

Universidad de Sevilla



FACULTAD DE FÍSICA

TFG. TRANSMISIÓN DEL CALOR:
ESTUDIO DEL ENFRIAMIENTO DE LOS
CUERPOS USANDO UNA IMPRESORA 3D Y
UNA CÁMARA INFRARROJA. CURSO 2022-2023

Autor: Jose Manuel Ruiz Rodríguez

Agradecimientos

A Rafa, mi tutor, por su gran amabilidad y disposición durante los meses que he realizado el trabajo.

Al Aula de Divulgación de la Facultad de Física y, en especial, a Fany por haberme proporcionado el material que he necesitado.

Al Departamento de Física de la Materia Condensada por facilitar el uso del Laboratorio de Termodinámica.

A mis padres y mi hermano por quererme y apoyarme incondicionalmente, por nosotros.

A toda mi familia, por haber confiado en mí y mostrarme siempre su cariño.

A mis compañeros de piso, Carlos, Maite y Marta. Por todos esos momentos juntos en el piso, tanto buenos como malos, donde siempre hemos permanecido unidos. Por haber sido un pilar fundamental en todos estos años en Sevilla.

A todos mis amigos y amigas que desde siempre han estado y sé que estarán, y a todos aquellos que he conocido durante estos cinco años y que sé que permaneceréis conmigo. En especial a Nico y Willy, mis dos grandes pilares en esta etapa tan bonita. Sin vosotros no hubiese llegado a donde estoy hoy, estaré eternamente agradecido de haberos conocido. Muchas gracias por todo.

Índice

1	Introducción teórica	1
1.1	Mecanismos de transferencia de calor	2
1.2	Temperatura	14
2	Objetivos	16
3	Instrumental	16
4	Procedimiento experimental	19
4.1	Montaje, grabación e impresión 3D de una muestra	19
4.2	Medidas experimentales	22
4.3	Análisis de datos (MATLAB)	24
4.4	Análisis de errores	28
5	Resultados y discusión	30
5.1	Recta de calibración	30
5.2	Transferencia de calor por conducción	31
5.3	Transferencia de calor por convección	37
5.4	Transferencia de calor por conducción y convección	42
6	Conclusiones	47
7	Bibliografía	50

Resumen

Este trabajo consiste en el estudio de los diferentes mecanismos de transferencia de calor, para ello utilizaremos un dispositivo no convencional: una cámara termográfica. Con ella podremos estudiar cómo varía la temperatura de un cuerpo que transfiere calor por conducción, convección y radiación; y calcular las magnitudes físicas que caracterizan a cada uno de estos mecanismos: la conductividad térmica, el coeficiente de convección y la emisividad, respectivamente. Para realizar este estudio, una vez hayamos grabado un vídeo de un cuerpo que transfiere calor, compilaremos un código en MATLAB que nos permita realizar dos funciones: primero, importar el vídeo donde observaremos cómo evoluciona el color del cuerpo hasta alcanzar el equilibrio térmico con el entorno y, segundo, relacionar la evolución temporal de la intensidad de los píxeles de la imagen con la evolución de la temperatura del cuerpo. En otras palabras, vamos a construir un termómetro que nos dé la temperatura del cuerpo en cada instante.

Todo ello lo realizaremos con dos cuerpos: una pieza metálica que, por lo general, presenta heterogeneidades; y un segundo cuerpo homogéneo obtenido con una impresora 3D. Analizaremos cómo estos dos cuerpos transfieren calor, bien por conducción, cuando están sometidos a un gradiente de temperatura en contacto con una fuente térmica, bien por convección natural o forzada con un ventilador; o bien por ambos mecanismos a la vez. Además, observaremos que, a temperatura ambiente, la radiación es el mecanismo, cuantitativamente, el menos efectivo y, cualitativamente, el más importante.

El presente trabajo está estructurado como sigue: En la sección 1 haremos una pequeña introducción teórica sobre los fundamentos de los diferentes mecanismos de transferencia de calor y de la temperatura. En la sección 2 presentaremos los objetivos que se desean estudiar en este trabajo. En las secciones 3 y 4 trataremos el instrumental usado en el laboratorio y el procedimiento experimental seguido durante el desarrollo del trabajo, respectivamente. Posteriormente, en la sección 5 se mostrarán y discutirán los resultados obtenidos y finalmente, en la sección 6, expondremos las conclusiones obtenidas en función de los resultados alcanzados.

1. Introducción teórica

Tras el inicio de la Revolución Industrial, las mentes más brillantes trataban de mejorar las primeras máquinas intentando comprender cómo funcionaba el intercambio de energía entre sus componentes. Para ello, era vital entender los procesos en los que se perdía energía o en los que era necesario suministrar combustible.

Las primeras máquinas de vapor fueron diseñadas por Thomas Newcomen pero no comenzaron a expandirse hasta que James Watt introdujo el condensador y mejoras que la hacían mucho más fiables y baratas. En la máquina de vapor de Watt (Fig. 1) era necesario calentar los cilindros que se enfriaban por el rocío con el fin de que el vapor pudiese entrar al propio cilindro sin que se condensara inmediatamente. También se estudiaba la manera en la que reducir las pérdidas de energía producidas en los pistones y cilindros. Por otra parte, en la actualidad, vemos como tanto en las fábricas como en los grandes sectores energéticos (centrales nucleares, eólicas, solares...) se continúan estudiando estos mecanismos de intercambio de energía entre sistemas para tratar de optimizar lo máximo posible la distribución de energía con las mínimas pérdidas posibles.

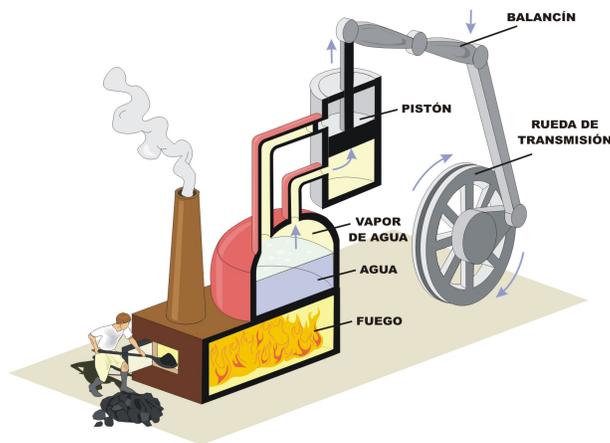


Figura 1: Esquema de la máquina de vapor de Watt.

Por lo tanto, como podemos ver, a lo largo de toda la historia moderna existe una preocupación por el estudio de este trasvase de energía debido a su gran importancia. A este

intercambio lo podemos denominar como **calor**, cuya definición formal viene dada por la transferencia de energía entre sistemas que se encuentran a diferentes temperaturas. Matemáticamente podemos expresarlo como:

$$q = \int_{T_i}^{T_f} c \, dT, \quad (1)$$

donde tenemos en cuenta que el calor, al ser una magnitud extensiva, lo podemos definir como $q = Q/m$, es decir calor (Q) por unidad de masa (m). Denotamos como c al calor específico del cuerpo a estudiar y, suponiendo que esta magnitud no varía con la temperatura en el rango considerado, obtenemos:

$$\delta q = c \, dT, \quad (2)$$

siendo dT la variación de la temperatura. Por lo tanto, tenemos que una variación de la temperatura provocará una transferencia de energía.

Así pues, una vez tenemos la definición de calor, será necesario comprender los diferentes mecanismos a través de los cuales se produce la transferencia de esta magnitud.

1.1. Mecanismos de transferencia de calor

Existen tres principales mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Estos tres mecanismos siempre se dan a la vez en cualquier proceso de transferencia de calor. Sin embargo, por simplicidad, lo estudiamos uno a uno ya que cuando intervienen dos o los tres a la vez el tratamiento matemático se vuelve mucho más complejo. Veamos a continuación como definimos cada uno de ellos.

Conducción

Este mecanismo se basa en el intercambio de energía interna de las partículas microscópicas más cercanas cuando existe una diferencia de temperatura entre estas. En este proceso, las partículas con una mayor energía (mayor temperatura) ceden esta energía a las partículas

más cercanas con menor temperatura produciendo una transferencia de calor a través del medio. Se da tanto en sólidos como líquidos y gases.

En los líquidos y gases la interacción entre las partículas se debe a las colisiones y los procesos de difusión en el movimiento aleatorio. Como vemos en la figura 2, las partículas en los líquidos y gases se encuentran más separadas que en los sólidos. Por lo tanto, tendrán más espacio para moverse lo que dificultará el proceso de transferencia de calor por conducción.

Sin embargo, en los sólidos la interacción entre las partículas se debe a:

- Las vibraciones de los átomos (o moléculas) con respecto a la posición de equilibrio en el retículo. En un sólido los átomos se encuentran a $T > 0K$, es decir, presentan una temperatura diferente al cero absoluto. Esto provoca que las partículas del retículo vibren con una cierta frecuencia y transfieran energía a los átomos vecinos mediante las ondas reticulares producidas por su movimiento armónico.
- Movimiento traslacional de los electrones libres que transportan energía.

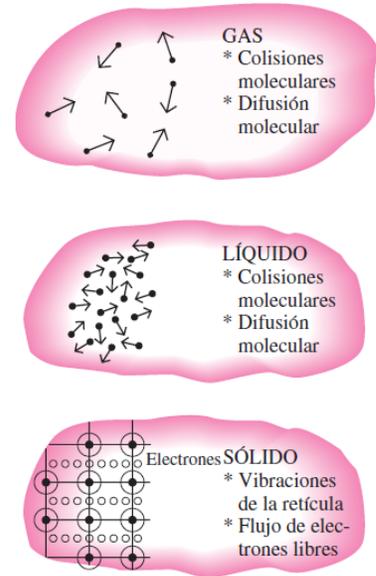


Figura 2: Esquema de los mecanismos de conducción en función del estado de la materia.

Para tratar de entender de qué parámetros depende el flujo de calor cuando actúa la conducción veamos unos ejemplos sencillos:

Si tenemos una mesa de mármol y otra de madera y colocamos el dedo índice encima, ¿qué sucede? Claramente, al ponerlo sobre el mármol notaremos más frío que al colocarlo sobre la madera; hay una transferencia de calor más rápida entre el mármol y nuestro dedo que con la madera. Este hecho nos indica que la transferencia de calor tiene una clara dependencia

con la capacidad que tiene el medio para conducir el calor. A esta propiedad la denominamos conductividad térmica, denotada por k . Por otra parte, pensemos en una lata con agua a 0°C ; sabemos que cuanto mayor sea el espesor de la lata, menor será la pérdida de calor. Además, si aumentamos su área, el descenso de temperatura por unidad de tiempo será más grande. Por último, si la diferencia de temperatura entre la lata y el ambiente aumenta o disminuye, también provocará una variación de la pérdida de calor en ella.

Con estas descripciones, tenemos que la variación del calor con respecto al tiempo en una dimensión viene dada según:

$$\dot{q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (3)$$

donde la conductividad térmica, k , es una propiedad intrínseca del material y representa cómo de bueno es para conducir el calor (en aislantes tendrá un valor más bajo que en conductores). Por otro lado, A representaría el área de la superficie de contacto y $\frac{dT}{dx}$ la variación de la temperatura a lo largo de una dirección (gradiente de temperatura en tres dimensiones).

La ecuación (3) se conoce como Ley de Fourier, la cual presenta un signo negativo para dar cuenta de que la transferencia de calor se da en la dirección en la que la temperatura decrece, esto es, en la dirección de mayor a menor temperatura. Si agrupamos los términos teniendo en cuenta la ecuación (2) obtenemos:

$$mc \frac{dT}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}. \quad (4)$$

Que se trata de una expresión en una sola dimensión con dependencia tanto espacial como temporal y cuya solución no es sencilla, ya que dependerá tanto de las condiciones de contorno como de las condiciones iniciales de nuestro problema. Por ejemplo, veamos el caso de una barra en la que se desea estudiar cómo cambia la temperatura en el estado estacionario en una única dirección espacial: si tomamos que los extremos de la barra (que actúan como focos térmicos) están a temperaturas fijas (esto es, $T(x = 0) = T_1$ y $T(x = L) = T_2$) podemos suponer que la variación de temperatura es lineal con la posición entre los focos térmicos según se puede ver en la figura 3. Por lo tanto podríamos aproximar en esta situación que la pendiente de dicha recta se corresponde a $\frac{dT}{dx}$.

Sin embargo, esta relación de proporcionalidad es ideal. En los extremos de la barra la

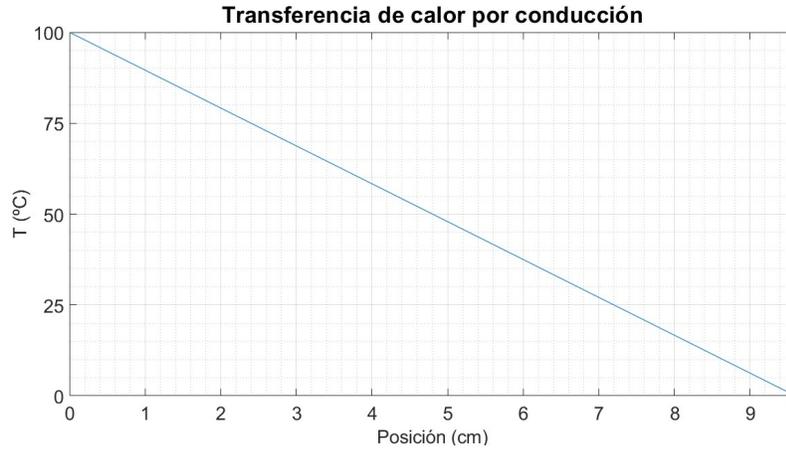


Figura 3: Variación de la temperatura con respecto a la posición en el estado estacionario en una barra rectangular de conductividad $k = 100 \frac{W}{m \cdot K}$ y longitud $L = 9,6 \text{ cm}$ con sus extremos a $T(x = 0) = 100^\circ\text{C}$ y $T(x = L) = 0^\circ\text{C}$.

temperatura permanecerá idealmente constante si los focos térmicos mantienen siempre la misma temperatura. Como se observa en la figura 4, la temperatura es constante en las zonas en las que se encuentran los focos térmicos y decrece de manera lineal desde el foco de mayor a menor temperatura.

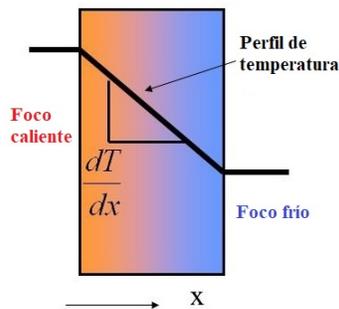


Figura 4: Esquema de la variación de la temperatura con respecto a la posición de un objeto en contacto con dos focos térmicos de temperaturas diferentes.

Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor que se produce debido a los movimientos de masas de fluidos (líquidos o gases). Es decir, el medio a partir del cual

se transfiere la energía es la masa del fluido en movimiento. Este mecanismo produce una transferencia de calor entre diferentes zonas del fluido o entre un fluido y un sólido. Podemos encontrar dos tipos de convección, según sea el movimiento natural del fluido:

- Convección **natural**: Se da cuando el movimiento del fluido que estamos considerando se debe a las fuerzas de empuje producidas por las diferencias de densidad del propio líquido o gas. Por ejemplo: al sacar una pizza del horno, el aire que está más cerca de la superficie de la masa se calienta y tenderá a subir empujando el aire más frío (más denso) hacia abajo, provocando así una corriente de convección que hará que la pizza se enfríe. Otro ejemplo podría ser el movimiento del plasma en el interior del Sol, donde el plasma caliente asciende y el frío desciende dando lugar a patrones de corrientes convectivas.
- Convección **forzada**: Aquella en la que el fluido se fuerza a que realice un movimiento mediante agentes externos. En el caso anterior de la pizza, si queremos que se enfríe más rápido, podemos añadir un ventilador que forzará a que el movimiento del aire sea exactamente el que determine el ventilador, tal y como se observa en la figura 5.

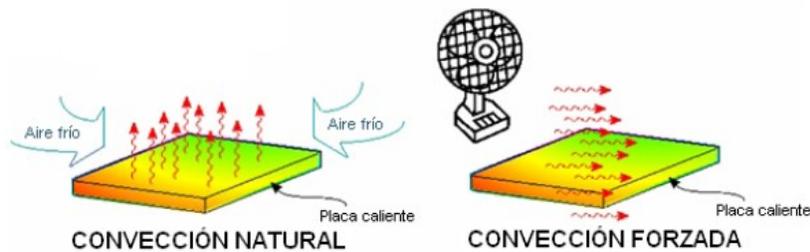


Figura 5: Ejemplo de los dos tipos de convección.

En muchos libros, como en el Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*, se discute sobre si este mecanismo de intercambio de energía es fundamental o no debido a que se puede explicar como *conducción de calor en presencia de un fluido en movimiento*. Experimentalmente se observa que la transferencia de calor mediante la convección se ajusta según:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = -hA_s(T - T_a)^n, \quad (5)$$

donde h ($\frac{W}{m^2 K^n}$) es el coeficiente de intercambio de calor debido a la convección. Este parámetro no es una propiedad del fluido en movimiento sino que depende de la geometría de la superficie y cómo se mueve el fluido, por lo que es puramente experimental. Por su parte, A_s es el área superficial mediante la que se da la transferencia de energía y T_a la temperatura a la que se encuentra el ambiente en el que se mueve el fluido. El exponente n , que es extremadamente difícil de determinar ya que depende tanto de factores como el tipo de régimen del flujo o de la diferencia de temperatura entre el objeto y el ambiente, se ajusta según el tipo de convección del que estemos hablando. Sin embargo, suele presentar un valor cercano a uno en aquellos casos en los que se cumple que $\frac{\Delta T}{T} \ll 1$ siendo $\Delta T = T - T_a$.

Así pues, si recordamos la ecuación (2), podremos estudiar cómo varía la temperatura de un cuerpo con el tiempo en un proceso en el que exista una transferencia de calor por convección como

$$\frac{dT}{dt} = -\gamma(T - T_a)^n, \quad (6)$$

donde:

$$\gamma = \frac{hA_s}{mc}, \quad (7)$$

es el coeficiente de convección.

Esta expresión (6) tiene una solución sencilla para el caso típico en el que $n=1$ y el cuerpo se enfría desde una temperatura T_0 en $t = t_0$, en un ambiente que se encuentra a temperatura T_a , hasta una temperatura T :

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a)e^{-\gamma t}, \quad (8)$$

que, como observamos, presenta un comportamiento exponencial. Por lo tanto, si tomamos logaritmos, podremos obtener γ como la pendiente de la recta que surge al representar $\ln(T(t) - T_a)$ frente al tiempo:

$$\ln(T(t) - T_a) = \ln((T_0 - T_a)) - \gamma t. \quad (9)$$

Radiación

Se define como la transferencia de energía emitida en forma de ondas electromagnéticas que pueden propagarse tanto por el vacío como por medios materiales. Este mecanismo es prácticamente el que hace posible la vida en la Tierra ya que no necesita la existencia de un medio para que se produzca intercambio de energía y no se pierde en el vacío. Sin él no nos llegaría la energía que proviene del Sol.

Lo que estudiamos en nuestro caso se denomina *radiación térmica*. Esta radiación será importante en el propio sentido de que será lo que la cámara termográfica que vamos a usar en nuestro trabajo capte de nuestro cuerpo. Si este no emitiese radiación térmica, no podríamos estudiar absolutamente nada ya que la cámara no captaría ninguna imagen.

La Ley de Stefan-Boltzmann es la que nos permite conocer cómo se produce la transferencia de calor de un cuerpo que emite radiación. Esta viene dada según:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4), \quad (10)$$

donde T_s es la temperatura superficial de nuestro cuerpo a estudiar. Sin embargo a nosotros nos interesa conocer cómo se transfiere el calor de ese cuerpo con el ambiente, teniendo entonces:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A_s (T^4 - T_a^4), \quad (11)$$

donde \dot{Q}_{rad} se puede entender como la potencia de la radiación neta emitida, que es directamente proporcional a la diferencia de la cuarta potencia tanto de la temperatura del cuerpo, T^4 , como de la temperatura a la que se encuentra el ambiente en el que se enfría, T_a^4 . Es decir, a medida que un cuerpo tenga una mayor temperatura, su potencia emitida será cada vez más grande o, en otras palabras, su transferencia de calor será mayor.

Otros parámetros importantes de (11) son:

- Emisividad (ϵ): Con valores desde 0 hasta 1, nos da una medida de cómo emite nuestro cuerpo por radiación en relación a cómo lo hace un cuerpo negro. Un valor igual a uno indica que el cuerpo emite tal y cómo lo debe hacer un cuerpo negro, es decir, absorbe

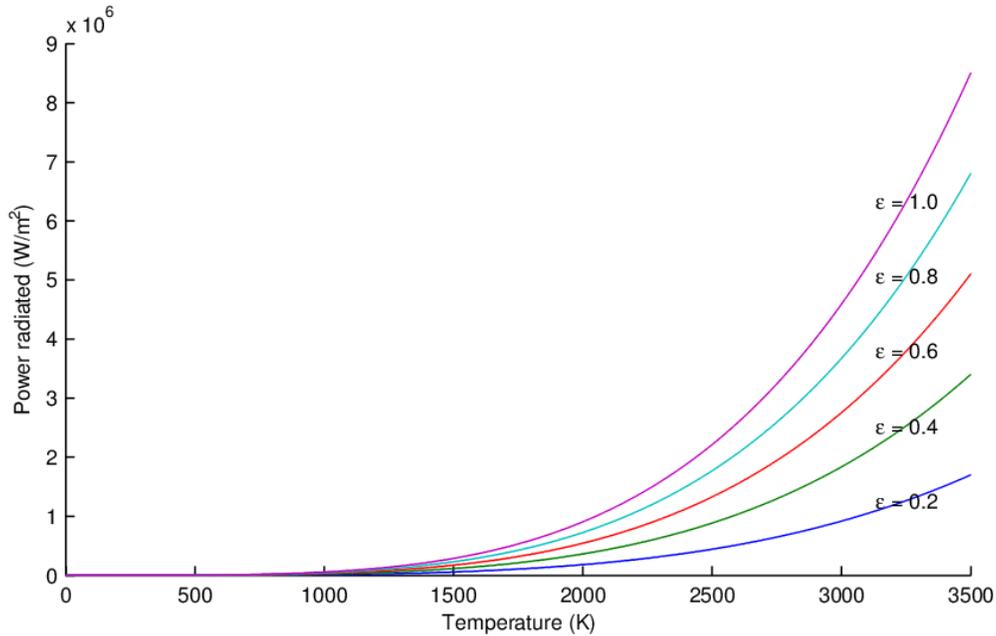


Figura 6: Potencia emitida por un cuerpo en función de la temperatura para distintos valores de la emisividad.

todos los colores de la luz que incide en su superficie. Tal y como vemos en la figura 6, a medida que disminuye la emisividad de un cuerpo, disminuye su potencia radiada. Es decir, una disminución de la emisividad provoca un descenso en la transferencia de calor mediante radiación.

- Constante de Stefan-Boltzmann (σ): Constante física cuyo valor es aproximadamente

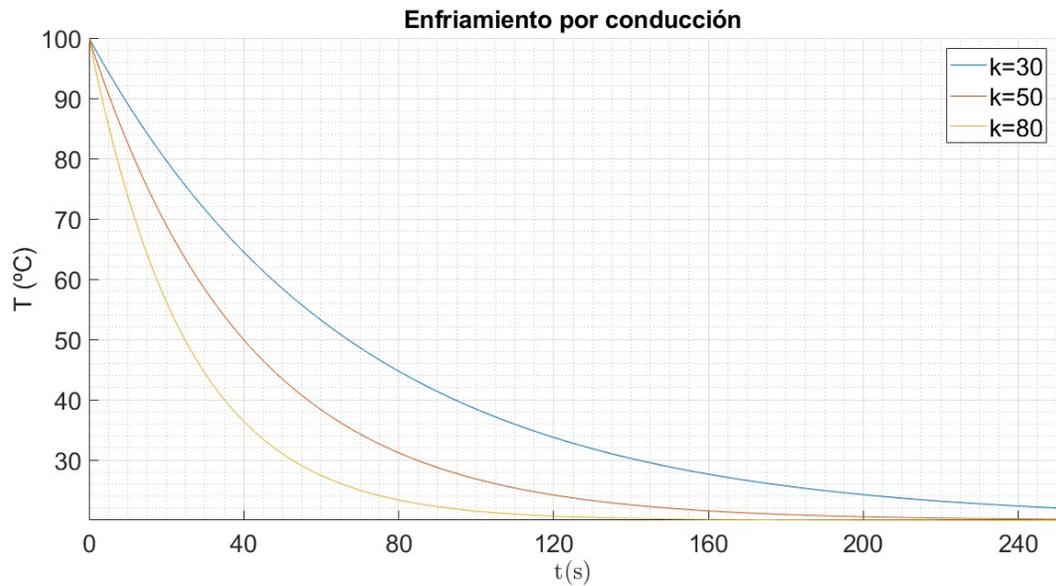
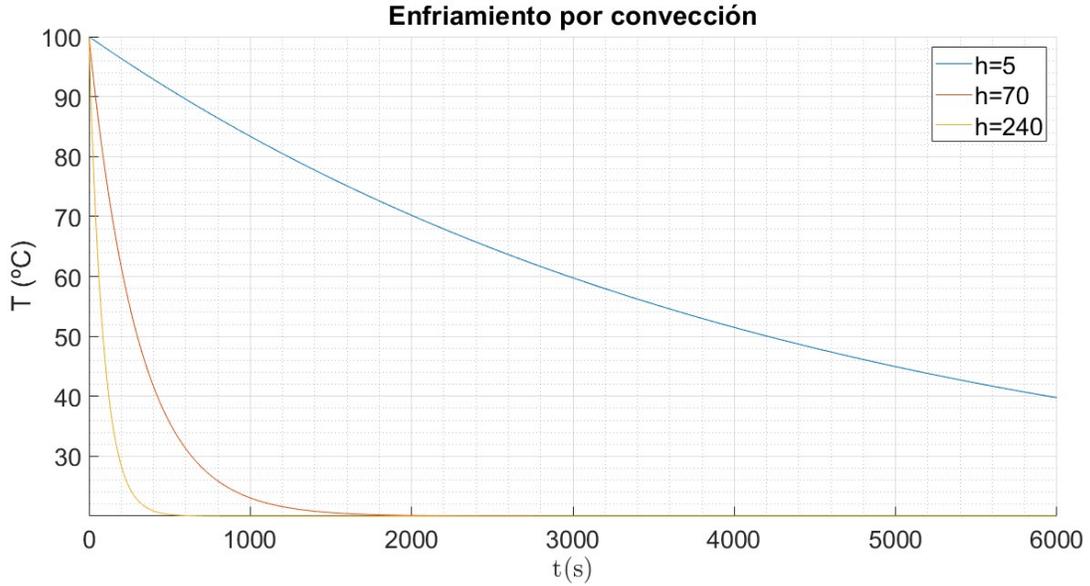
$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}.$$

Si queremos saber cómo varía la temperatura en función del tiempo para un cuerpo que solo transfiere energía mediante radiación, debemos hallar la solución de (11) para un cuerpo que se enfría desde una temperatura T_0 en un ambiente a T_a . Esta expresión viene dada por:

$$T(t) = \sqrt[4]{\frac{(T_0^4 - T_a^4)\epsilon}{\sigma A} e^{-\frac{\epsilon \sigma A}{c} t} + T_a^4} \quad (12)$$

Comparativa de los tres mecanismos de transferencia

Una vez que hemos visto los tres mecanismos de transferencia de calor será clarividente mostrar, para las mismas condiciones, cuál es la evolución temporal de la temperatura en cada uno de los casos. De esta forma, podremos ver cuál o cuáles de ellos es más o menos importante a la hora de analizar la transferencia de calor de un cuerpo.



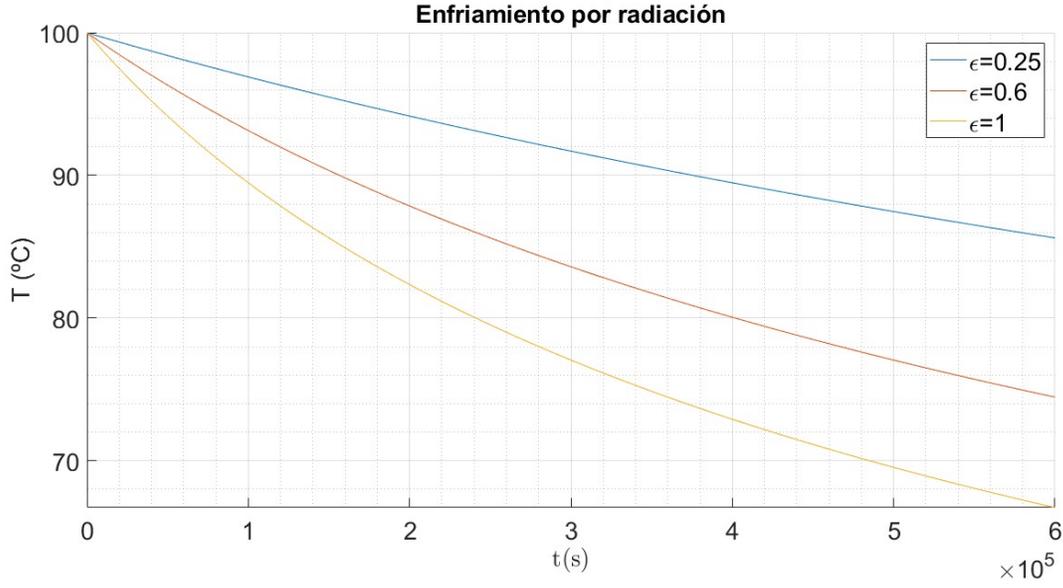


Figura 7: Enfriamiento teórico de un cuerpo de $27,84 \text{ cm}^2$ en un ambiente a $T_a = 20^\circ\text{C}$ y en contacto con un baño térmico a $T = 0^\circ\text{C}$ mediante los mecanismos de convección, conducción y radiación.

