

DEMO 124

TRANSFERENCIA DE CALOR: LO QUE EL OJO NO VE



Termografía de una persona en el laboratorio de Física. Se pueden observar diferencias de temperatura entre las distintas partes del cuerpo (por ejemplo, menor temperatura en la nariz), o identificar los tubos de luz a mayor temperatura.

Autor de la ficha	Juan Carlos Jiménez Muñoz, Enric Valor i Micó
Palabras clave	calor, infrarrojo térmico, termodinámica, espectro electromagnético, temperatura, cuerpo negro, emisividad, leyes de la radiación
Objetivo	Analizar imágenes/vídeos obtenidos mediante una cámara térmica para ilustrar algunos fenómenos físicos relacionados con el calor y la temperatura
Material	Cámara térmica
Tiempo de Montaje	Nulo

Descripción

Introducción

La adquisición de termografías nos permite analizar tanto de forma cualitativa como cuantitativa una multitud de fenómenos y procesos físicos, tecnológicos e industriales. Las termografías permiten la visualización de fenómenos relacionados con la transferencia de energía que no podrían visualizarse de otro modo. El campo de aplicación de la termografía es muy amplio, abarcando tanto aplicaciones relacionadas con la investigación científica, como estudio de eficiencia energética de edificios, aplicaciones médicas, medioambientales, en la industria, etc.

Una termografía se obtiene a partir de una cámara térmica. Estas cámaras registran la radiación electromagnética emitida o reflejada por los objetos en la región del infrarrojo térmico, entre los 8 y 14 μm en el caso de la cámara utilizada en esta demostración. En esta región espectral se producen las transferencias de calor por radiación involucradas en muchos de los procesos que ocurren habitualmente a nuestro alrededor. Sin embargo, al contrario de lo que ocurre con la radiación visible (aproximadamente entre los 0.4 y 0.7 μm), el ojo humano no es sensible a la radiación térmica. Por tanto, una cámara térmica nos permite visualizar una imagen en la que la escala de valores se relaciona directamente con el valor de la radiación que proviene del objeto. La ley de la radiación de Planck nos permite convertir estos valores a temperatura, por lo que podemos decir que una termografía nos permite visualizar el patrón de temperaturas de una determinada escena.

Leyes básicas de radiación

1) Ley de Planck

En 1900 Max Planck dedujo la siguiente expresión que determina la radiancia espectral emitida por un cuerpo negro o emisor perfecto en cada longitud de onda y en cualquier dirección del espacio (pues la radiación del cuerpo negro es isotrópica):

$$L_{\lambda}^{\circ}(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1)$$

siendo c_1 y c_2 las constantes de radiación, $c_1=2hc^2=1.19104 \cdot 10^8 \text{ } \mu\text{m}^4\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}$, $c_2=hc/k=14387.7 \cdot 10^4 \text{ } \mu\text{m K}$, donde la radiancia espectral $L_\lambda(T)$ viene expresada en $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$, la temperatura del cuerpo T en K, y la longitud de onda λ en μm . Una representación de esta expresión se puede observar en la figura 1 para diferentes temperaturas. La ecuación de Planck puede invertirse para obtener una expresión para la temperatura:

$$T = \frac{c_2 \lambda^{-1}}{\ln\left(\frac{c_1}{\lambda^5 L_\lambda^o} + 1\right)} \quad (2)$$

De esta forma, a partir de la medida de la radiancia espectral emitida por un objeto podemos obtener su temperatura radiativa (asumiendo que se trata de un cuerpo negro).

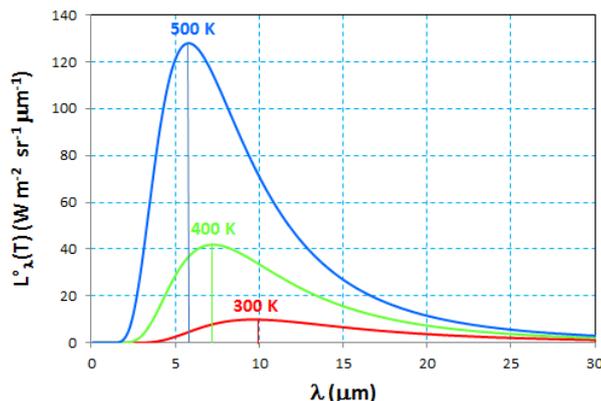


Figura 1.- Representación de la ley de Planck a diferentes temperaturas.

