigeración de asientos en automóviles**

Los automóviles son el medio de transporte más utilizado. Debido a la gran cantidad de tiempo que pasamos en ellos, es necesario conseguir el máximo confort cuando los utilizamos. Es conocido que el frío contrae los músculos, dificultando los movimiento, así como el calor produce somnolencia y pérdida de reflejos.<sup>(28)</sup>

Desde hace años, existen en el mercado sistemas integrados calefactables en asientos, los cuales, mediante resistencias, son capaces de dotar calor a lo largo de su superficie.<sup>(25)</sup> 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 calor. Aunque de momento este sistema de climatización se encuentra en desarrollo, mediante este dispositivo de efecto Peltier, es posible enfriar o calentar a gusto del usuario con una actuación muy rápida.<sup>(32)</sup>

(La unidades utilizadas en los cálculos son las descritas en las Tablas 5.2 - 3. y 5.3 - 1.)

### A6.1. Potencia con los datos de partida

Cálculo de la potencia con los datos de partida. TFG Jorge Castillo Fernández

Datos

$$A = L \cdot L$$

$$e = 0,003$$

$$long_{semi} = 0,005$$

$$n = 120$$

$$\alpha_n = 195 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_p = 230 \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda_n = 1,07$$

$$\lambda_p = 1,28$$

$$\rho_n = 1,35 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho_p = 1,75 \cdot 10^{-5}$$

$$I_L = 8,5 \cdot 10^{-4}$$

$$T_C = 306,8$$

$$T_F = 294$$

$$\lambda_{PDMS} = 0,2$$

$$L = 0,03$$

$$\lambda_{Aire} = 26,3 \cdot 10^{-3}$$

$$g = 9,8$$

$$\beta_{Aire} = 3,33 \cdot 10^{-3}$$

$$\nu_{Aire} = 14,01 \cdot 10^{-6}$$

$$Pr_{Aire} = 0,7296$$

Flujos de calor

$$P = Q$$

$$Q = Q_C - Q_F$$

$$Q_C = \alpha \cdot I_L \cdot T_{Cs} + K \cdot (T_{Cs} - T_{Fs}) - 0,5 \cdot I_L^2 \cdot R_{int}$$

$$Q_F = \alpha \cdot I_L \cdot T_{Fs} + K \cdot (T_{Cs} - T_{Fs}) + 0,5 \cdot I_L^2 \cdot R_{int}$$

$$Q_C = \frac{T_C - T_{Cs}}{R_{PDMS}}$$

$$Q_F = \frac{T_{Fs} - T_F}{R_{PDMS} + R_{Aire}}$$

Coefficiente Seebeck, conductancia y resistencia interna

$$A_t = \frac{A}{n}$$

$$A_n = \frac{A_t}{2}$$

$$A_p = \frac{A_t}{2}$$

$$\alpha = n \cdot [\alpha_n + \alpha_p]$$

$$K = n \cdot \left[ \frac{\lambda_n \cdot A_n}{\text{long}_{\text{semi}}} + \frac{\lambda_p \cdot A_p}{\text{long}_{\text{semi}}} \right]$$

$$R_{\text{int}} = n \cdot \left[ \frac{\rho_n \cdot \text{long}_{\text{semi}}}{A_n} + \frac{\rho_p \cdot \text{long}_{\text{semi}}}{A_p} \right]$$

Resistencias térmicas PDMS y Aire

$$R_{\text{PDMS}} = \frac{e}{\lambda_{\text{PDMS}} \cdot A}$$

$$R_{\text{Aire}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

Coefficiente de convección




$$h = \frac{\text{Nusselt} \cdot \lambda_{\text{Aire}}}{L}$$

$$\text{Nusselt} = 0,59 \cdot \text{Ra}^{[1/4]}$$

$$\text{Ra} = \frac{g \cdot \beta_{\text{Aire}} \cdot (T_{\text{Fs}} - T_{\text{F}}) \cdot L^3}{\nu_{\text{Aire}}^2} \cdot \text{Pr}_{\text{Aire}}$$