Tomaremos como referencia los valores de las dimensiones, propiedades y la temperatura ambiente del objeto que posteriormente vamos a estudiar con la finalidad de observar el comportamiento teórico de cada uno de estos mecanismos de transferencia de calor para que puedan ser comparados con los resultados experimentales.

Si nos detenemos a observar la figura 7, podemos observar cómo mediante las ecuaciones (4), (8) y (12) hemos representado las curvas teóricas que describen el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo para cada uno de los mecanismos de transferencia de calor.

Para el caso del enfriamiento por convección observamos su clara dependencia con el coeficiente de convección h . A medida que éste aumenta, el cuerpo se enfría a una mayor velocidad. Por su parte, la conducción está claramente determinada por la conductividad k ; cuanto mayor sea este parámetro, mayor será la rapidez con la que se enfríe nuestro sistema. Por último, en cuanto a la radiación, se deduce que la tasa de transferencia de calor es mayor

a medida que aumenta la emisividad, es decir, cuando el cuerpo emite como un cuerpo negro ($\epsilon = 1$) se enfría con mayor velocidad que si se aleja de este comportamiento.

Ahora que hemos analizado de qué parámetros dependen cada uno de estos mecanismos, nos centraremos en estudiar cuáles de ellos son más determinantes para nuestro estudio. Si observamos el caso del enfriamiento por radiación, desde la temperatura inicial $T_0 = 100^\circ\text{C}$ han pasado hasta $6 \times 10^5 \text{s}$ y aún no ha logrado enfriarse hasta los 50°C . Este hecho es necesario tenerlo en cuenta ya que las medidas que vamos a realizar no son (ni de lejos) de tal magnitud en cuanto al tiempo. Con esto, concluimos que la radiación, a pesar de tener un vital importancia (ya que sin ella no nos llegaría ninguna imagen térmica a la cámara termográfica) se trata de un mecanismo de transferencia de calor muy ineficiente para cuerpos como el que vamos a estudiar.

Por otro lado, si nos centramos ahora en el enfriamiento por convección y conducción podemos observar en la figura 7 cómo la escala de tiempo disminuye significativamente con respecto al enfriamiento por radiación, es decir, el cuerpo se enfriará a mayor velocidad mediante conducción o convección pero con una pequeña diferencia: la escala de tiempos en la convección es mucho más larga que en la conducción, lo que nos indica que la conducción es un mecanismo (para los valores típicos que se muestran) mucho más eficiente en la transferencia de calor en los primeros instantes de tiempo. Esto se debe a que nuestro cuerpo estará en contacto con un baño térmico. Ahora bien, si la conducción siempre dominase sobre la convección no tendría sentido que nos abrigásemos con un manta de lana, ya que la conductividad de la lana es mayor que la del aire y estaríamos perdiendo calor. Sin embargo, ¿por qué no pasamos frío cuando nos tapamos si por conducción la transferencia de calor es mayor con la lana? Pues bien, al taparnos con una manta de lana ésta impide que se produzca intercambio de calor mediante convección con el aire frío del ambiente. Por ello es importante conocer en qué caso nos hallamos y cuál es el mecanismo de transferencia de calor dominante.

Si atendemos al caso de la figura 7, teniendo en cuenta los valores mínimos del coeficiente de convección h y la conductividad k , se puede dilucidar que para alcanzar el equilibrio

térmico con el ambiente bastará con que transcurran unos 200 segundos si el calor se pierde mediante conducción mientras que, si solo tenemos en cuenta la convección, tendremos que esperar hasta más de 6000 segundos para que esto suceda. Esto nos dará una idea sobre cómo funcionan cada uno de estos mecanismos en los instantes iniciales de tiempo; la conducción tiene mucho más peso que la convección al inicio del proceso de enfriamiento.

Vimos anteriormente en la sección (1.1) que existen dos tipos de convección: la natural, en la que h (consideramos aire como el fluido en movimiento) es aproximadamente $5 - 25 \frac{W}{m^2 K}$ y la forzada, para valores del coeficiente de convección en torno a $50 - 250 \frac{W}{m^2 K}$. Con esto, se muestra cómo para la convección forzada nuestro cuerpo se enfriará a mayor velocidad, un hecho que es muy intuitivo. Por ejemplo, cuando soplamos a un plato de comida caliente para que se enfríe más rápido que por el mero hecho de estar en contacto con el ambiente.

En la figura 7, pese a llegar a estudiar valores altos para el coeficiente de convección en el caso de la convección forzada, la conducción es mucho más influyente al inicio en la tasa de pérdida de calor por un cuerpo para el caso en el que éste se halla en contacto directo con un foco térmico debido a su alta conductividad térmica. Se llega a ver que para el valor máximo del coeficiente de convección mostrado ($h = 240 \frac{W}{m^2 K}$), nuestro cuerpo se logra establecer en equilibrio térmico en torno a unos 400 s mientras que para el valor mínimo de $k = 30 \frac{W}{m K}$, este equilibrio térmico se da antes de los 250 s.

Pese a estas diferencias, para hallar los valores de la conductividad térmica y del coeficiente de convección, las curvas de enfriamiento que presentan sendos mecanismos pueden ser aproximadas como una recta en los primeros instantes de tiempo debido a que el descenso de temperatura aún no es lo suficientemente alto. Por ejemplo, en el caso de enfriamiento por conducción, si estudiamos en la figura 7 el caso en el que $k = 80 \frac{W}{m K}$, podríamos aproximar la curva de enfriamiento como una recta cuya pendiente representaría $\frac{dT}{dt}$ para los primeros 25 s aproximadamente. Siguiendo el mismo razonamiento para la figura 3, al representar T frente a la posición, podremos aproximar por una recta de pendiente $\frac{dT}{dx}$ al intervalo en el que el perfil de temperatura sea prácticamente lineal.

Por lo tanto llegamos a que las siguientes aproximaciones son, en principio, válidas para

realizar en nuestro estudio:

- La radiación, como mecanismo de transferencia de calor, es despreciable frente a la transferencia de calor por conducción y convección.
- Para el caso de la conducción, en los primeros segundos de medida podemos aproximar la variación de la temperatura con respecto al tiempo t como una recta de pendiente $\frac{dT}{dt}$. Por su parte, podemos aproximar por una recta de pendiente $\frac{dT}{dx}$ a la variación de la temperatura con respecto a la posición en el caso que tengamos un cuerpo cuyos extremos estén en contacto con 2 focos térmicos a diferentes temperaturas.
- En nuestro estudio, la conducción domina sobre la convección para los primeros instantes de tiempo cuando nuestro cuerpo está en contacto con un baño térmico.

1.2. Temperatura

La temperatura es la magnitud física que vamos a estudiar durante nuestro trabajo. Viendo cómo varía con respecto al tiempo podremos obtener información sobre la transferencia de energía entre sistemas como vimos en la sección anterior. Pero, ¿cómo podemos definir la temperatura de un sistema? En Física, podemos definirla como una magnitud escalar e intensiva (no depende de la extensión de nuestro sistema) relacionada con la energía cinética de las partículas que constituyen un cuerpo. Un aumento de la temperatura de un sistema se ve reflejado en un incremento de energía cinética. Sin embargo, en el día a día, no hablamos de un aumento de la energía cinética de las partículas que componen la materia, sino que (desde la experiencia) tenemos interiorizado cuando algo está a mayor o menor temperatura.

Coloquialmente se habla de frío o caliente para referirnos a una temperatura menor o mayor, respectivamente. Pero esto no sigue ningún principio físico. Por lo tanto, en primer lugar, es necesario comprender qué sucede si ponemos en contacto dos sistemas que están a diferentes temperaturas para tratar de obtener alguna información sobre esta. Si por ejemplo dejamos una taza de café caliente en una habitación en invierno, sabemos (según nuestra

experiencia) que la taza de café se enfriará hasta alcanzar la temperatura de la habitación. Es decir, se producirá un intercambio de energía en forma de calor hasta que la taza de café alcance la temperatura del ambiente. Cuando alcanzamos este instante, hablamos de que ambos sistemas han llegado a una situación de equilibrio. Esto se conoce como *equilibrio térmico*.

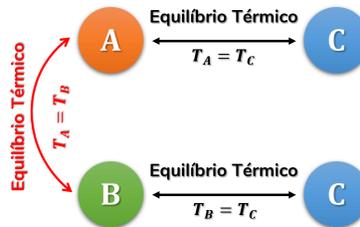


Figura 8: Sistemas en equilibrio térmico.

Pues bien, ahora será necesario conocer qué propiedad física comparten los sistemas que cumplen esta condición de equilibrio térmico. Esta propiedad es a lo que llamamos **temperatura**, que se puede obtener sabiendo que si dos sistemas A y B están en equilibrio térmico con un sistema C, entonces A y B estarán a la misma temperatura que el sistema C (ver figura 8). Así pues, sabiendo que dos sistemas se encuentran en equilibrio térmico, podremos medir su temperatura. Pero... ¿de qué forma?

Escalas de temperatura

Una vez que tenemos una definición cualitativa para la temperatura, será necesario obtener una escala de medición para poder determinar el valor de esta magnitud. Existen dos tipos de escalas:

- **Relativas:** Se basan en escoger dos estados de la materia fácilmente reproducibles (punto de ebullición del agua, congelación, temperatura corporal humana...) a los que se les asignan un valor concreto. Se realiza una calibración a partir de esos dos puntos mediante una calibración lineal. Entre las escalas relativas más conocidas se encuentran las escalas Celsius, Fahrenheit, Rankine...

- Absolutas: Son aquellas que no dependen de las propiedades de la sustancia, sino que solo requieren de un punto de referencia para obtener la escala. Entre las más conocidas, la usada en el SI es la escala Kelvin (K). Esta escala se define actualmente con un único punto fijo, que es la temperatura del punto triple del agua.

Las escalas definen la temperatura pero cada una le asigna un valor diferente a cada estado de la materia. Sin embargo, todas ellas se pueden relacionar matemáticamente; por ejemplo: los grados Celsius con la escala Kelvin se relacionan según $^{\circ}\text{C} = K - 273.15$. Para la escala Celsius, el astrónomo Anders Celsius estableció que el punto de fusión del hielo serían los 0°C y el punto de ebullición 100°C . Con esto, podía obtener una escala con dos puntos, ajustar una recta de calibración y determinar así la escala de nuestro termómetro con el que posteriormente determinaremos experimentalmente la temperatura.

En nuestro estudio construiremos un termómetro siguiendo el mismo procedimiento que toman las escalas relativas: asignaremos un valor de 100°C a la máxima intensidad del píxel que midamos en la cámara y un valor de 0°C a la intensidad mínima del píxel. De esta manera, obtendremos una recta de calibración con estos dos puntos y podremos asignarle un valor concreto de temperatura a cada una de las intensidades de los píxeles.

2. Objetivos

Los principales objetivos de este estudio son: construir una escala termométrica a partir de una cámara termográfica y estudiar la transferencia de calor en un cuerpo por los mecanismos de convección y conducción, tanto actuando por separado como actuando a la vez.

3. Instrumental

Explicaremos a continuación el material usado en este trabajo y que se observa en la figura 9:

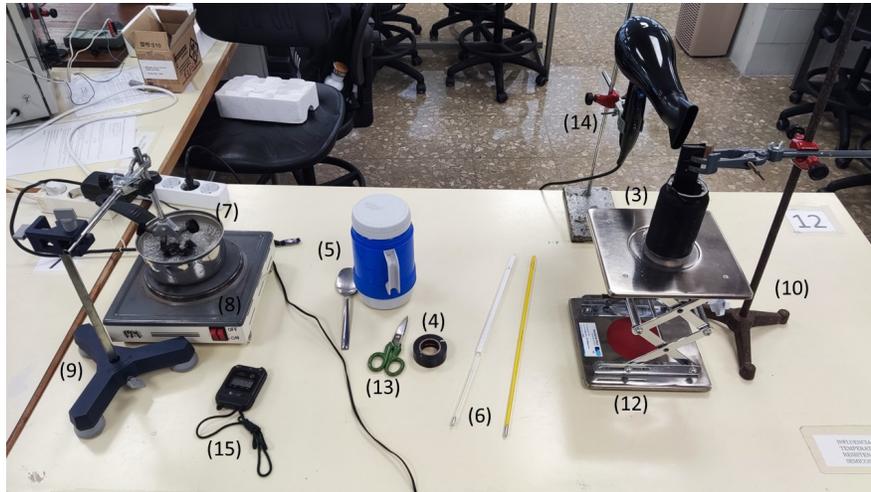


Figura 9: Instrumental de laboratorio.

1. *Cámara Termográfica KCTE-384*. Este dispositivo, que nos proporciona la Facultad de Física y se muestra en la figura 29 del Anexo, permite grabar vídeos y fotografiar imágenes térmicas reproducidas en una pantalla LCD. Los archivos grabados se pueden almacenar en una tarjeta de memoria SD y ser transferidos a un PC mediante el lector de tarjetas. Algunas de sus especificaciones técnicas principales aparecen en el anexo.
2. *Placa de hierro*. Nuestro cuerpo a estudiar (ver figura 10) Las principales propiedades a tener en cuenta son:

Longitud: $L = (9,6 \pm 0,1) \text{ cm}$

Área: $A = (27,8 \pm 1,3) \text{ cm}^2$

Masa : $m = (132.72 \pm 0,01) \text{ g}$ (ver figura 10)

Capacidad calorífica: $c = 450 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ según Boyer, H., & Gall, T. (1998). Metals Handbook Desk Edition.

Conductividad térmica: $k = (74,6 \pm 0,4) \frac{\text{W}}{\text{m K}}$ según Boyer, H., & Gall, T. (1998). Metals Handbook Desk Edition.

Emisividad (Lo hemos envuelto en cinta negra para que se comporte como un cuerpo negro).

Composición: Principalmente hierro con un porcentaje de carbono (información

recibida en el taller de la facultad donde obtuvimos la muestra).



Figura 10: Masa de la placa de hierro medida en una balanza de precisión 0.01g.

