

DEMO 9

MEDIDA DE LA TEMPERATURA: termómetro de infrarrojos



Autor de la ficha	Enric Valor i Micó, Juan Carlos Jiménez Muñoz
Palabras clave	Termodinámica, temperatura, termómetro de infrarrojo térmico, cuerpo negro, emisividad, ley de la radiación de Planck.
Objetivo	Mostrar el fundamento de la medida de la temperatura sin contacto físico, así como una aplicación de la Ley de la Radiación de Planck.
Material	Termómetro de infrarrojo térmico que opera en el intervalo 8-14 μm .
Tiempo de Montaje	Nulo

Descripción

Introducción

Esta demostración muestra el uso de un sencillo termómetro de infrarrojos que permite medir la temperatura de un cuerpo o superficie a distancia. Para ello el termómetro mide la radiación electromagnética procedente del cuerpo, típicamente en el intervalo espectral 8-14 μm , y calcula la temperatura a partir de la ley de Planck de la radiación del cuerpo negro.

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):

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

siendo c_1 y c_2 las constantes de radiación, $c_1 = 2hc^2 = 1.19104 \cdot 10^8 \mu\text{m}^4 \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1}$, $c_2 = hc/k = 14387.7 \cdot 10^4 \mu\text{m} \text{K}$, donde la radiancia espectral $L_{\lambda}^o(T)$ 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).

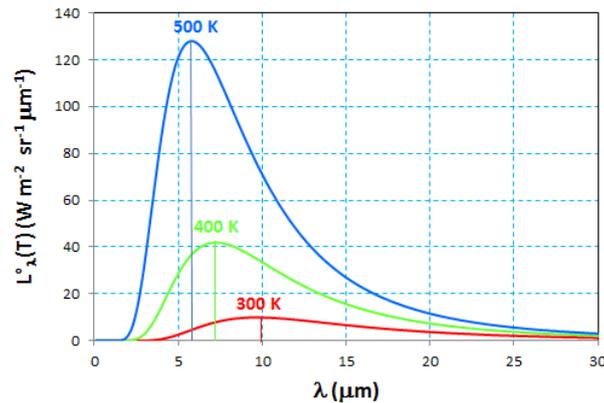


Figura 1.- Representación de la ley de Planck a diferentes temperaturas.

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, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. 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.

Termómetro de infrarrojo

El termómetro de la demostración es un instrumento sencillo que mide la radiación electromagnética (radiancia)



procedente de un cuerpo en el intervalo 8-14 μm . Hemos visto antes que la ley de Planck define la radiancia monocromática, por lo que lo que realmente mide el aparato es la convolución de la ley de Planck, corregida de la emisividad, con la función de respuesta del sensor:

$$L(T) = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda L_\lambda^o(T) f(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty f(\lambda) d\lambda} \approx \varepsilon a T^n \quad (5)$$

donde ε_λ es la emisividad espectral de la muestra, ε es la emisividad media del canal de medida finito del instrumento y $f(\lambda)$ es la función de respuesta del mismo. Con el fin de simplificar los cálculos, normalmente se usan funciones aproximadas para evitar realizar la integración y facilitar la inversión de la expresión anterior en la obtención de la temperatura; una aproximación usual es la función potencial expresada en el último término de la ecuación (5), donde los coeficientes a y n dependen de la función de respuesta y se obtienen por regresión entre los valores de temperatura y de la radiancia de cuerpo negro integrada correspondiente siguiendo la definición de la ecuación (5) (en este cálculo se toma $\varepsilon_\lambda=1$).

En todo caso, el termómetro disponible presenta directamente los valores de temperatura medidos (internamente realiza la inversión). Con el fin de tener en cuenta en cierta medida que las superficies reales no son cuerpos negros, el termómetro utiliza una emisividad prefijada de 0.95.

El uso del termómetro es muy sencillo. En la parte frontal dispone de una ventana donde aparece la medida de temperatura en $^\circ\text{C}$, con una sensibilidad de 1°C , siendo el intervalo de medida de -50°C a 270°C . Dispone de dos botones: MAX para proporcionar la temperatura máxima observada (activado) o bien la temperatura instantánea (desactivado); LASER para activar/desactivar un pequeño puntero láser que da una idea del centro del área sobre la cual está midiendo el termómetro. En el lateral derecho del instrumento hay un botón que sirve para ponerlo en marcha y para realizar la medida. Ésta se lleva a cabo manteniendo presionado el botón, tiempo durante el cual mide la temperatura del objeto que se esté observando. Cuando se deja de presionar el botón, queda fija la última medida realizada.

<p>Sugerencias</p>	<p>1) En esta demostración vale la pena explicar el fundamento de la medida (Ley de Planck) y distinguirlo del caso de los termómetros de contacto basados en el equilibrio térmico entre la sonda y el sistema medido. Se puede también comentar las ventajas que este tipo de medida conlleva: (i) medida a distancia cuando no es posible el contacto físico (p. ej. en hornos, cámaras de vacío, etc.); (ii) medida sobre un área extensa que permite determinar una temperatura media cuando la superficie es heterogénea; (iii) rapidez de respuesta; (iv) medida sobre objetos en movimiento).</p> <p>2) Resulta también interesante destacar que la medida no es puntual, sino sobre un área extensa cuyo tamaño depende de la distancia entre el termómetro y la superficie observada. Para ello puede hablarse del concepto de “campo de visión” del termómetro, el cual define la relación distancia-tamaño, y cuyo esquema está representado en el lateral izquierdo del sensor (D:S=6:1; ej: a 15 cm de distancia el diámetro del área es de 2.5 cm).</p> <p>3) Se puede medir la temperatura de varios objetos/superficies en el aula (por ejemplo, la temperatura de los tubos fluorescentes, de los radiadores de calefacción, de uno mismo, etc.). También resulta interesante medir la temperatura de las nubes (si las hay ese día, es inmediato hacerlo por la ventana) o del “cielo” si el día está despejado. En este último caso se puede incidir en que esta temperatura es una medida integrada de la radiación que nos llega procedente de la columna atmosférica que hay por encima de nosotros, pero NO es la temperatura del aire ni tampoco una media de las temperaturas del aire en la vertical.</p> <p>4) Esta demostración está relacionada con la número 124 (“Transferencia de calor: lo que el ojo no ve”), dedicada a la técnica termográfica.</p>
<p>Advertencias</p>	<p>Utilizar el láser con precaución (no apuntar a los ojos).</p>
<p>Bibliografía</p>	<p>H. Kaplan, “Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment”, SPIE Press Vol. TT34, SPIE Optical Engineering Press, 1999.</p> <p>F. F. Sabins, “Remote Sensing. Principles and Interpretation”, W. H. Freeman & Company, New Your, 3rd edition, 1997.</p> <p>J. A. Sobrino (ed.), “Teledetección”, Servei de Publicacions de la Universitat de València, 2000.</p>