
Trabajo Fin de Grado

MEDIDA DE EMISIVIDAD DE RECUBRIMIENTOS BAJO EMISIVOS MEDIANTE CÁMARA TERMOGRÁFICA

Andrea Martín Nieto

TRABAJO DIRIGIDO POR:
Enrique Carretero Chamarro

Universidad de Zaragoza
Facultad de Ciencias
Curso 2023-2024

Índice

1	Introducción y objetivos	1
2	Fundamentos teóricos	2
2.1	Teoría de cuerpo negro	2
2.2	Cuerpos grises y radiadores selectivos	4
2.3	Norma europea para la determinación de la emisividad	5
3	Determinación de emisividad a partir de la medida del coeficiente de reflectancia	6
3.1	Estimación de la emisividad con el emisómetro	6
3.2	Medidas con espectrómetro	7
3.2.1	Espectrofotómetro en visible e infrarrojo cercano	7
3.2.2	Espectrómetro en infrarrojo	8
3.2.3	Medidas de transmitancia y reflectancia	9
3.3	Determinación de la emisividad	10
3.4	Emisividad según la norma europea	11
4	Medida de emisividad con cámara termográfica	12
4.1	Cámara termográfica	12
4.2	Obtención de la fórmula de la emisividad	14
4.3	Optimización del montaje y proceso de medida	15
5	Resultados obtenidos con la cámara termográfica	18
5.1	Toma de medidas	18
5.2	Análisis de resultados y establecimiento del modelo	20
5.3	Validación del modelo	22
6	Conclusiones	24
	Referencias	25
	Anexo	I

1. Introducción y objetivos

Los recubrimiento bajo emisivos se aplican en las superficies de los vidrios de edificación ya que permiten la entrada de la radiación solar visible, mientras que reflejan la componente infrarroja de la radiación solar, además del infrarrojo térmico. Para ello, presentan transmitancia alta en el rango visible y una elevada reflexión en el rango de infrarrojo. Gracias a estas características, permiten una mejora del rendimiento energético de los edificios, al permitir mantener cálido el interior de los edificios en climas fríos y fresco en climas cálidos (Ver Figura 1); así como en los invernaderos, al permitir el paso de la componente visible de radiación solar pero no de la infrarroja. Normalmente, estos recubrimientos están formados por dos capas de dieléctrico y una de metal en medio, que suele ser plata [1][2][3].

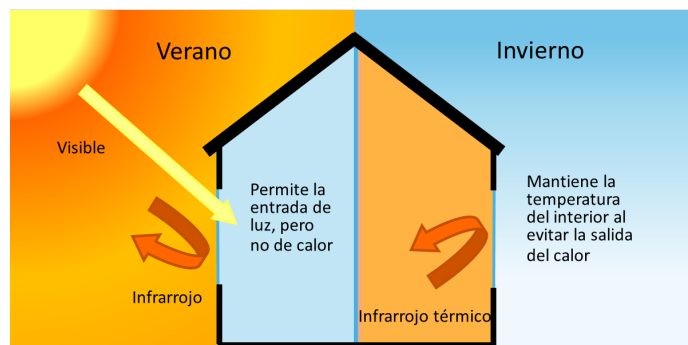


Figura 1: Esquema efecto de los recubrimientos bajo emisivos. Reflexión de la componente infrarroja de la radiación solar y transmisión de la componente visible.

Para poder aplicar los recubrimientos y obtener un rendimiento energético óptimo, es importante conocer la emisividad. Tal y como se detallará más adelante, la emisividad de estos recubrimientos puede ser medida con diferentes procedimientos. Aunque el método más rápido es obteniendo el valor directamente mediante un emisómetro, la emisividad suele determinarse mediante la medida espectral de la reflectancia en el infrarrojo térmico haciendo uso de un espectrómetro. A partir de la reflectancia espectral se puede determinar la reflectancia, R , que está relacionada con la emisividad, ε , mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = 1 - R \quad (1)$$