2) Ley de Stefan-Boltzmann

La ley de Planck hace referencia a la radiancia emitida por un cuerpo negro a una determinada longitud de onda y en una dirección definida. Para obtener la irradiancia o emitancia del cuerpo ($M^o(T)$), es decir, la energía emitida para todo el intervalo de longitudes de onda y de forma hemisférica, debemos de realizar una integración de la ley de Planck en todo el espectro y espacialmente de forma hemisférica, obteniendo lo que se conoce como ley de Stefan-Boltzmann:

$$M^o(T) = \int_0^\infty \pi L_\lambda^o(T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (3)$$

siendo σ la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma=5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. En este caso, puesto que el cuerpo negro tiene una emisión isotrópica (es una superficie *lambertiana*), la integración espacial es muy sencilla dando lugar a un factor π .

3) Ley de desplazamiento de Wien

En la figura 1 se puede apreciar claramente el desplazamiento del máximo de emisión a longitudes de onda cada vez más cortas a medida que aumenta la temperatura del cuerpo negro. La ley del desplazamiento de Wien permite determinar cuál es la longitud de onda en la que se observa el máximo de emisión a una temperatura determinada, y se obtiene aplicando la condición de máximo a la ley de Planck respecto de la longitud de onda ($dL_\lambda^o(T)/d\lambda=0$). De este modo se obtiene:

$$\lambda_{max} \cdot T = 0.0028976 \quad (4)$$

donde λ_{max} viene expresada en m y T en K. Por ejemplo, en el caso de las longitudes de onda 8 y 14 μm , el pico de emisión corresponde a temperaturas aproximadamente de 362 K (89 °C) y 207 K (-66 °C), respectivamente. Para temperaturas muy elevadas, como es el caso de la superficie solar (6000 K), el pico de emisión se produce en 0.5 μm . Para el caso de una temperatura ambiente típica (25 °C), el máximo de emisión se observa en 9.7 μm , por ese motivo los termómetros de infrarrojo suelen medir en un intervalo espectral centrado alrededor de 10 μm . Según el tipo de aplicación en la que se vaya a usar el termómetro, se usan intervalos espectrales diferentes atendiendo a los intervalos de temperatura usuales a medir en cada caso que determinan la posición de los máximos de emisión.

Concepto de emisividad

En las leyes de radiación anteriores hemos considerado un cuerpo negro, que es un objeto teórico que absorbe toda la energía radiante que llega a su superficie (por tanto su absorptividad es 1). Un cuerpo tal emite radiación siguiendo exactamente la ley de Planck; sin embargo, ningún material real tiene una absorptividad de 1 y radia energía siguiendo esta ley, sino que la emisión es inferior a la que aquella determina. Por ello, para el caso de materiales reales se introduce el

concepto de emisividad (ε), una magnitud espectral definida como el cociente entre la energía emitida por un cuerpo real y la energía que emitiría un cuerpo negro que se encontrase a la misma temperatura. Un cuerpo negro tiene, por definición, una emisividad $\varepsilon=1$, mientras que las superficies reales tienen emisividades $\varepsilon<1$. Así pues, con el fin de poder determinar correctamente la energía radiante emitida por un cuerpo a una determinada temperatura (o bien lo contrario, es decir, para poder estimar la temperatura de un cuerpo midiendo la energía que emite) las leyes de Planck y de Stefan-Boltzmann deben corregirse del factor de emisividad. Así pues: $M(T) = \varepsilon M^o(T) = \varepsilon \sigma T^4$ para el cálculo de la emitancia total, y $L_\lambda(T) = \varepsilon_\lambda L_\lambda^o(T)$ para el cálculo de la radiancia espectral.

Ejemplos de fenómenos físicos visualizados a partir de termografías

Uno de los fenómenos que pueden visualizarse mediante termografías es la transformación de energía mecánica en calor debido al rozamiento. En la Figura 2 se muestra el aumento de la temperatura del suelo debido al rozamiento de la rueda de la bicicleta. Por otra parte, la propia rueda también experimenta un aumento de temperatura.