$A = 0,0009$	$\alpha = 0,051$	$\alpha_n = 0,000195$	$\alpha_p = 0,00023$
$A_n = 0,00000375$	$A_p = 0,00000375$	$A_t = 0,0000075$	$\beta_{\text{Aire}} = 0,00333$
$e = 0,003$	$g = 9,8$	$h = 7,195$	$l_L = 0,00085$
$K = 0,2115$	$L = 0,03$	$\lambda_{\text{Aire}} = 0,0263$	$\lambda_n = 1,07$
$\lambda_p = 1,28$	$\lambda_{\text{PDMS}} = 0,2$	$\text{long}_{\text{semi}} = 0,005$	$n = 120$
$\text{Nusselt} = 8,207$	$\nu_{\text{Aire}} = 0,00001401$	$P = 0,000007398$	$\text{Pr}_{\text{Aire}} = 0,7296$
$Q = 0,000007398$	$Q_C = 0,06683$	$Q_F = 0,06682$	$\text{Ra} = 37445$
$\rho_n = 0,0000135$	$\rho_p = 0,0000175$	$R_{\text{Aire}} = 154,4$	$R_{\text{int}} = 4,96$
$R_{\text{PDMS}} = 16,67$	$T_C = 306,8$	$T_{\text{Cs}} = 305,7$	$T_F = 294$
$T_{\text{Fs}} = 305,4$			

## A6.2. Elección de la intensidad óptima

 1..10	 1 $I_L$	 2 P
Run 1	0,0005	0,000005858
Run 2	0,0005944	0,000006482
Run 3	0,0006889	0,000006951
Run 4	0,0007833	0,000007268
Run 5	0,0008778	0,00000743
Run 6	0,0009722	0,000007439
Run 7	0,001067	0,000007295
Run 8	0,001161	0,000006997
Run 9	0,001256	0,000006545
Run 10	0,00135	0,00000594

### A6.3. Potencia con la intensidad óptima

Cálculo de la potencia con la intensidad óptima. TFG Jorge Castillo Fernández

Datos

$$A = L \cdot L$$

$$e = 0,003$$

$$\text{long}_{\text{semi}} = 0,005$$

$$n = 120$$

$$\alpha_n = 195 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_p = 230 \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda_n = 1,07$$

$$\lambda_p = 1,28$$

$$\rho_n = 1,35 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho_p = 1,75 \cdot 10^{-5}$$

$$I_L = 9,8 \cdot 10^{-4}$$

$$T_C = 306,8$$

$$T_F = 294$$

$$\lambda_{\text{PDMS}} = 0,2$$

$$L = 0,03$$

$$\lambda_{\text{Aire}} = 26,3 \cdot 10^{-3}$$

$$g = 9,8$$

$$\beta_{\text{Aire}} = 3,33 \cdot 10^{-3}$$

$$\nu_{\text{Aire}} = 14,01 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Pr}_{\text{Aire}} = 0,7296$$

Flujos de calor

$$P = Q$$

$$Q = Q_C - Q_F$$

$$Q_C = \alpha \cdot I_L \cdot T_{Cs} + K \cdot (T_{Cs} - T_{Fs}) - 0,5 \cdot I_L^2 \cdot R_{\text{int}}$$

$$Q_F = \alpha \cdot I_L \cdot T_{Fs} + K \cdot (T_{Cs} - T_{Fs}) + 0,5 \cdot I_L^2 \cdot R_{\text{int}}$$

$$Q_C = \frac{T_C - T_{Cs}}{R_{\text{PDMS}}}$$

$$Q_F = \frac{T_{Fs} - T_F}{R_{\text{PDMS}} + R_{\text{Aire}}}$$

Coefficiente Seebeck, conductancia y resistencia interna

$$A_t = \frac{A}{n}$$

$$A_n = \frac{A_t}{2}$$

$$A_p = \frac{A_t}{2}$$

$$\alpha = n \cdot [\alpha_n + \alpha_p]$$

$$K = n \cdot \left[ \frac{\lambda_n \cdot A_n}{\text{long}_{\text{semi}}} + \frac{\lambda_p \cdot A_p}{\text{long}_{\text{semi}}} \right]$$

$$R_{\text{int}} = n \cdot \left[ \frac{\rho_n \cdot \text{long}_{\text{semi}}}{A_n} + \frac{\rho_p \cdot \text{long}_{\text{semi}}}{A_p} \right]$$