Sin embargo, es importante tener en cuenta que este método presenta un inconveniente principal, ya que para recubrimientos bajo emisivos el error relativo asociado es significativo, tal y como podemos observar con el siguiente ejemplo: para una misma muestra a una temperatura dada obtenemos dos medidas de reflexión, de valores 99.1 % y 99.4 %, cuya diferencia se debe al error aleatorio. La diferencia absoluta entre estas medidas es de un 0.3 %, lo cual es un valor que podemos considerar despreciable frente a las medidas. Sin embargo, si determinamos la emisividad según la Ec. (1) obtenemos valores de 0.9 % y 0.6 %. A pesar de que la diferencia absoluta entre estos valores sigue siendo un 0.3 %, el primer valor supone un 50 % más que el segundo, por lo que el error relativo ya no puede considerarse despreciable.

Durante la realización de trabajos previos sobre las propiedades ópticas de los recubrimientos bajo emisivos [4], se observó que mediante la realización de medidas con una cámara termográfica, se podía obtener una estimación cualitativa de la emisividad de los recubrimientos bajo emisivos.

En este trabajo, se plantea el diseño y optimización de un montaje que permita obtener cuantitativamente los valores de emisividad para una serie de recubrimientos bajo emisivos, a la vez que permita obtener medidas de emisividad con un error asociado inferior al obtenido con el espectrofotómetro. Para ello, contaremos con una cámara termográfica FLIR AX8, que, a partir de mediciones de la temperatura aparente de las muestras, nos permitirá obtener las emisividades de estas.

Además de obtener los valores de la emisividad, nos interesa un método que permita clasificar las muestras en función de su emisividad de una manera eficiente y sin necesidad de realizar cálculos adicionales, como ocurre con el método del espectrómetro.

2. Fundamentos teóricos

2.1. Teoría de cuerpo negro

En primer lugar, es necesario introducir la teoría asociada a la radiación de cuerpo negro, por la cual todas las superficies de los cuerpos, por el hecho de estar a cierta temperatura, emiten radiación electromagnética [5][6].

Un cuerpo negro es aquel que absorbe, y como se verá más adelante, emite completamente las radiaciones que inciden sobre él, de manera que no se produce ni reflexión ni transmisión a través de él. De esta manera, podemos definir la emisividad de la superficie de un cuerpo, ε , como la proporción de radiación emitida por dicha superficie frente a la que emitiría un cuerpo negro, de manera que toma valores entre 0 (espejo perfecto) y 1 (cuerpo negro).

La radiación del cuerpo negro tiene un espectro e intensidad dependientes de la temperatura del cuerpo. La ecuación de Planck describe la dependencia de la densidad espectral de energía con la temperatura de la superficie, T , para una determinada longitud de onda, λ :

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (2)$$

Donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz y k la constante de Boltzmann

La Ec. (2) nos proporciona la potencia emitida a longitud de onda λ y temperatura de la superficie T por unidad de ángulo sólido y unidad de área normal a la propagación.

Es conveniente determinar la potencia emitida a longitud de onda, λ , y temperatura de la superficie, T , por unidad de área, $B(\lambda, T)$. Para ello, es necesario realizar la integral sobre el ángulo sólido sobre el que emite el cuerpo negro, Ω , lo que corresponde integrar sobre la superficie de una semiesfera de radio arbitrario R , donde φ es el ángulo azimutal, de 0 a 2π ; y θ es el ángulo polar, de 0 a $\pi/2$ (Ver Figura 2).