Figura 2. Aumento de temperatura producido por el rozamiento entre el suelo y una rueda de bicicleta.

Otro ejemplo claro de aplicación de la termografía hace referencia a los fenómenos de conducción del calor. En la Figura 3 se muestra 3 barras de distintos metales, y por tanto con distinta conductividad térmica, una vez han sido calentados. El calor se difunde a mayor velocidad para el metal de mayor conductividad térmica (valores aproximados de conductividad térmica: acero=50, aluminio=237, cobre=380 W/(K·m)).

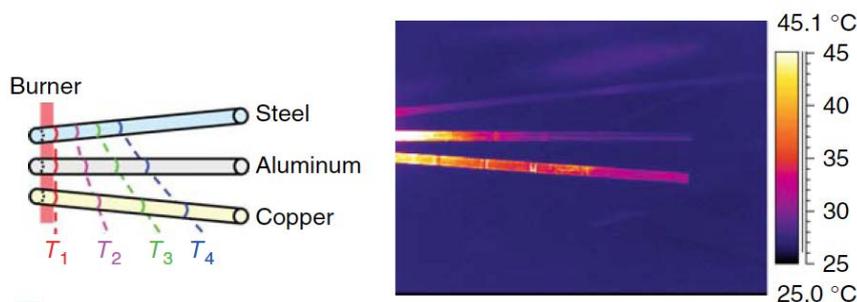


Figura 3. Conducción del calor en tres barras de metal (acero, aluminio y cobre).

Es conocido que cualquier corriente en un conductor disipa energía (según la expresión $P=I^2 \cdot R$, ley de Joule), por lo que la corriente acaba calentando el objeto. La Figura 4 muestra el calentamiento producido por las corrientes inducidas en un anillo de metal por el campo magnético del solenoide en un transformador. El fenómeno está basado en la ley de Faraday, según la cual si una espira conductora se expone a un campo magnético variable, entonces se induce una fuerza electromotriz.

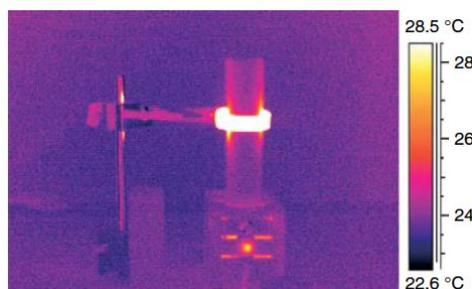


Figura 4. Calentamiento generado por una corriente inducida en un anillo conductor.

La Figura 5 muestra el instante inicial y el instante final del proceso de enfriamiento de un huevo de gallina. Para dos puntos dados del huevo (A y B), se representa también la variación de temperatura a lo largo del proceso. Se puede observar al final como existe un decaimiento exponencial de la temperatura conforme va aumentando el tiempo de enfriamiento. Este fenómeno se rige por la ley de Newton del enfriamiento, según la cual la temperatura en cada instante viene dada por $T = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt}$, siendo T_a la temperatura ambiente, T_0 la temperatura inicial, y k la constante de enfriamiento. La ley de Newton es una ley empírica que puede aplicarse a un proceso de enfriamiento independientemente del mecanismo de propagación del calor. Sin embargo, esta ley es una primera aproximación que debe corregirse.

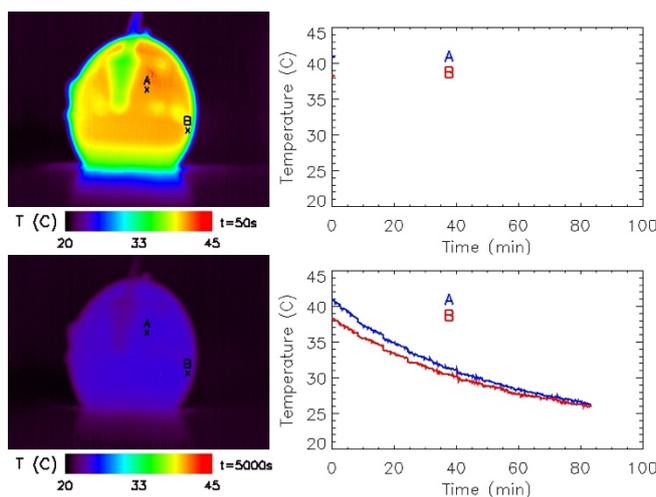


Figura 5. Enfriamiento de un huevo de gallina.