Resistencias térmicas PDMS y Aire

$$R_{\text{PDMS}} = \frac{e}{\lambda_{\text{PDMS}} \cdot A}$$

$$R_{\text{Aire}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

Coefficiente de convección




$$h = \frac{\text{Nusselt} \cdot \lambda_{\text{Aire}}}{L}$$

$$\text{Nusselt} = 0,59 \cdot \text{Ra}^{[1/4]}$$

$$\text{Ra} = \frac{g \cdot \beta_{\text{Aire}} \cdot (T_{\text{Fs}} - T_{\text{F}}) \cdot L^3}{\nu_{\text{Aire}}^2} \cdot \text{Pr}_{\text{Aire}}$$




$A = 0,0009$	$\alpha = 0,051$	$\alpha_n = 0,000195$	$\alpha_p = 0,00023$
$A_n = 0,00000375$	$A_p = 0,00000375$	$A_t = 0,0000075$	$\beta_{\text{Aire}} = 0,00333$
$e = 0,003$	$g = 9,8$	$h = 7,196$	$l_L = 0,00098$
$K = 0,2115$	$L = 0,03$	$\lambda_{\text{Aire}} = 0,0263$	$\lambda_n = 1,07$
$\lambda_p = 1,28$	$\lambda_{\text{PDMS}} = 0,2$	$\text{long}_{\text{semi}} = 0,005$	$n = 120$
$\text{Nusselt} = 8,209$	$\nu_{\text{Aire}} = 0,00001401$	$P = 0,000007433$	$\text{Pr}_{\text{Aire}} = 0,7296$
$Q = 0,000007433$	$Q_C = 0,06689$	$Q_F = 0,06688$	$\text{Ra} = 37472$
$\rho_n = 0,0000135$	$\rho_p = 0,0000175$	$R_{\text{Aire}} = 154,4$	$R_{\text{int}} = 4,96$
$R_{\text{PDMS}} = 16,67$	$T_C = 306,8$	$T_{\text{Cs}} = 305,7$	$T_F = 294$
$T_{\text{Fs}} = 305,4$			

#### A6.4. Variación del coeficiente de Seebeck




 1...10	 1 $\alpha_{np}$	 2 P
<b>Run 1</b>	0,0001	0,000002229
Run 2	0,0001222	0,00000337
Run 3	0,0001444	0,000004453
Run 4	0,0001667	0,000005477
Run 5	0,0001889	0,000006443
Run 6	0,0002111	0,00000735
Run 7	0,0002333	0,0000082
Run 8	0,0002556	0,000008991
Run 9	0,0002778	0,000009723
Run 10	0,0003	0,0000104




## A6.5. Variación de la temperatura caliente

 1..10	 1 $T_C$	 2 P
Run 1	298	-0,000008916
Run 2	299,4	-0,00000665
Run 3	300,9	-0,000004263
Run 4	302,3	-0,000001776
Run 5	303,8	7,949E-07
Run 6	305,2	0,00000344
Run 7	306,7	0,00000615
Run 8	308,1	0,000008919
Run 9	309,6	0,00001174
Run 10	311	0,00001461

## A6.6. Variación de la temperatura fría

 1..10	 1 $T_F$	 2 $P$
Run 1	283	0,00003266
Run 2	284,9	0,00002603
Run 3	286,8	0,00001951
Run 4	288,7	0,0000131
Run 5	290,6	0,000006804
Run 6	292,4	6,435E-07
Run 7	294,3	-0,000005369
Run 8	296,2	-0,00001122
Run 9	298,1	-0,00001687
Run 10	300	-0,0000223

## A6.7. Variación del área

 1..10	1 A	2 P
Run 1	0,0009	-6,367E-07
Run 2	0,001033	0,000003374
Run 3	0,001167	0,000006467
Run 4	0,0013	0,000008926
Run 5	0,001433	0,00001093
Run 6	0,001567	0,00001259
Run 7	0,0017	0,00001399
Run 8	0,001833	0,00001518
Run 9	0,001967	0,00001622
Run 10	0,0021	0,00001712