3. *Baño térmico*. Lata de refresco que hace la función de baño térmico siendo rellenada de agua con hielo ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$).
4. *Cinta aislante negra*. Se usa para envolver la placa de hierro y la lata de refresco con el objetivo de que la emisividad de sendos objetos sea $\epsilon = 1$. De esta manera el cuerpo radia lo máximo posible, logrando obtener medidas con una mayor precisión.
5. *Vaso Dewar con cuchara*. En él almacenaremos el hielo que sea necesario para añadirlo con una cuchara al baño térmico, con el fin de que el agua con hielo mantenga a una temperatura en torno a 0°C .
6. *Termómetros de mercurio*. Con ellos tomamos las medidas de la temperatura como referencias a la hora de ajustar nuestra recta de calibración. La precisión de éstos es de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$.
7. *Cacerola*. La usaremos para introducir la placa de hierro y llevarla hasta una temperatura aproximada de 100°C mediante equilibrio térmico.
8. *Hornillo*. Permite calentar el agua de la cacerola hasta llevarla a la ebullición.
9. *Soporte 1*. Sujeta la placa de hierro para introducirla en la cacerola.
10. *Soporte 2*. Permite sujetar a la placa de hierro en la toma de medidas.

11. *Plataforma elevadora*. Sube al baño térmico hasta una altura apropiada para introducir la placa de hierro.
12. *Tijeras*. Para cortar la cinta aislante negra.
13. *Secador de pelo*. Si se activa, reproduce una condiciones en las que se fuerza la convección. Presenta dos modos diferentes de potencia y dos disposiciones de aire caliente y una de aire frío.
14. *Cronómetro*. Mide el tiempo que se se calienta la placa de hierro en el agua.
15. *Trípode ultralyt*. Mostrado en la figura 29 del Anexo, nos servirá para obtener una buena estabilidad a la hora de realizar las grabaciones con la cámara termográfica y nos permitirá controlar las distancias a las cuales tomamos las medidas.
16. *Impresora 3D Witbox 1 BQ* . Instrumento mostrado en la figura 30 del Anexo con el que imprimiremos un cubo de lado $36,18\text{ cm}$, tal y como vemos en la figura 11. Las características principales de la impresora vienen incluidas en el anexo.

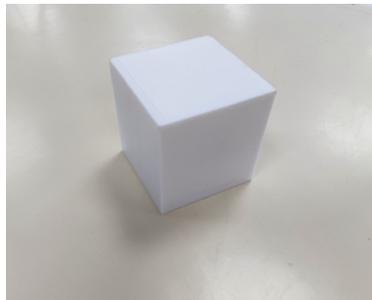


Figura 11: Cubo impreso mediante impresora 3D.

4. Procedimiento experimental

4.1. Montaje, grabación e impresión 3D de una muestra

- En primer lugar, llenamos la cacerola de agua a temperatura ambiente y la ponemos en el hornillo a calentar.

- Una vez el agua esté en ebullición, colocaremos la placa de hierro en el soporte 1 de manera que pueda ser introducida en la cacerola sin que esté en contacto con el fondo de ésta. Así, conseguiremos que nuestro objeto esté en contacto con agua a 100°C y esperaremos unos 15 minutos (que mediremos con el cronómetro) hasta que se alcance el equilibrio térmico.
- Mientras esperamos los 15 minutos, encenderemos la cámara. A continuación, conectaremos el adaptador de alimentación AC a una toma de corriente de pared AC y conectamos la salida de DC a la toma de alimentación de la cámara. Es importante que no desenchufemos el adaptador ya que la cámara podría apagarse durante la toma de medidas. Luego, colocamos la cámara en el trípode a una altura adecuada para poder realizar las grabaciones correspondientes y la ajustamos correctamente para que no se mueva, es decir, que solo enfoque hacia el lugar donde vamos a realizar el vídeo. Es importante medir las distancias a la que se hallan tanto el secador como la cámara termográfica con respecto a nuestra placa de hierro para poder relacionar posteriormente las longitudes reales con las medidas en el vídeo.
- Ajustaremos los siguientes parámetros de la cámara termográfica:

Emisividad=1

Paleta de colores: IR

Ajuste de imágenes: Auto

Lente: 7.5 mm

Rango de temperaturas: $0 - 400^{\circ}\text{C}$

Temperatura ambiente: Temperatura que marque el termómetro del laboratorio (en nuestro caso, el día de la toma de medidas $T_a = 17.5^{\circ}\text{C}$).

Humedad relativa: La correspondiente en el laboratorio (en nuestro caso, $Humid = 70\%$)

Calibrado: OFF

- Ya ajustados los principales parámetros de la cámara, nos disponemos a colocarla en el trípode a una altura correcta para la grabación de los vídeos. Ya colocada, pulsamos el menú de la cámara (botón cuadro y rojo) que observamos en la figura 12 y deslizamos en el rectángulo de abajo a la derecha hacia la cámara de vídeo. No pulsaremos el botón para grabar hasta que no esté colocada la barra de hierro en el soporte.
- Por otro lado llenaremos nuestro baño térmico tanto de agua como del hielo que se encuentra en el vaso Dewar. Nos aseguraremos de que la temperatura del baño esté en torno a los 0°C con uno de los dos termómetros de mercurio para garantizar que estamos en el punto de referencia deseado para luego construir la recta de calibración. Posteriormente, colocaremos el baño térmico en el elevador a una altura suficiente para poder ser captado por la cámara con el objetivo de tener un punto de referencia a 0°C . Detrás del elevador se encuentra el secador a una distancia inicial d .
- Cuando hayan pasado los 15 minutos, sacaremos la placa de hierro de la cacerola de agua y la colocaremos en el soporte 2. Una vez que esté colocada, pulsaremos el botón rojo de la pantalla de la cámara para comenzar a grabar (es importante verificar que la tarjeta de memoria SD se encuentra dentro de la cámara para poder almacenar el vídeo) y poder observar así cómo varían los colores de la placa de hierro cuando se enfría. Este proceso de enfriamiento lo realizaremos en 9 medidas diferentes en las que estudiaremos tanto la conducción como la convección de nuestra placa y la convección en el cubo.
- Una vez realizado todo este proceso, imprimiremos mediante la impresora 3D el otro cuerpo a estudiar: un cubo. Para ello usamos Ultimaker Cura, que es una aplicación que nos permite modificar los parámetros de impresión y transformarlos a un código legible por la impresora. Los únicos parámetros que cambiaremos son:

Draft: 0.2 *mm*

Velocidad de impresión: 40 *mm/s*

Densidad de relleno: 30 %

Generar soporte: Sí

4.2. Medidas experimentales

Una vez que tengamos todo el montaje perfectamente colocado, veamos los diferentes casos a los que someteremos a nuestra placa de hierro y al cubo una vez que ya estén calentados a 100°C .

Medida 1: conducción

Introducimos la barra en el baño térmico a 0°C y activamos el botón rojo en la pantalla de la cámara para iniciar el vídeo. En este caso, la placa de hierro se enfriará a mayor velocidad por la parte en la que está en contacto con el agua a 0°C mediante conducción.

Medida 2: convección natural

Repetimos el mismo procedimiento que antes pero esta vez no introduciremos la placa de hierro en el baño térmico 0°C , sino que será colocada en el soporte y se dejará enfriar al estar en contacto con el ambiente. De esta manera estudiaremos cómo se produce la transferencia de calor a través de la convección natural con el aire.

Medida 3: convección forzada con aire frío

Imitando los pasos seguidos en la medida de la convección natural procederemos ahora encendiendo el secador, que está detrás de la placa de hierro, en la primera potencia con chorro de aire frío tal y como vemos en la figura 12. El baño térmico se deja al lado y no introducimos nuestra muestra en él, así podremos observar cómo se comporta la temperatura en función del tiempo para el caso de la convección forzada debido solamente a la presencia del aire frío del secador.



Figura 12: Grabación del enfriamiento por convección forzada con aire frío de la placa de hierro mediante la cámara termográfica KCTE-384.

Medida 4: conducción y convección con aire frío

Volvemos a reproducir lo mencionado en el montaje experimental y, una vez la placa de hierro se encuentre a 100°C , la volvemos a colocar en el soporte 2. Además de introducir solo una parte en el baño térmico, encenderemos el con el chorro de aire frío en el primer modo de potencia. De esta forma están actuando dos mecanismos de transferencia de calor: conducción (al igual que en la primera medida donde introdujimos la muestra en el baño térmico) y, además, convección forzada por el ventilador.

Medida 5: conducción y convección con aire caliente

A continuación, continuando el mismo procedimiento que se hizo en la medida 4, procedemos ahora a seleccionar el modo de aire caliente en el secador.

Medida 6: conducción y convección con aire frío a mayor potencia

Repetimos la medida 4 pero ahora con el secador en el segundo modo de potencia. Con este funcionamiento emite más cantidad de aire frío y, por lo tanto, variará la transferencia de calor por la convección.

Medida 7: conducción y convección con aire frío y secador a distancia D

En este caso, modificaremos la distancia a la que se encuentra el secador a $D = 2d$, siendo d la distancia a la que se encontraba inicialmente en las medidas anteriores. De esta manera, cambiará la forma en la que desciende la temperatura debido a la diferencia del coeficiente de convección con respecto a los casos anteriores.

Medida 8: conducción y convección con aire frío a mayor potencia y secador a distancia D

Continuando con el mismo procedimiento que en el caso anterior, a la misma distancia D , activaremos el segundo modo de potencia del secador con el aire frío.

Medida 9: transferencia de calor por convección natural

Realizaremos una grabación sobre el cubo cuando sobre este actúa la convección natural. Observaremos cómo se enfrían las caras y las aristas.

4.3. Análisis de datos (MATLAB)

Una vez que hemos realizado todas las grabaciones en cada una de las medidas experimentales, importamos los vídeos mediante MATLAB para estudiar lo que realmente nos interesa: cómo se relaciona la intensidad de los píxeles de la cámara con la temperatura y

cómo se da la transferencia de calor en nuestro cuerpo. Para ello, importaremos en Matlab cada vídeo grabado y seleccionaremos el área que estamos interesados en estudiar mediante la función *imcrop*, la cual nos permite recortar una región determinada de una imagen tal y como se observa en la figura 13. Ya con el programa compilado, podremos hacer una GUI con la que cualquier usuario pueda importar un vídeo, seleccionar un área concreta y conocer la temperatura en dicha región y cómo evoluciona con el tiempo.

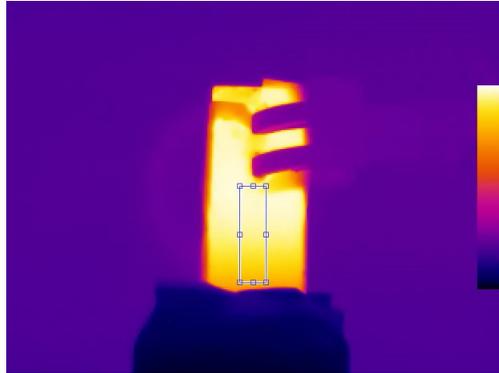


Figura 13: Área de estudio (en azul) seleccionada mediante la función *imcrop*.

Escala termométrica

Para poder construir una escala de temperatura hemos visto que es necesario tener dos valores experimentales a partir de los cuales realizar la recta de calibración. Por sencillez, usaremos como referencia el valor de la temperatura a la que se encuentra la placa de hierro al sacarla del agua en ebullición ($T_h = 100^\circ\text{C}$) y la temperatura a la que se encuentra el agua con hielo en el baño térmico ($T_b = 0^\circ\text{C}$).

Una vez elegidos estos puntos es necesario conocer cómo medir la intensidad de los píxeles de la imagen proporcionada por la cámara termográfica. Para ello se utiliza la función *reshape*, la cual convierte la matriz del área recortada en un vector fila de una dimensión que mide la intensidad media de cada píxel. El valor de esta intensidad media se mide en una escala de grises, donde cada píxel presenta un valor asignado entre 0 y 255 de intensidad. El valor 0 representa que el píxel es negro y 255 que el píxel es completamente blanco. De esta manera, si elegimos dos áreas en nuestra imagen que tengan la temperatura bien definida, seremos

capaces de obtener una relación entre el valor medio de la intensidad de los píxeles en escala de grises con la temperatura.

Estudio de la convección y conducción

Una vez conocida la relación píxel-temperatura podemos proceder a estudiar cómo varía esta última en función tanto del tiempo como de la posición para estudiar los mecanismos de transferencia de calor por convección y conducción.

Si seleccionamos, conforme lo explicado anteriormente, una región de la imagen y analizamos cómo evolucionan los píxeles de esa región para cada instante de tiempo durante la duración del vídeo, estaremos obteniendo una medida de cómo varía la temperatura con el tiempo.

En primer lugar, seleccionaremos el primer frame de nuestro vídeo y escogeremos una región sobre la placa de hierro. De esta manera, obtenemos cual es el valor medio de la temperatura en toda la región seleccionada. ¿Qué sucede si mantenemos la misma región seleccionada y vemos cómo varía en el tiempo? La respuesta es clara, estaremos obteniendo una medida sobre cómo varía la temperatura con el tiempo en la zona que hemos elegido. O lo que es lo mismo, estudiamos así cómo varía la temperatura de nuestra placa de hierro en función del tiempo.

Por otra parte, para analizar la variación de la temperatura en función de la posición es necesario visualizar el problema que estamos abordando. Al introducir el hierro en el baño térmico existe un flujo de calor desde el cuerpo de mayor temperatura hacia el de menor temperatura, es decir, se está produciendo una transferencia de calor desde la placa de hierro hacia el baño térmico. Si observamos la figura 14, es como si la transferencia de calor se estuviese produciendo en el sentido negativo del eje Y, por lo tanto será necesario cuantificar cuál es la relación entre las dimensiones reales del área que estamos seleccionando y su tamaño en la imagen. Para ello, es necesario conocer tanto la distancia a la que estaba la placa de hierro con respecto a la cámara ($d = 40 \text{ cm}$) y la distancia focal de la cámara. A través de

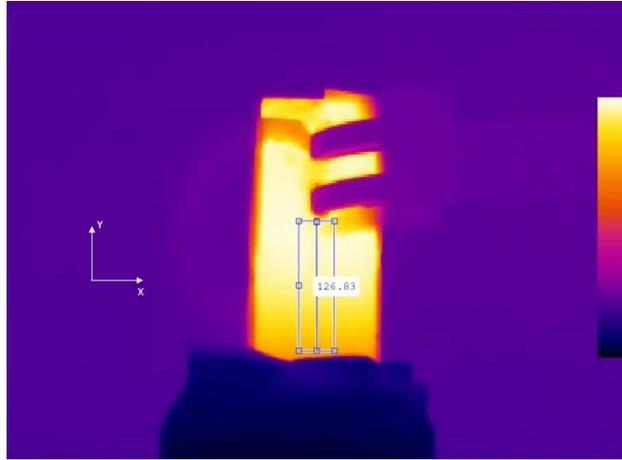


Figura 14: Área seleccionada mediante la función *impcrop* y distancia entre el lado superior e inferior del rectángulo usando *imdistline* (línea vertical en azul a lo largo de la barra de hierro).

estos datos podremos conocer la relación entre lo que se mide en la imagen y el tamaño real que tiene de la siguiente forma:

Primero seleccionamos la distancia que hay entre la parte superior e inferior de nuestra área elegida mediante el uso de la función *imdistline*, la cual nos proporciona la distancia en píxeles (d_p) entre los dos puntos que hayamos seleccionado. Luego nos interesa conocer la cantidad de píxeles que hay por cada metro, que calculamos mediante la siguiente relación:

$$pixels/m = \frac{f \times d_p}{L},$$

donde f es la distancia focal de nuestra cámara y L es la longitud real de nuestra placa de hierro. Luego definimos la distancia real (d_r) existente entre la parte superior de la región y la inferior en el eje Y como:

$$d_r = \frac{posicion(2) - posicion(1)}{pixels/m},$$

donde *posicion(2)* y *posicion(1)* indican las posiciones (en píxeles) de la zona superior e inferior del área seleccionada, respectivamente. De esta manera sabemos la distancia que realmente estamos midiendo a la hora de estudiar la transferencia de calor desde un punto de la placa de hierro hasta otro.