Por último, en la Figura 6 se muestra una termografía tomada en clase. Se puede observar el efecto del vidrio en los alumnos y alumnas que llevan gafas: puesto que el vidrio es opaco a la radiación infrarroja, en la termografía no se observa a través de ellos la temperatura de los ojos o los párpados, sino la temperatura del propio vidrio. Destaca también la elevada temperatura que se observa en las conducciones de la calefacción (cruz amarilla aproximadamente en el centro de la imagen), que no puede observarse a simple vista en la fotografía visible.



Figura 6. Termografía de los alumnos en clase.

Nota histórica

El descubrimiento de la radiación infrarroja se atribuye a William Herschel (descubridor de planeta Urano) en 1800. De manera accidental, cuando experimentaba con distintas lentes para observaciones astronómicas, observó que cuando la luz solar pasaba por un prisma, se producía un aumento de temperatura para diferentes colores del espectro conforme aumentaba la longitud de onda de la luz. Con el fin de comprobar este comportamiento curioso, diseñó un experimento consistente en dispersar la luz a través de un prisma y colocar los bulbos de tres termómetros en el color azul, el rojo y en una región próxima a este, pero fuera de la luz. Adicionalmente, se situó un cuarto termómetro para controlar la temperatura ambiente.

Herschel observó que la temperatura aumentaba del azul al rojo, pero lo más curioso era que el tercer termómetro que se encontraba junto al rojo era el que marcaba la mayor temperatura, por encima además de la temperatura ambiente. Ello le

llevó a pensar que existían unos ‘rayos caloríficos’ invisibles que más tarde recibirían el nombre de ‘infrarrojos’ (por hallarse situados ‘por debajo’ del rojo).



Figura 7. Reproducción de la experiencia de Herschel.

Una vez descubiertos estos ‘rayos caloríficos’, diseñó una serie de experimentos para examinar exhaustivamente sus propiedades y establecer sus similitudes y diferencias respecto al comportamiento de la luz. Comprobó que los rayos infrarrojos se reflejaban en superficies metálicas y espejos (usando termómetros situados en las direcciones de reflexión y protegidos de la radiación infrarroja directa), sufrían refracción (usando lentes convergentes que incrementaban el aumento de temperatura en un termómetro frente al aumento observado sin lente), determinó la transmisividad y absorptividad de vidrios de diferentes materiales y colores así como de diferentes líquidos, y comprobó el carácter dispersor de diferentes tipos de superficies. Todos sus resultados establecieron una base sólida para estudios posteriores de la radiación de cuerpo negro.

Por otro lado, su hijo John Herschel consiguió obtener la primera imagen térmica mediante una técnica llamada ‘evaporografía’ basada en el uso de una suspensión de partículas de carbón en alcohol. Cuando la radiación solar era dirigida sobre una lámina con esta suspensión, las zonas más calientes sufrían más evaporación mostrando la base blanca, mientras que las áreas más frías mantenían la suspensión quedando la región más oscurecida. De este modo, se consiguió el primer termograma, origen de la actual termografía.

Como comentario adicional, decir que William Herschel tuvo en su hermana Caroline una ayudante fundamental en su labor científica, llegando a ser una autoridad científica en Astronomía (llegó a descubrir 13 cometas nuevos usando un telescopio construido por su hermano) y siendo una de las primeras mujeres en obtener un reconocimiento oficial de su labor por la universidad británica.

<p>Sugerencias</p>	<p>1) Como complemento ver la ficha de la Demo 9 (Termómetro de infrarrojos) 2) Ver los videos depositados on-line (pincha en el texto para acceder) Café y taza , Leche fría en café caliente y Enfriamiento de un huevo con gráfica</p>
<p>Advertencias</p>	
<p>Bibliografía</p>	<p>Ring, E. F. J. (2000). The discovery of infrared radiation in 1800. The Imaging Science Journal, 48 (1), 1-8. Vollmer, M., and Möllmann, K.-P. (2010). Basic applications for teaching: direct visualization of physics phenomena. In: Infrared Thermal Imaging, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. ISBN: 978-3-527-407170.</p>