## A6.8. Potencia en el agua

Cálculo de la potencia en el agua. TFG Jorge Castillo Fernández

Datos

$$A = L \cdot L$$

$$e = 0,003$$

$$long_{semi} = 0,005$$

$$n = 120$$

$$\alpha_n = 195 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_p = 230 \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda_n = 1,07$$

$$\lambda_p = 1,28$$

$$\rho_n = 1,35 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho_p = 1,75 \cdot 10^{-5}$$

$$I_L = 9,8 \cdot 10^{-4}$$

$$T_C = 306,8$$

$$T_F = 294$$

$$\lambda_{PDMS} = 0,2$$

$$L = 0,03$$

$$\lambda_{Agua} = 599,8 \cdot 10^{-3}$$

$$g = 9,8$$

$$\beta_{Agua} = 0,209 \cdot 10^{-3}$$

$$\nu_{Agua} = 1,001 \cdot 10^{-6}$$

$$Pr_{Agua} = 6,975$$

Flujos de calor

$$P = Q$$

$$Q = Q_C - Q_F$$

$$Q_C = \alpha \cdot I_L \cdot T_{Cs} + K \cdot (T_{Cs} - T_{Fs}) - 0,5 \cdot I_L^2 \cdot R_{int}$$

$$Q_F = \alpha \cdot I_L \cdot T_{Fs} + K \cdot (T_{Cs} - T_{Fs}) + 0,5 \cdot I_L^2 \cdot R_{int}$$

$$Q_C = \frac{T_C - T_{Cs}}{R_{PDMS}}$$

$$Q_F = \frac{T_{Fs} - T_F}{R_{PDMS} + R_{Agua}}$$

Coefficiente Seebeck, conductancia y resistencia interna

$$A_t = \frac{A}{n}$$

$$A_n = \frac{A_t}{2}$$

$$A_p = \frac{A_t}{2}$$

$$\alpha = n \cdot [\alpha_n + \alpha_p]$$

$$K = n \cdot \left[ \frac{\lambda_n \cdot A_n}{\text{longsemi}} + \frac{\lambda_p \cdot A_p}{\text{longsemi}} \right]$$

$$R_{\text{int}} = n \cdot \left[ \frac{\rho_n \cdot \text{longsemi}}{A_n} + \frac{\rho_p \cdot \text{longsemi}}{A_p} \right]$$

Resistencias térmicas PDMS y Aire

$$R_{\text{PDMS}} = \frac{e}{\lambda_{\text{PDMS}} \cdot A}$$

$$R_{\text{Agua}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

Coefficiente de convección

$$h = \frac{\text{Nusselt} \cdot \lambda_{\text{Agua}}}{L}$$

$$\text{Nusselt} = 0,59 \cdot \text{Ra}^{[1/4]}$$

$$\text{Ra} = \frac{g \cdot \beta_{\text{Agua}} \cdot (T_C - T_F) \cdot L^3}{\nu_{\text{Agua}}^2} \cdot \text{Pr}_{\text{Agua}}$$

$A = 0,0009$	$\alpha = 0,051$	$\alpha_n = 0,000195$	$\alpha_p = 0,00023$
$A_n = 0,00000375$	$A_p = 0,00000375$	$A_t = 0,0000075$	$\beta_{\text{Agua}} = 0,000209$
$e = 0,003$	$g = 9,8$	$h = 555,8$	$l_L = 0,00098$
$K = 0,2115$	$L = 0,03$	$\lambda_{\text{Agua}} = 0,5998$	$\lambda_n = 1,07$
$\lambda_p = 1,28$	$\lambda_{\text{PDMS}} = 0,2$	$\text{longsemi} = 0,005$	$n = 120$
$\text{Nusselt} = 27,8$	$\nu_{\text{Agua}} = 0,000001001$	$P = 0,00006761$	$\text{Pr}_{\text{Agua}} = 6,975$
$Q = 0,00006761$	$Q_C = 0,3213$	$Q_F = 0,3213$	$\text{Ra} = 4,927\text{E}+06$
$\rho_n = 0,0000135$	$\rho_p = 0,0000175$	$R_{\text{Agua}} = 1,999$	$R_{\text{int}} = 4,96$
$R_{\text{PDMS}} = 16,67$	$T_C = 306,8$	$T_{\text{Cs}} = 301,4$	$T_F = 294$
$T_{\text{Fs}} = 300$			