Cabe destacar que hay que ser muy sutiles a la hora de analizar las dimensiones que estamos estudiando. Conocemos el área total de nuestro objeto de estudio, A , sin embargo, cuando seleccionamos una región en concreto sobre nuestra placa de hierro tendremos que las dimensiones con las que estamos trabajando son diferentes del área total A . Para ello tenemos que transformar las distancias que nos definen la región que medimos en píxeles con MATLAB a distancias en metros. De esta manera, nos aseguramos que el área que estamos considerando es la correcta a la hora de realizar todos los cálculos de la conductividad k y del coeficiente de convección h . Al área correspondiente a la nueva región seleccionada, la denominaremos $A' = 5,2 \times 1cm^2$ que presentará un valor constante durante todas las medidas (esto es, siempre seleccionaremos el mismo área con *imcrop*)

Por lo tanto, seleccionando el primer frame de nuestro vídeo y usando la función *imcrop* podremos hallar cómo varía la intensidad media de cada píxel en función de la posición de los píxeles de la imagen, o lo que es lo mismo: cómo varía la temperatura en función de la posición en una región en concreto de nuestra placa de hierro.

4.4. Análisis de errores

Propagación cuadrática de errores

Para el cálculo de la conductividad, el coeficiente de convección y todo el resto de magnitudes se usará la fórmula de propagación cuadrática de errores, que viene dada según:

$$\Delta_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \Delta_i^2}. \quad (13)$$

Por ejemplo, en el caso que queramos calcular el error en el coeficiente de convección según la ecuación (7) tendremos:

$$\Delta h = \sqrt{\Delta\gamma^2 \cdot (mc/A)^2 + \Delta m^2 \cdot (\gamma c/A)^2 + \Delta c^2 \cdot (\gamma m/A)^2 + \Delta A^2 \cdot \left(\frac{\gamma mc}{A^2}\right)^2}$$

Estimación del error en la temperatura

A la hora de usar la cámara termográfica debemos tener en cuenta que los dispositivos microelectrónicos de ésta se calientan a medida que pasa el tiempo mientras realizamos las grabaciones debido a las pérdidas por efecto Joule. Por lo tanto, es importante tener en cuenta cual es el aumento de temperatura debido a este factor y corregirlo. Esta será nuestra medida del error en el valor medio de la intensidad de los píxeles registrados por la cámara, por lo tanto se podrá relacionar con la precisión en la medida experimental de la temperatura.

Las grabaciones que vamos a realizar son de 3 minutos aproximadamente. Por lo tanto, si tenemos un baño térmico relleno de agua con hielo a 0°C esperamos que en 3 minutos la temperatura del baño térmico permanezca prácticamente constante ya que es suficientemente grande como para no calentarse en un intervalo de tiempo tan pequeño. Veamos qué sucede:

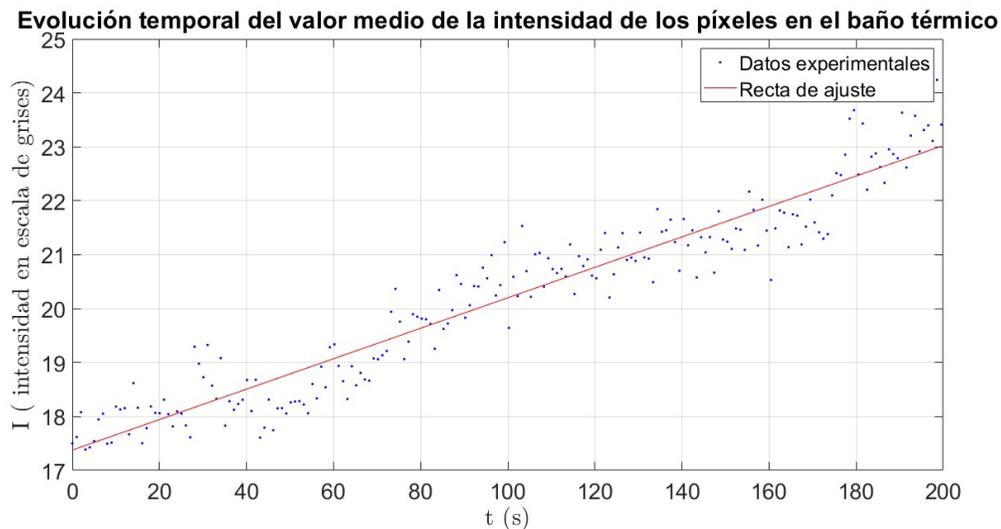


Figura 15: Evolución temporal del valor medio de la intensidad de los píxeles (I) en el baño térmico debido al calentamiento por la microelectrónica de la cámara.

Se observa claramente en la figura 15 como en tan solo 200 s el valor medio de la intensidad del píxel pasa de ser 17,4 a 23,0. Sin embargo, si medimos en el laboratorio con el termómetro de mercurio la temperatura del agua con hielo en el baño térmico no ha cambiado. Por lo tanto, podemos estimar el error en la medida debido al calentamiento por la microelectrónica como: $\Delta I_{microelectronica} = I_{max} - I_{min} = 5,6$, donde I_{max} e I_{min} se refieren al valor en el

instante final e inicial del valor medio de la intensidad del píxel, respectivamente. Por otra parte, la incertidumbre propia de la intensidad media de los píxeles la calculamos como el valor medio del valor máximo y mínimo de la intensidad media del píxel en una región a temperatura constante (baño térmico), obteniéndose: $\Delta I_{exp} = 0,8$.

Una vez que ajustemos la recta de calibración, tendremos:

$$T = mI + b, \tag{14}$$

con el error dado según:

$$\Delta T = m\Delta I. \tag{15}$$

5. Resultados y discusión

5.1. Recta de calibración

A continuación mostramos los datos que se han obtenido para las temperaturas medidas experimentalmente con su correspondiente relación con la intensidad media de píxeles en la escala de grises (0-255).

Tabla 1: Relación de las temperaturas medidas experimentalmente en el laboratorio y su correspondiente valor en píxeles en escala de grises.

	T_h	T_b
Temperatura en grados Celsius (°C)	$(97,6 \pm 0,2)$	$(0,4 \pm 0,2)$
Valor medio de la intensidad del píxel	$(203,3 \pm 0,8)$	$(17,4 \pm 0,8)$

Mediante el valor de dos medidas experimentales conocidas como la temperatura de la placa de hierro, T_h , y la temperatura en el baño térmico, T_b , podemos hallar una recta de calibración que nos permita identificar para cada píxel en escala de grises (obtenido en MATLAB) cuál es el valor correspondiente de temperatura siguiendo la expresión (14). De este modo, pasaremos de hablar de intensidad media del píxel a una magnitud con la que

estamos más familiarizados: temperatura en escala Celsius. Por su parte, el error debido al calentamiento por la microelectrónica lo podemos calcular según la ecuación (15), quedando así:

$$\Delta T_{microelectronica} = 2,9^{\circ}\text{C}, \quad (16)$$

valor que debemos restar a cada una de las medidas.

Por último, el propio error en la medida de la temperatura se calcula según la ecuación (15), resultando

$$\Delta T_{exp} = 0,42^{\circ}\text{C},$$

que se trata de la incertidumbre de la temperatura experimental.

5.2. Transferencia de calor por conducción

Nos situamos ahora en el caso de la medida de la conducción (medida 1) al introducir la muestra en el baño térmico; veremos cómo varía la temperatura a lo largo de la sección longitudinal de la placa de hierro desde un punto situado aproximadamente en el centro hasta el más cercano que está sumergido en el agua con hielo.

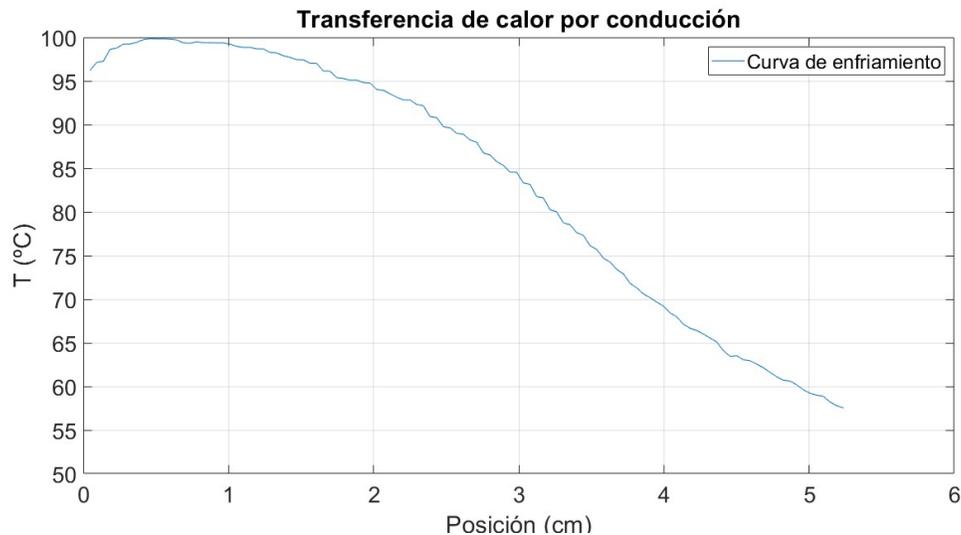


Figura 16: Evolución de la temperatura en función de la posición en la placa de hierro para el primer instante de tiempo del vídeo.

Como vemos en la figura 16, podemos apreciar que a medida que nos alejamos de la posición $y = 0$ (centro de la barra) la temperatura no decrece rápidamente, sino que permanece prácticamente constante hasta que nos alejamos a una posición en torno a 1 cm . Es en este punto cuando se produce una caída brusca en la temperatura decreciendo ésta aproximadamente de forma lineal. Es claro ver que cuanto más cerca estamos del baño térmico menor es la temperatura en la placa de hierro. Este hecho se produce debido al gradiente de temperatura existente entre la parte central de la placa de hierro ($y = 0 \text{ cm}$), que presenta inicialmente una temperatura en torno a 100°C , y el lugar más cercano al baño térmico (en torno a $y = 5 \text{ cm}$).

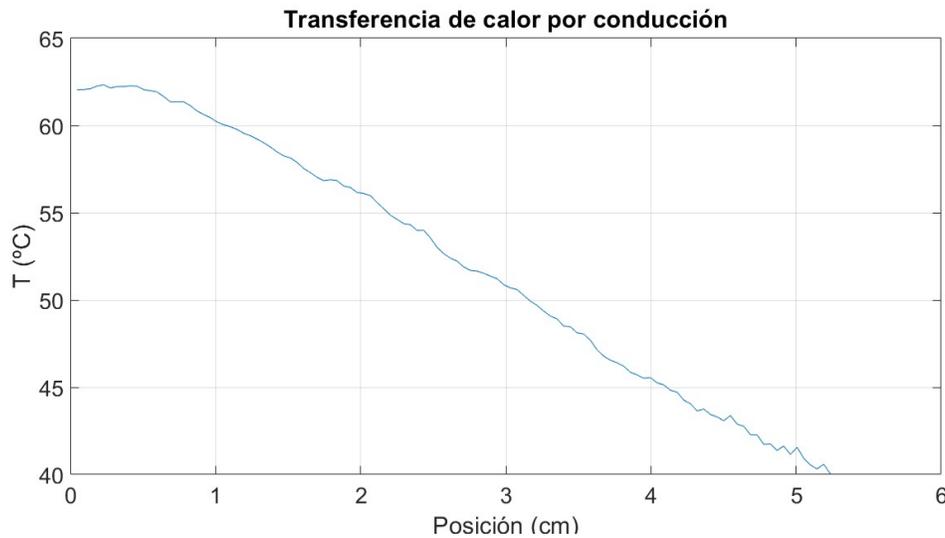


Figura 17: Evolución de la temperatura en función de la posición en la placa de hierro para el frame 2000 del vídeo.

Mediante el mecanismo de conducción, la placa de hierro se está enfriando pero no exactamente de la forma que cabría esperar. Teóricamente esperamos una caída progresiva en la temperatura tal y como observamos en la figura 3. Sin embargo, pese a que la transferencia de calor es muy pequeña en los primeros centímetros, observamos cómo a medida que se acerca al baño térmico la transferencia de calor es muy relevante. Notamos algo parecido a lo que preveíamos en la figura 4; es cómo si la zona superior más alejada del punto central de la placa de hierro estuviese actuado como foco térmico a $T = 100^\circ\text{C}$ y la zona más cercana al baño como foco a $T = 0^\circ\text{C}$. De esta manera tendríamos que lo observado experimentalmente

en la figura 16 sería una zona de temperatura prácticamente constante en torno a 0 y 1 *cm* y luego un descenso de temperatura lineal en la zona intermedia de la barra (desde el centro hasta extremo situado en el baño térmico). Sin embargo, sabemos que la zona superior de la placa de hierro no es un foco térmico ya que se enfría a lo largo del tiempo aunque lo haga a un ritmo menor que las zonas que se encuentran más próximas al baño térmico. Por otra parte, en la figura 17 se observa claramente cómo la temperatura en la parte central de la placa de hierro es prácticamente constante de nuevo pero ahora con valores en torno a 60°C. Es decir, cuando transcurre el tiempo, el extremo superior de la barra se enfría pero no de la misma forma que las zonas más cercanas al baño térmico de agua con hielo, sino a un ritmo menor. Por lo tanto lo que sucede es que a medida que transcurre el tiempo, pese a que la temperatura global de la placa de hierro disminuye, no lo hace de manera uniforme. La zona superior al área seleccionada (ver figura 13) tarda bastante más en enfriarse que la zona central de la barra provocando que actúe como si de un foco térmico se tratase.

En ambas figuras, 16 y 17, damos cuenta del hecho de que la temperatura decrece en el estado estacionario de manera lineal desde (aproximadamente) la posición central hasta el extremo más cercano al baño térmico, situación parecida a la que se comentó en la figura 3; la zona superior actúa como foco térmico caliente y el baño térmico (en la zona inferior a la barra) como foco frío. Por ello, en la zona intermedia la temperatura varía de forma lineal y la pendiente de dicha recta podrá ser usada para el estudio de la conductividad térmica k .

Por otra parte, lo que no llegamos a observar es una nueva zona de pendiente constante a una temperatura más baja actuando como foco frío debida a la acción del baño térmico. Este hecho se debe a que la cámara es incapaz de grabar a la placa de hierro al introducirla en el interior del baño. Por lo tanto, la temperatura que se mide se corresponde con la del baño térmico y no con la que realmente tiene la barra.

Apreciemos ahora cual es la evolución temporal de la temperatura en el caso de esta medida:

En la figura 18 vemos como, al inicio, la temperatura decrece muy rápidamente y llega a estabilizarse en torno a 60°C. Cuando transcurre el tiempo hasta unos 200 *s* vemos cómo



Figura 18: Evolución temporal de la temperatura en la barra de hierro.

la temperatura vuelve a decrecer. Este hecho no concuerda con lo que esperaríamos obtener según la figura 7, donde teníamos una transferencia de calor totalmente decreciente en el tiempo. Por lo tanto, la consideración de que la placa de hierro no sea totalmente homogénea puede, en principio, explicar por qué observamos que tardan en enfriarse más unas zonas de la placa que otras. Según cómo se distribuya el carbono y el resto de impurezas en la estructura cristalina del hierro se producirá una variación en la conductividad, haciendo que no todos los puntos de nuestro objeto se enfríen homogéneamente, sino que algunos tardan en enfriarse un poco más que otros. Esto provocará que el descenso de temperatura no sea totalmente decreciente, sino que se vayan observando progresivas curvas de enfriamiento.

Además, en el experimento realizado no tenemos dos posiciones de la placa que estén a temperaturas totalmente fijas. La posición que consideramos como $y = 0$ no se encuentra siempre a 100°C , ya que va disminuyendo su temperatura a medida que avanza el tiempo como vemos en las figuras 16 y 17. Por otra parte, la temperatura en el otro extremo, en contacto con el baño térmico, no se encuentra constantemente a 0°C . Por lo tanto, las condiciones de contorno no son siempre las mismas, es decir, el agua que se encuentra en el baño térmico va calentándose poco a poco debido a la temperatura de la placa de hierro y las condiciones de

contorno varían con el tiempo, lo que hace que el problema magnifique su complejidad.

Ahora podremos calcular la conductividad k si recordamos que podíamos aproximar que la temperatura variaba de manera lineal en los primeros instantes de tiempo y en las posiciones intermedias entre los focos térmicos. Para el cálculo será necesario que aproximemos las curvas que muestran el cambio de temperatura cuando comienza el enfriamiento como rectas cuya pendientes corresponderán a los valores de $\frac{dT}{dt}$ y $\frac{dT}{dx}$, tal y como vimos en la sección *Comparativa de los tres mecanismos de transferencia de calor*.

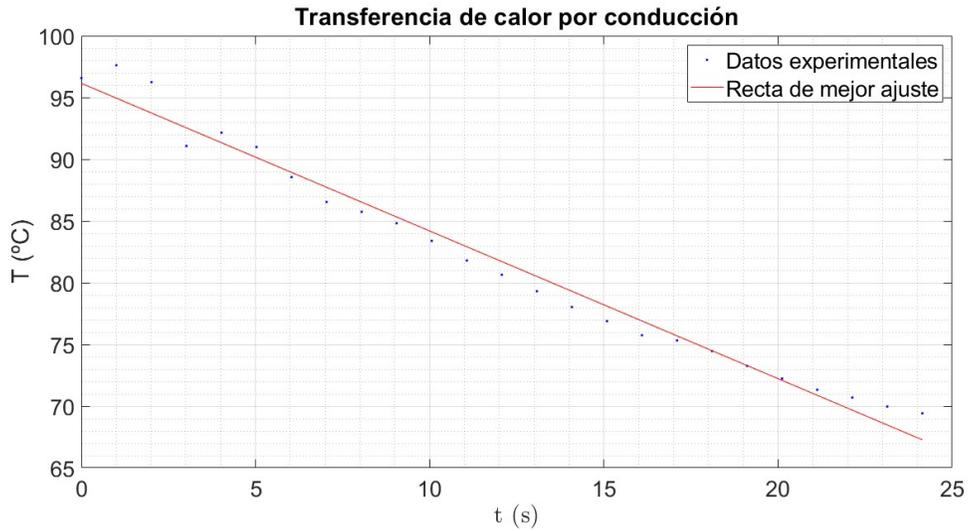


Figura 19: Evolución temporal de la temperatura en la placa de hierro en los primeros instantes de tiempo.

Tabla 2: Coeficientes de mejor ajuste para la curva de la figura 19.

Pendiente $\frac{dT}{dt}$ (°C/s)	$(-1, 20 \pm 0, 04)$
Ordenada en el origen (°C)	$(96, 1 \pm 0, 5)$
R^2	0.981

Se puede observar en la figura 19 cómo la temperatura varía linealmente en los primeros instantes de tiempo. De esta manera, sabiendo la pendiente de la recta, podremos obtener una medida experimental estimada sobre el valor de $\frac{dT}{dt}$.

En cuanto a la figura 20, igualmente observamos como la temperatura varía linealmente

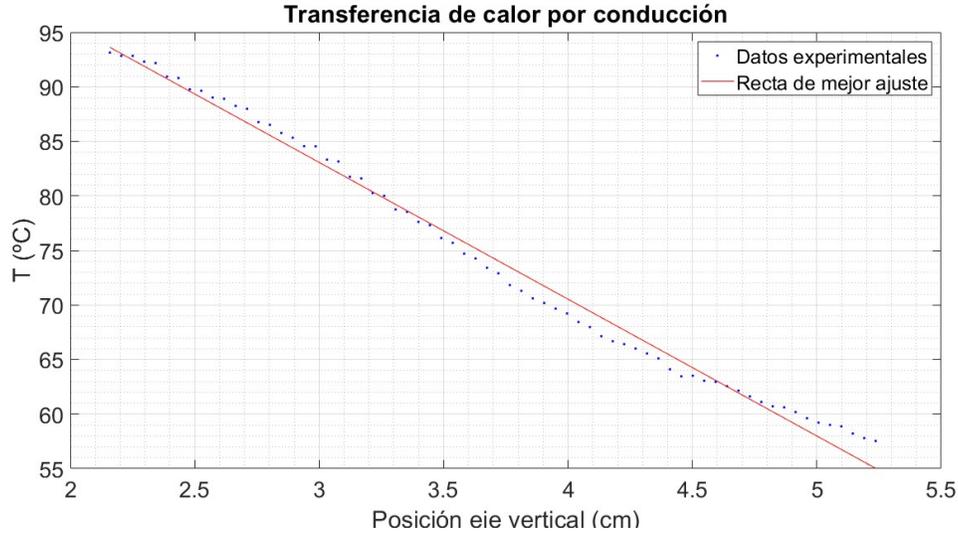


Figura 20: Evolución de la temperatura en función de la posición en la placa de hierro en el intervalo de enfriamiento lineal.

con respecto a la posición en el intervalo entre los dos focos térmicos, por lo que la pendiente de la recta nos dará información sobre el valor de $\frac{dT}{dx}$.

Tabla 3: Coeficientes de mejor ajuste para la curva en figura 20.

Pendiente $\frac{dT}{dx}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	(-1316 ± 17)
Ordenada en el origen ($^{\circ}\text{C}$)	$(94,4 \pm 0,5)$
R^2	0.988

Si despejamos ahora en la ecuación (4), usando las medidas que caracterizan a nuestra placa de hierro y teniendo en cuenta que el área se trata del área de la región seleccionada en MATLAB (A'), obtendremos el siguiente valor experimental de la conductividad térmica:

$$k = (104,4 \pm 6,2) \frac{W}{m \cdot K}, \quad (17)$$

que es una cantidad que difiere un poco al que podría tener una barra de hierro sin impurezas (en torno a $80 \frac{W}{m \cdot K}$)

5.3. Transferencia de calor por convección

Estudiaremos a continuación la convección natural y forzada como mecanismos de transferencia de calor.

Transferencia de calor por convección natural

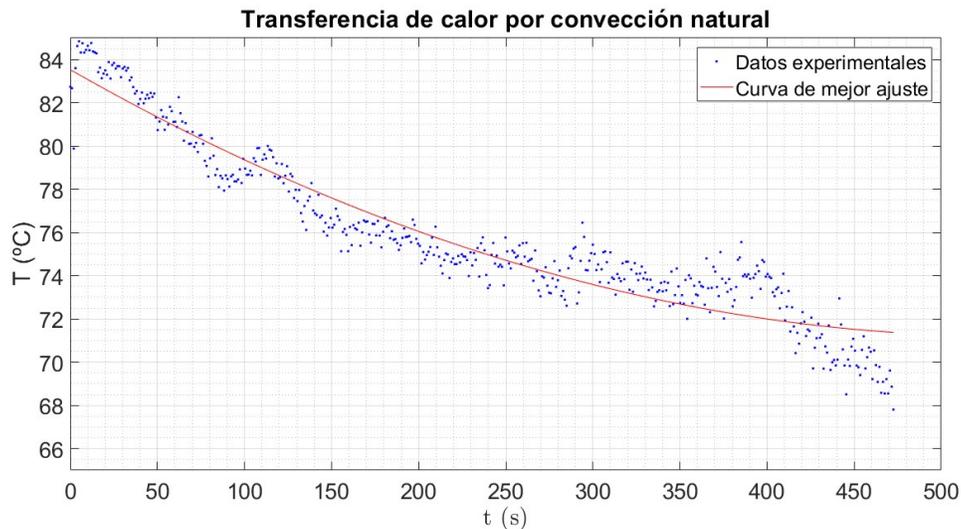


Figura 21: Evolución temporal de la temperatura en transferencia de calor por convección natural.

Según observamos en la figura 21, el enfriamiento que se produce en la barra es mucho más liviano que en el caso que vimos cuando actuaba la conducción, donde la transferencia de calor era bastante alta (ver figura 18). El enfriamiento que se produce en los primeros 200 s de medida en el caso de la convección natural es un poco menor a 10°C , mientras que en la figura 18 observábamos que, cuando había transcurrido el mismo tiempo, la temperatura decrecía desde los 97°C hasta aproximadamente 60°C . Por lo tanto, vemos como el mecanismo de convección natural (para el caso que estamos estudiando) es mucho menos dominante que la conducción; hecho que también podemos ver reflejado en que la curva que obtenemos en la figura 21. A pesar de que la curva obtenida tiene cierto carácter exponencial, es importante ver cómo el tiempo durante el cual se tomaron las medidas en la transferencia de calor por conducción natural (algo más de 450 segundos) es mucho mayor que en la transferencia

mediante conducción, donde apenas medimos más de 250 s. Si solamente hubiésemos medido hasta 200 s, hubiéramos observado en la figura 21 un descenso de temperatura prácticamente lineal, mientras que en la figura 18 se observa claramente el carácter exponencial que presenta la conducción cuando ya han transcurrido 50 s.

Si seguimos observando qué sucede a medida que pasa el tiempo ($t > 400$ s), vemos cómo la curva de enfriamiento cada vez se vuelve más plana. Esto nos va a indicar que el equilibrio térmico con el ambiente se alcanzará para un instante de tiempo muy alto. Como ya vimos en la figura 7, para valores típicos del coeficiente de convección natural la curva de enfriamiento era prácticamente constante y necesitábamos que transcurriese un tiempo lo suficientemente grande para que nuestra barra alcanzase el equilibrio térmico; por lo que esperamos encontrar un valor de h relativamente pequeño.

Tomando logaritmos de acuerdo a la ecuación (9) obtendremos un ajuste semilogarítmico cuya recta presenta pendiente γ como vemos en los datos de la tabla 4.

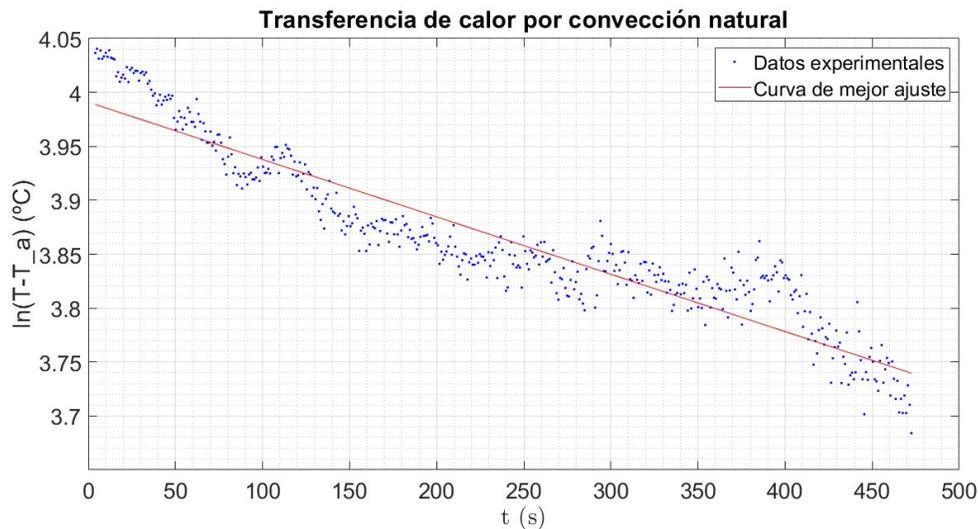


Figura 22: Ajuste semilogarítmico en el que se observa la dependencia lineal de $\ln(T - T_a)$ con el tiempo.

Tabla 4: Coeficientes de mejor ajuste para la curva en figura 22.

Pendiente $\gamma_{natural}$ (s^{-1})	$(5,3 \pm 0,9) \times 10^{-4}$
Ordenada en el origen $\ln(T_0 - T_a)$	$(3,991 \pm 0,003)$
R^2	0.88

Por último, podemos calcular el coeficiente de convección según la ecuación (7) obteniéndose:

$$h_{natural} = (61 \pm 4) \frac{W}{m^2 K},$$

una cantidad mayor a los valores típicos que presenta este coeficiente (entre $5 - 25 \frac{W}{m^2 K}$).

Transferencia de calor por convección forzada

En esta sección veremos cómo será la evolución temporal de la temperatura en el caso de la Medida 3, en la cual estudiamos la convección forzada a partir del uso del chorro de aire frío con el secador en el primer modo de potencia.