## A6.9. Coeficiente de convección en función de la velocidad

Coeficiente de convección en función de la velocidad. TFG Jorge Castillo Fernández

Datos

$$A = L \cdot L$$

$$e = 0,003$$

$$long_{semi} = 0,005$$

$$n = 120$$

$$\alpha_n = 195 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_p = 230 \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda_n = 1,07$$

$$\lambda_p = 1,28$$

$$\rho_n = 1,35 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho_p = 1,75 \cdot 10^{-5}$$

$$l_L = 0,0027$$

$$T_C = 306,8$$

$$T_F = 294$$

$$\lambda_{PDMS} = 0,2$$

$$L = 0,03$$

$$\lambda_{Aire} = 26,3 \cdot 10^{-3}$$

$$g = 9,8$$

$$v_{Aire} = 14,01 \cdot 10^{-6}$$

$$Pr_{Aire} = 0,7296$$

Flujos de calor

$$P = Q$$

$$Q = Q_C - Q_F$$

$$Q_C = \alpha \cdot l_L \cdot T_{Cs} + K \cdot (T_{Cs} - T_{Fs}) - 0,5 \cdot l_L^2 \cdot R_{int}$$

$$Q_F = \alpha \cdot l_L \cdot T_{Fs} + K \cdot (T_{Cs} - T_{Fs}) + 0,5 \cdot l_L^2 \cdot R_{int}$$

$$Q_C = \frac{T_C - T_{Cs}}{R_{PDMS}}$$

$$Q_F = \frac{T_{Fs} - T_F}{R_{PDMS} + R_{Aire}}$$

Coeficiente Seebeck, conductancia y resistencia interna

$$A_t = \frac{A}{n}$$

$$A_n = \frac{A_t}{2}$$

$$A_p = \frac{A_t}{2}$$

$$\alpha = n \cdot [\alpha_n + \alpha_p]$$

$$K = n \cdot \left[ \frac{\lambda_n \cdot A_n}{\text{longsemi}} + \frac{\lambda_p \cdot A_p}{\text{longsemi}} \right]$$

$$R_{\text{int}} = n \cdot \left[ \frac{\rho_n \cdot \text{longsemi}}{A_n} + \frac{\rho_p \cdot \text{longsemi}}{A_p} \right]$$

Resistencias térmicas PDMS y Aire

$$R_{\text{PDMS}} = \frac{e}{\lambda_{\text{PDMS}} \cdot A}$$

$$R_{\text{Aire}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

Coefficiente de convección




$$h = \frac{\text{Nusselt} \cdot \lambda_{\text{Aire}}}{L}$$

$$\text{Nusselt} = 0,664 \cdot \text{Re}^{[1/2]} \cdot \text{Pr}_{\text{Aire}}^{[1/3]}$$

$$\text{Re} = \frac{v \cdot L}{\nu_{\text{Aire}}}$$

1..10	1 v	2 h
<b>Run 1</b>	0,1	7,668
Run 2	0,4	15,34
Run 3	0,7	20,29
Run 4	1	24,25
Run 5	1,3	27,65
Run 6	1,6	30,67
Run 7	1,9	33,43
Run 8	2,2	35,97
Run 9	2,5	38,34
Run 10	2,8	40,58

## A6.10. Variación del coeficiente de convección

 1..10	 1 h	 2 P
Run 1	12	-0,000006308
Run 2	16,22	0,00001005
Run 3	20,44	0,00002362
Run 4	24,67	0,00003506
Run 5	28,89	0,00004484
Run 6	33,11	0,00005329
Run 7	37,33	0,00006067
Run 8	41,56	0,00006717
Run 9	45,78	0,00007293
Run 10	50	0,00007808



## A6.11. Potencia con las condiciones favorables

Cálculo de la potencia con las condiciones favorables. TFG Jorge Castillo Fernández