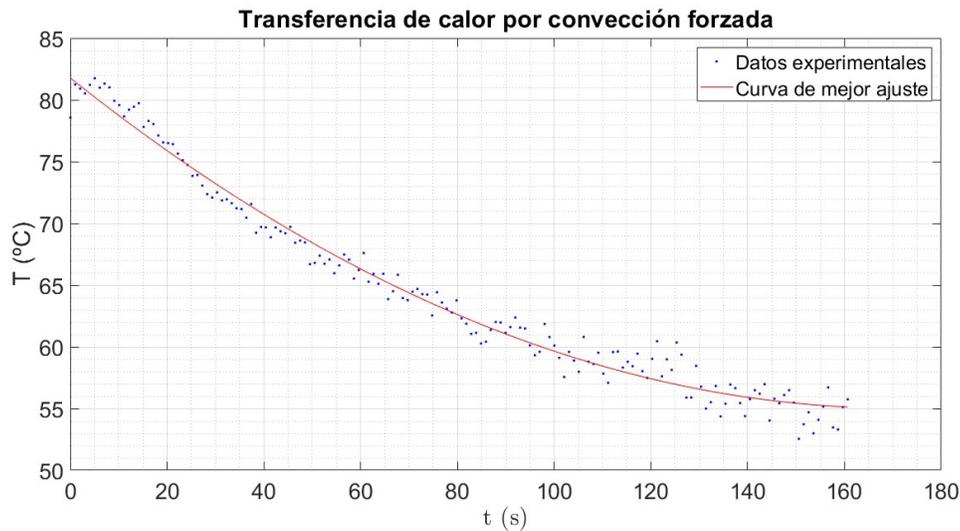


Figura 23: Evolución temporal de la temperatura en el estudio de la transferencia de calor mediante convección forzada.

Procediendo de la misma forma que en la sección anterior, mostramos en la figura 23 cómo varía la temperatura a medida que transcurre el tiempo. Como ya explicamos en la sección

Comparativa de los tres mecanismos de transferencia, a medida que aumenta el coeficiente de intercambio de calor por convección, la transferencia de calor será mayor y, en consecuencia, la placa se enfriará más.

A diferencia de lo que observamos en la convección natural, en la figura 23 vemos cómo el enfriamiento se produce desde aproximadamente unos 80°C hasta 55°C en un intervalo de tiempo de $t = 160$ s. Claramente, en condiciones de convección forzada, la barra se ha enfriado en menor tiempo y hasta una menor temperatura en comparación con el caso de la convección natural. Además la curva de enfriamiento presenta un carácter exponencial bastante más evidente, por lo que el coeficiente de convección por intercambio de calor, h , prevemos que será mayor que en el caso de la convección natural.

En la figura 24 realizamos el ajuste semilogarítmico de la curva de enfriamiento obtenida para hallar el coeficiente de enfriamiento γ según la ecuación (9).

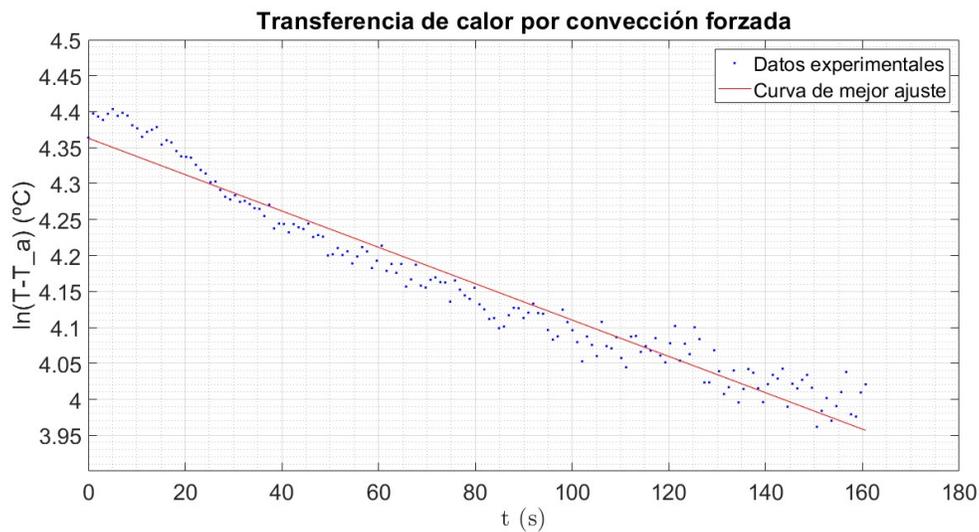


Figura 24: Ajuste semilogarítmico en el que se observa la dependencia lineal de $\ln(T - T_a)$ con el tiempo.

Según los resultados obtenidos en la tabla 5, podemos confirmar que $\gamma_{forzada} > \gamma_{natural}$, por lo que tiene sentido afirmar que el enfriamiento mediante convección forzada es mucho más rápido que el enfriamiento a través de la convección natural. Si procedemos ahora a calcular el nuevo coeficiente de intercambio de calor por convección forzada mediante la

Tabla 5: Coeficientes de mejor ajuste para la curva en figura 24.

Pendiente $\gamma_{forzada}$ (s^{-1})	$(25,3 \pm 0,5) \times 10^{-4}$
Ordenada en el origen $\ln(T_0 - T_a)$	$(4,363 \pm 0,004)$
R^2	0.95

ecuación (7) obtenemos:

$$h_{forzada} = (290 \pm 20) \frac{W}{m^2 K},$$

un resultado cercano a los valores típicos de este coeficiente para el caso de convección forzada (entre $50 - 250 \frac{W}{m^2 K}$).

Transferencia de calor mediante convección natural en el cubo impreso

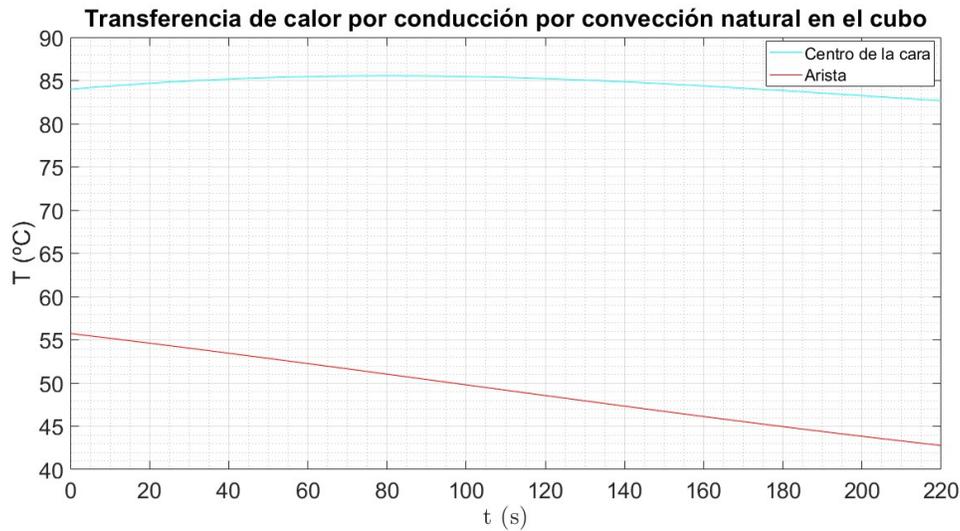


Figura 25: Evolución temporal de la temperatura en la zona central de una cara del cubo y en una de sus aristas en el estudio de la transferencia de calor mediante convección natural en el cubo impreso en 3D.

Mostramos ahora en la figura 25 cómo es la variación es la evolución temporal de la temperatura cuando actúa sobre el cubo convección debido al flujo natural del aire.

Comparemos cómo es la evolución temporal de la temperatura en una de las caras del cubo y en una de sus aristas. La temperatura inicial en cada una de las partes es distinta

ya que desde el momento que el cubo se saca de la cacerola hasta que se comienza a grabar transcurren unos segundos en los cuáles todas las partes del cubo se enfrían y no de manera homogénea. Según observamos en la figura 25, el enfriamiento en la arista del cubo es mucho mayor que en una de sus caras; mientras que en la cara, la temperatura se mantiene inicialmente constante hasta que comienza a enfriarse en torno a los 140 s, en la arista vemos cómo la temperatura decae de forma prácticamente lineal, haciendo que el cubo se vaya enfriando desde las aristas hacia la zona central de cada una de sus caras. El motivo por el cual las aristas se enfrían con mayor rapidez se debe a que la sección transversal mediante el cual se da la transferencia de energía es mucho mayor en las aristas que en las caras. Por lo tanto, esto provoca que el coeficiente de convección h sea mucho mayor en las aristas y, consecuentemente, el enfriamiento sea mayor en estas zonas que en las caras.

5.4. Transferencia de calor por conducción y convección

Una vez que hemos estudiado cómo actúan los mecanismos de transferencia de la conducción como la convección por separado veamos a continuación qué sucede con la transferencia de calor para cada una de las medidas experimentales que hemos tomado y cómo varía en cada una de ellas. Para ello, representaremos las curvas de mejor ajuste a los datos experimentales que tenemos en cada una de las medidas para su comparación.

Dividiremos las representaciones de las curvas para poder hacer un estudio más clarividente: mecanismos de transferencia de calor por separado, transferencia de calor con secador a distancia d y secador a una distancia $D = 2d$.

Medidas de la conducción, convección natural y convección forzada

A continuación procedemos a comparar, por separado, cómo actúan sobre la barra los mecanismos de conducción y convección tanto natural como forzada mediante las curvas de mejor ajuste a los datos experimentales.

Transferencia de calor por conducción, convección natural y convección forzada por separado

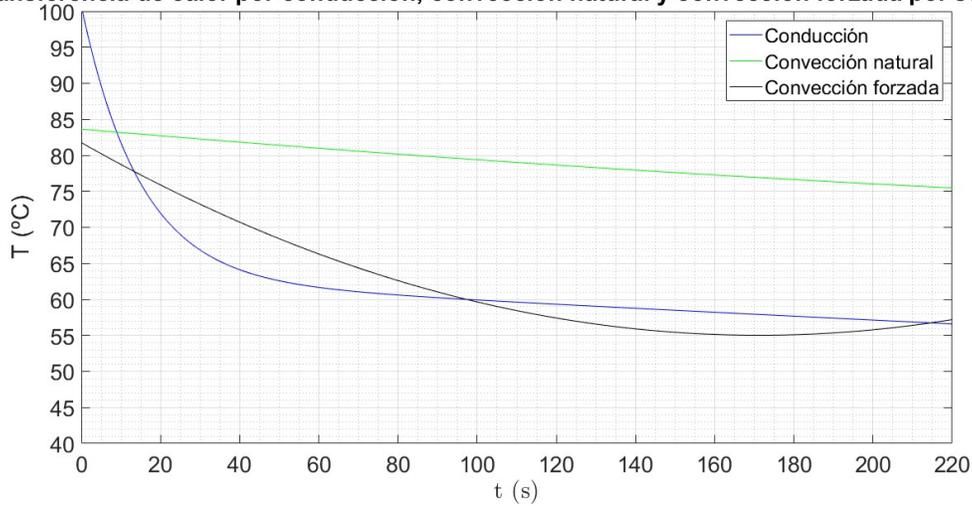


Figura 26: Evolución temporal de la temperatura mediante mecanismos de conducción, convección natural y convección forzada por separado (secador a distancia d en convección forzada).

Según observamos en la figura 26, la curva correspondiente al enfriamiento por conducción es claramente dominante al inicio del descenso de temperatura frente al enfriamiento por convección, llegando a producirse una caída de temperatura desde 100°C hasta 60°C en un intervalo de tiempo $t = 80 \text{ s}$, aproximadamente. Este enfriamiento de en torno a unos 40°C no llegamos a observarlo en ninguna de las dos medidas en las que actúa la convección. Partiendo desde aproximadamente unos 84°C , observamos en la curva verde como el enfriamiento mediante convección natural es muy pequeño en comparación cuando actúa el chorro de aire frío mediante el secador. En el caso de convección forzada (curva negra) el enfriamiento es más rápido, llegando a producirse un descenso de temperatura de aproximadamente 20°C para los primeros 80 s . Sin embargo, sigue siendo un enfriamiento mucho más pobre comparado con el que se produce mediante la transferencia de calor por conducción. Confirmamos de esta manera la clara dominación de la conducción sobre la convección como mecanismo de transferencia de calor en nuestro estudio en los primeros instantes de medida en nuestro estudio.

Medidas de la conducción y la convección forzada

En este caso, además de conducción por el baño térmico, tenemos transferencia de calor por convección forzada debido al uso del secador en los dos modos de potencia para el chorro de aire frío y el modo de aire caliente a una distancia d

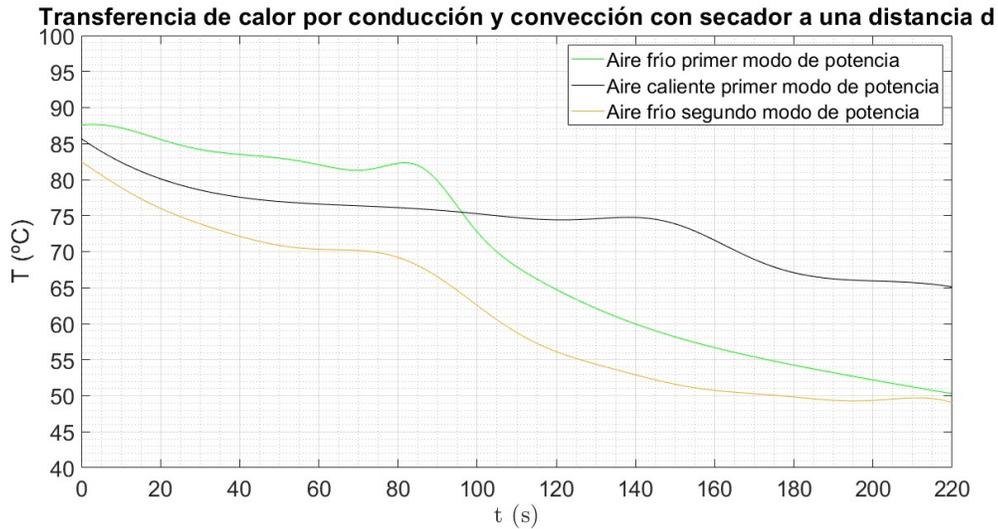


Figura 27: Evolución temporal de la temperatura mediante mecanismos de conducción y convección forzada (secador a distancia d).

Tal y como vemos en la figura 27, primero se produce una caída debida a la conducción en la placa de hierro ya que este mecanismo de transferencia de calor es el causante de que en los primeros instantes de tiempo nuestro objeto se enfríe rápidamente. Luego esta curva de enfriamiento no permanece constante en las medidas en las que se usa el secador con aire frío en la primera y segunda potencia (medidas 4 y 6, respectivamente) porque está actuando el mecanismo de convección forzada mediante aire frío. Por lo tanto, se observa en las curvas de la medidas 4 y 6 cómo la temperatura en el material sufre de nuevo una caída aproximadamente exponencial con el tiempo. Este hecho se observa en torno a $t = 80s$ donde, tras alcanzar un máximo, se produce otra caída en la temperatura. Además, las curvas de las medidas con el secador en el primer y segundo modo de potencia con el chorro de aire frío son muy parecidas en cuanto a la forma en la que decae T . Esto puede deberse a que, pese a ser mayor la cantidad de aire frío que sale del secador en el segundo modo de potencia, el

aire se difunde rápidamente en todas direcciones y no llega todo directamente a la placa de hierro. Por ello, en esta posición d del secador, la diferencia entre los dos modos de potencia no es tan significativa a la hora de estudiar el enfriamiento.

Por otra parte, en cuanto a la medida con el aire caliente (medida 5), inicialmente se observa una caída de temperatura parecida a la medida con aire frío en primera potencia (medida 4). Esto nos indica que, pese a que en una medida actúe chorro de aire frío y en otra aire caliente, al inicio lo que predomina es la conducción como mecanismo de transferencia de calor. Sin embargo, una vez llegados a los 80 segundos, se observa cómo con aire frío la temperatura decrece más rápidamente que con aire caliente. En la medida del aire chorro de aire caliente se ve en la figura 27 que el enfriamiento es prácticamente constante y la caída más brusca de temperatura no se vuelve a producir hasta los 140 segundos, siendo esta curva de enfriamiento con una pendiente mucho menor que las de las otras medidas. Estamos presenciando algo evidente, la placa de hierro se enfría más lentamente si sobre ella actúa un chorro de aire caliente en lugar de aire frío.

Medidas de la conducción y convección con diferentes modos de potencia del secador a distancia $D=2d$

En la figura 28 observamos cómo son las curvas de enfriamiento para cada una de las dos medidas a estudiar. El comportamiento que siguen es parecido al que vimos en la figura 27, al inicio la conducción es el mecanismo dominante en ambas curvas pero aquí sí tenemos una diferencia bastante clara en comparación con las medidas del chorro de aire frío con el ventilador usando el primer y el segundo modo de potencia. Pese a que el inicio es el mismo, en torno a $t = 70s$ en la medida con el secador a distancia D y al máximo de potencia (medida 8) se produce una caída de temperatura muy brusca mientras que en la medida con el chorro de aire frío en el primer modo de potencia, el enfriamiento es mucho más liviano. Este hecho se debe a que la curva de enfriamiento tendrá una gran dependencia con el modo de potencia del secador ya que se encuentra a una distancia mayor y esto provoca que para un chorro de aire frío de poca potencia prácticamente no llegue nada de aire en comparación con el modo

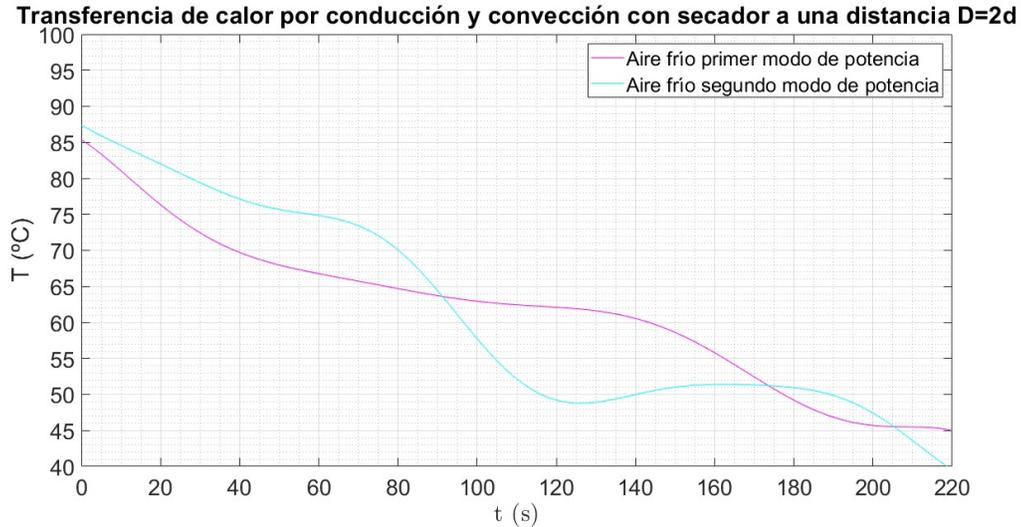


Figura 28: Evolución temporal de la temperatura debido a mecanismos de conducción y convección forzada (secador a distancia D).

de una potencia mayor. Por ello, a medida que alejamos el secador de nuestra muestra, para apreciar claramente los efectos de la convección forzada es necesario una mayor potencia en el secador. En el caso de la medida con el primer modo de potencia (medida 7), además del enfriamiento inicial por conducción, se observa una bajada de T en torno a $t = 150s$ mientras que para la medida del segundo modo de potencia ya se observa como obtenemos hasta una curva adicional de enfriamiento en $t = 190s$. Por último, se destaca como para $t > 200s$ se vuelve a observar una curva de pendiente parecida a la obtenida en $t = 70s$ para la medida 8, mientras que en la medida 7 el enfriamiento vuelve a comportarse de manera prácticamente lineal. Por ello, la barra se enfriará más rápidamente mediante el segundo modo de potencia que con el primer modo de potencia, alcanzando más pronto su temperatura de equilibrio.

Como ya dijimos, nuestro material no se enfriará de forma homogénea, por ello, en lugar de observar una caída constante en la temperatura lo que se ve es cómo se producen varias caídas a lo largo del tiempo. Estos descensos están "desplazados" hacia la izquierda en el tiempo para el caso de la medida con el segundo modo de potencia en el secador (medida 8), lo que nos indicia que pese a que todos los puntos no se enfrían de la misma forma y al mismo ritmo sí que lo hacen de forma más rápida que en el caso de la medida en el primer modo de potencia.

6. Conclusiones

Por último, veamos que conclusiones hemos sacado tras realizar el estudio al completo la transferencia de calor tanto por conducción como por convección a través del uso de la cámara termográfica.

- Hemos ajustado una correcta recta de calibración para transformar adecuadamente los valores de píxel en escala de grises a temperatura.
- Este dispositivo experimental nos proporciona una forma de medir la transferencia de calor por los mecanismos de conducción de convección y nos permite hallar valores aproximados para el coeficiente de convección h y la conductividad térmica k .
- Cálculo experimental medianamente preciso sobre la conductividad de nuestro material y el coeficiente de convección del aire mediante el uso de la cámara termográfica.

Obtenemos un resultado un tanto mayor al esperado para el cálculo del coeficiente de convección natural, $h_{natural} = (61 \pm 4) \frac{W}{m^2 K}$. Este hecho puede deberse a la complejidad del propio cálculo de este coeficiente ya que depende de factores como la geometría del objeto, la diferencia de temperatura, la rugosidad superficial, presión... Debido a esta dependencia tan alta de parámetros difíciles de controlar, los valores tabulados en la literatura de entre $5 - 25 \frac{W}{m^2 K}$ se asemejan más a una estimación de lo que debería valer que a un cálculo totalmente preciso. Para el caso del coeficiente de convección forzada obtenemos que $h_{forzada} = (290 \pm 20) \frac{W}{m^2 K}$, un valor que sí se aproxima más a los comentados en la sección *Comparativa de los tres mecanismos de transferencia de calor*, de entre $50 - 250 \frac{W}{m^2 K}$. Sin embargo, cabe destacar la complejidad para el cálculo totalmente preciso de este coeficiente ya que además se incluyen factores como la velocidad, el régimen y las propiedades del aire que está fluyendo sobre la placa. Así pues, podemos destacar que hemos obtenido una buena aproximación para el cálculo de estos dos coeficientes.

En cuanto al cálculo de la conductividad térmica, sabemos los valores típicos de ésta son altamente dependientes del porcentaje de carbono e impurezas con el que esté

mezclado el hierro. Según el contenido de carbono, los valores de la conductividad se encuentran alrededor de: $k = 60 \frac{W}{m \cdot K}$ (bajo contenido), $k = 50 \frac{W}{m \cdot K}$ (medio contenido) y $k = 40 \frac{W}{m \cdot K}$ (alto contenido). Por lo tanto, según el valor obtenido experimentalmente en (17) de $k = (104,4 \pm 6,2) \frac{W}{m \cdot K}$, podemos pensar que la barra quizás no está compuesta únicamente por hierro. Haciendo uso de las prácticas de nuclear de la asignatura Técnicas Experimentales II, procedimos a estudiar la composición de nuestra muestra objeto mediante la observación de los Rayos X característicos de ella. Según lo hallado, a pesar de que las proporciones de hierro existen en nuestra muestra, se observa que hay una mezcla de metales como níquel o zinc que afectan claramente al valor concreto de la conductividad térmica. Esta magnitud física depende altamente del porcentaje de impurezas que tenga la aleación con la que estamos trabajando, afectando (dependiendo de las proporciones exactas de cada uno de los metales) de forma directa al valor concreto de k . A pesar de ello, obtenemos una estimación para el valor de la conductividad térmica que presenta el mismo orden de magnitud que el esperado. En función de las proporciones de hierro, níquel y zinc que presente nuestro material la conductividad puede variar desde los 40 hasta los $120 \frac{W}{m \cdot K}$. Por ello, concluimos que el valor que obtenemos para la conductividad térmica se encuentra en el rango esperable que debería medir con exactitud.

- La composición inhomogénea de nuestro material provoca que no se siga un enfriamiento progresivo como se espera teóricamente. Es importante destacar que cada zona de la placa se enfría a un ritmo diferente provocando cambios bruscos y no progresivos en la evolución temporal de la temperatura.
- En cuanto al estudio de la transferencia de calor en el cubo impreso en 3D, concluimos que el enfriamiento no se observa tan claramente como en la barra. Esto se debe a que al estar impreso en PLA, un plástico biodegradable y biocompatible, sus propiedades térmicas hacen que sea difícil observar de forma clarividente cómo se produce la transferencia de calor a través de él. Su valor tan pequeño de la capacidad calorífica hace que su capacidad de retener el calor sea muy baja y, por lo tanto, responda de forma tan rápida a los cambios de temperatura. Esto es lo que observamos en la figura

25, donde vemos como las aristas han llegado a enfriarse hasta a los 55°C cuando se inicia la grabación del vídeo. Es decir, además de la baja capacidad calorífica del PLA, observamos cómo una arista se enfría mucho más rápido que una cara del cubo debido a que el área específica de la arista es mucho mayor. Por lo tanto, podemos afirmar que el cubo se enfría desde las aristas hasta las caras.

- Tras el uso de todas las aproximaciones realizadas podemos concluir con que los resultados obtenidos concuerdan con los que cabría esperar y las medidas realizadas sobre la conductividad térmica y los coeficientes de convección forzada son coherentes con los valores reales. Además, hemos conseguido explicar la forma que presentan las diferentes curvas de enfriamiento cuando actúan los mecanismos de transferencia de calor tanto juntos como por separado.
- Cabe destacar que mediante el dispositivo experimental y el código en MATLAB hemos sido capaces de estudiar un área en concreto del vídeo y la temperatura en cada uno de los puntos de dicha región. Ya existen modelos de cámaras termográficas que son capaces de analizar la temperatura en una región en concreto, sin embargo su precio es desorbitado en comparación con el de la cámara termográfica usada en nuestro estudio. Por lo tanto, hemos implementado una función que incluyen cámaras termográficas de 30 mil euros en una cámara cuyo valor es de unos 3 mil euros.

7. Bibliografía

Referencias

- [1] Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*.
- [2] Çoprel, Y. A., & Boles, M. A. (2013). *Termodinámica - 7ed.* Bookman Editora.
- [3] Boyer, H., & Gall, T. (1998). Metals Handbook Desk Edition. *En ASM International eBooks*. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.9781627081993>
- [4] Jose María Martín Olalla. *Seminarios de Termodinámica: Transmisión del calor*.
- [5] Figura 1. <http://apuntes.santanderlasalle.es/historia1/industrializacion/industrializacion.htm>
- [6] Figura 4. Norton, A. *Chapter 1: Fourier Equation and Thermal Conductivity. ppt video online download*. <https://slideplayer.com/slide/8713468/>
- [7] Figura 5. *Introducción a la Convección*. <http://equipo3transportedeenergia.blogspot.com/2017/05/introduccion-a-la-conveccion.html>
- [8] Figura 6. *Stefan–Boltzmann law: power radiated by a greybody with. . . (s.f-b)*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/figure/Stefan-Boltzmann-law-power-radiated-by-a-greybody-with-different-emissivitiesfig1263862713>
- [9] Figura 8. Fin, D. (2023). Leis da termodinâmica: conceitos e fórmulas. *Aprova Total*. <https://aprovatotal.com.br/leis-da-termodinamica/>
- [10] Manual de instrucciones cámara termográfica KCTE-384
- [11] Ficha técnica impresora Witbox 1 BQ

Anexo



Figura 29: Cámara termográfica junto al trípode *ultralight* en el proceso de la toma de medidas en el laboratorio de Termodinámica (Facultad de Física).



Figura 30: Impresora 3D Wibox 1 BQ.

<i>Imagen y datos ópticos</i>	
Resolución IR	384 x 288 píxeles
Modo de enfoque	Manual
Sensibilidad térmica	<0.06° C a +30°C
Distancia focal	22 mm
Campo de visión	24,6° x 280,6°
Distancia de enfoque mínima	0,3 m
<i>Presentación de imagen</i>	
Pantalla	Táctil capacitiva, 320 x 240 píxeles
Modos de imagen	IR, visual, imagen en imagen, fusión de imágenes
Paleta de colores	GRIS/GRISINV HIERRO/HIERROINV ARCOIRIS/PLUMA
<i>Análisis de medición</i>	
Corrección emisividad	Desde 0.01 hasta 1 (manual)
Temperatura de funcionamiento	-20°C a +50°C
Rango de temperaturas medibles	-20°C a 150°C (bajo) 0°C a 400°C (alto)
<i>Almacenamiento de vídeos</i>	
Medio de almacenamiento	4Gb tarjeta microSD
Formato de almacenamiento de vídeo	640 x 480 a 30 fps (hasta más de 60 minutos)
<i>Sistema de energía</i>	
Batería	De polímero de litio, 4.5 h de funcionamiento

Tabla 6: Especificaciones técnicas principales de la cámara termográfica KCTE-384.

<i>Dimensiones</i>	
Dimensiones impresora	(x)505 x (y)388 x (z)450 mm ³
Dimensiones área de impresión	(x)297 x (y)210 x (z)200 mm ³
<i>Resolución de capas</i>	
Alta	100 micras
Media	200 micras
Baja	300 micras
<i>Velocidad de impresión</i>	
Velocidad recomendada	60 mm/s
Velocidad máxima recomendada	80 mm/s
<i>Electrónica</i>	
Pantalla de LCD con encoder rotativo con pulsador para la navegación	
Base fría de metacrilato tamaño A4	
Fuente de alimentación de 348W	
<i>Mecánica General</i>	
Bastidor de acero pintado al polvo	
Barras de cromo duro para los carros X,Y,Z	
Casquillos Igus para X,Y,Z	
<i>Software</i>	
OpenSource	
<i>Comunicaciones</i>	
Lector de tarjetas SD y tarjeta de 4 GB incluida	
Puerto USB	
<i>Materiales</i>	PLA 1.75 mm

Tabla 7: Especificaciones técnicas principales de la impresora 3D Witbox 1 BQ.