Datos

$$A = 0,0024$$

$$e = 0,003$$

$$\text{long}_{\text{semi}} = 0,005$$

$$n = 120$$

$$\alpha_n = 300 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_p = 300 \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda_n = 1,07$$

$$\lambda_p = 1,28$$

$$\rho_n = 1,35 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho_p = 1,75 \cdot 10^{-5}$$

$$I_L = 0,0137$$

$$T_C = 310$$

$$T_F = 283$$

$$\lambda_{\text{PDMS}} = 0,2$$

$$L = 0,03$$

$$\lambda_{\text{Aire}} = 26,3 \cdot 10^{-3}$$

$$g = 9,8$$

$$\beta_{\text{Aire}} = 3,33 \cdot 10^{-3}$$

$$\nu_{\text{Aire}} = 14,01 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Pr}_{\text{Aire}} = 0,7296$$

Flujos de calor

$$P = Q$$

$$Q = Q_C - Q_F$$

$$Q_C = \alpha \cdot I_L \cdot T_{Cs} + K \cdot (T_{Cs} - T_{Fs}) - 0,5 \cdot I_L^2 \cdot R_{\text{int}}$$

$$Q_F = \alpha \cdot I_L \cdot T_{Fs} + K \cdot (T_{Cs} - T_{Fs}) + 0,5 \cdot I_L^2 \cdot R_{\text{int}}$$

$$Q_C = \frac{T_C - T_{Cs}}{R_{\text{PDMS}}}$$

$$Q_F = \frac{T_{Fs} - T_F}{R_{\text{PDMS}} + R_{\text{Aire}}}$$

Coficiente Seebeck, conductancia y resistencia interna

$$A_t = \frac{A}{n}$$

$$A_n = \frac{A_t}{2}$$

$$A_p = \frac{A_t}{2}$$

$$\alpha = n \cdot [\alpha_n + \alpha_p]$$

$$K = n \cdot \left[ \frac{\lambda_n \cdot A_n}{\text{longsemi}} + \frac{\lambda_p \cdot A_p}{\text{longsemi}} \right]$$

$$R_{\text{int}} = n \cdot \left[ \frac{\rho_n \cdot \text{longsemi}}{A_n} + \frac{\rho_p \cdot \text{longsemi}}{A_p} \right]$$

Resistencias térmicas PDMS y Aire

$$R_{\text{PDMS}} = \frac{e}{\lambda_{\text{PDMS}} \cdot A}$$

$$R_{\text{Aire}} = \frac{1}{h \cdot A}$$

Coefficiente de convección

$$h = 30$$

$$\text{Nusselt} = 0,59 \cdot \text{Ra}^{[1/4]}$$

$$\text{Ra} = \frac{g \cdot \beta_{\text{Aire}} \cdot (T_{\text{Fs}} - T_{\text{F}}) \cdot L^3}{\nu_{\text{Aire}}^2} \cdot \text{Pr}_{\text{Aire}}$$

$A = 0,0024$	$\alpha = 0,072$	$\alpha_n = 0,0003$	$\alpha_p = 0,0003$
$A_n = 0,00001$	$A_p = 0,00001$	$A_t = 0,00002$	$\beta_{\text{Aire}} = 0,00333$
$e = 0,003$	$g = 9,8$	$h = 30$	$l_L = 0,0137$
$K = 0,564$	$L = 0,03$	$\lambda_{\text{Aire}} = 0,0263$	$\lambda_n = 1,07$
$\lambda_p = 1,28$	$\lambda_{\text{PDMS}} = 0,2$	$\text{longsemi} = 0,005$	$n = 120$
$\text{Nusselt} = 9,401$	$\nu_{\text{Aire}} = 0,00001401$	$P = 0,0008378$	$\text{Pr}_{\text{Aire}} = 0,7296$
$Q = 0,0008378$	$Q_C = 0,9782$	$Q_F = 0,9774$	$\text{Ra} = 64467$
$\rho_n = 0,0000135$	$\rho_p = 0,0000175$	$R_{\text{Aire}} = 13,89$	$R_{\text{int}} = 1,86$
$R_{\text{PDMS}} = 6,25$	$T_C = 310$	$T_{\text{Cs}} = 303,9$	$T_F = 283$
$T_{\text{Fs}} = 302,7$			