Esta integral se detalla a continuación:

$$\begin{aligned}
B(\lambda, T) &= \int_{\Omega} E(\lambda, T) \underbrace{\cos \theta}_{\text{Superficie normal}} d\Omega = E(\lambda, T) \int_A \underbrace{\frac{dA}{R^2}}_{d\Omega} = \\
&= E(\lambda, T) \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \underbrace{R \sin \theta}_{\text{Radio anillo}} \underbrace{R d\theta}_{\text{Espesor anillo}} \frac{d\varphi}{R^2} = 2\pi E(\lambda, T) \left[\frac{\sin^2 \theta}{2} \right]_0^{\pi/2} \Rightarrow \\
B(\lambda, T) &= \pi \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}
\end{aligned} \tag{3}$$

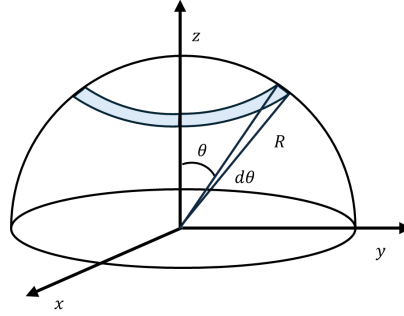


Figura 2: Integral a lo largo de la superficie de una semiesfera.

Representamos en la Figura 3 varios ejemplos de la ecuación de Planck, Ec. (2), en un rango de longitudes de onda entre 0.3 y 50 μm para distintas temperaturas, lo que nos permite observar como la posición del máximo de densidad espectral de un cuerpo negro se desplaza hacia longitudes de onda mayores al disminuir la temperatura de emisión. Esto se explica mediante la ley de Wien, por la cual el producto entre la temperatura y la longitud de onda en la que se sitúa el máximo de densidad espectral es constante, siendo este valor, b , igual a 2.898 K·mm, de manera que al aumentar la temperatura disminuye la longitud de onda donde se sitúa el máximo:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{b}{T} \tag{4}$$

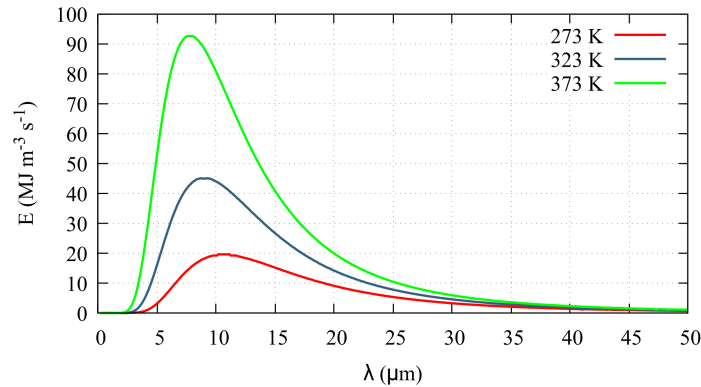


Figura 3: Representación de la densidad espectral del cuerpo negro para diferentes temperaturas.

Al realizar la integral de la potencia emitida por unidad de área obtenida en la Ec. (3) en todo el rango de longitudes de onda, obtenemos la potencia emitida total, P_{emit} , que guarda una dependencia lineal con la temperatura elevada a la cuarta, tal y como indica la ley de Steffan-Boltzmann, donde σ es una constante de valor $5.6740 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^4$.

$$P_{\text{emit}} = \sigma T^4 \quad (5)$$

2.2. Cuerpos grises y radiadores selectivos

Las leyes explicadas anteriormente son aplicadas para el caso del cuerpo negro, sin embargo, los objetos reales casi nunca cumplen estas leyes en una región de longitud de onda extendida, aunque en determinados intervalos espectrales pueden acercarse al comportamiento del cuerpo negro [7].

Esto se debe a tres procesos: absorción de una fracción de la radiación incidente, α (absorbancia); reflexión de una fracción de la radiación incidente, R (reflectancia) y transmisión de una fracción de la radiación incidente, τ (transmitancia). Estos factores dependen de la longitud de onda, y por conservación de la energía, la suma de estos es igual a la unidad:

$$\alpha(\lambda) + R(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (6)$$

Según la ley de Kirchoff, para cualquier material, por equilibrio termodinámico, la emisividad espectral, $\varepsilon(\lambda)$, y la absorbancia espectral, $\alpha(\lambda)$, son iguales, de manera que para materiales con transmitancia despreciable, $\tau \approx 0$, como pueden ser los recubrimientos bajo emisivos en el infrarrojo térmico, se puede determinar la emisividad espectral a partir de la reflectancia espectral:

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) = 1 - R(\lambda) - \tau(\lambda) \approx 1 - R(\lambda) \quad (7)$$

Teniendo esto en cuenta, además del espectro de radiación de un cuerpo negro, Ec. (2), podemos integrar en el espectro para determinar el valor de la emisividad para una temperatura dada, T :

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_0^\infty E(\lambda, T) [1 - R(\lambda)] d\lambda}{\int_0^\infty E(\lambda, T) d\lambda} \quad (8)$$

Podemos distinguir tres tipos de fuentes de radiación en función de su emisividad.

- **Cuerpo negro:** La emisividad no varía con la longitud de onda y su valor es 1.
- **Cuerpo gris:** La emisividad no varía con la longitud de onda y su valor se encuentra entre 0 y 1.
- **Radiador selectivo:** La emisividad varía con la longitud de onda, con valores entre 0 y 1.

Esto implica una modificación en la ley de Steffan Boltzmann, Ec. (5), que al tener en cuenta la emisividad de la superficie del cuerpo se expresa como:

$$P_{\text{emis}} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (9)$$

Como consecuencia, la representación de la densidad de energía espectral de un cuerpo gris y un radiador selectivo se ve modificada respecto a la del cuerpo negro, para el caso del cuerpo gris es un factor ε , tal y como podemos observar en la Figura 4.

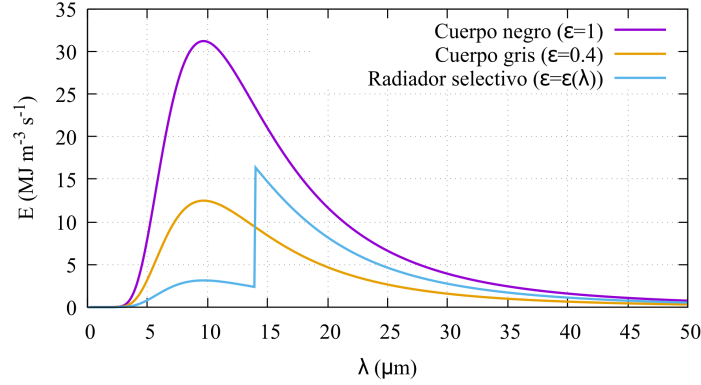


Figura 4: Representación de la densidad espectral de las distintas fuentes de radiación para $T=300$ K.

2.3. Norma europea para la determinación de la emisividad

En la Sección 2.2 se ha introducido la ecuación para la determinación de la emisividad a partir de la densidad espectral del cuerpo negro y los coeficientes de reflectancia, Ec. (8). Sin embargo, cuando se trabaja en la industria de los recubrimientos bajo emisivos, es necesario llevar a cabo un procedimiento de medida establecido para todas las muestras. Este procedimiento se encuentra en la norma europea EN 12898 [8], y especifica el método que debe seguirse para determinar la emisividad de las superficies de vidrio y vidrio con recubrimientos a temperatura ambiente. Es importante tener en cuenta que este procedimiento solo es aplicable a superficies planas, no difusoras y no transparentes al infrarrojo, como son los recubrimientos bajo emisivos con los que trabajamos.

En primer lugar, es necesario determinar la reflectancia normal a 283 K con un espectrofotómetro en el rango de $5 \mu\text{m}$ a $50 \mu\text{m}$. Notar que aunque se determine la emisividad a temperatura ambiente, las medidas deben realizarse a 283 K. Una vez obtenidos estos valores de reflectancia espectrales, $r_n(\lambda)$, procedemos a determinar la reflectancia R_n mediante la siguiente ecuación:

$$R_n = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{i=30} r_n(\lambda_i) \quad (10)$$

El sumatorio debe realizarse para las longitudes de onda indicadas en la Tabla A1 que podemos encontrar en el Anexo. Con R_n podemos determinar la emisividad total normal, ε_n :

$$\varepsilon_n = 1 - R_n \quad (11)$$

Finalmente, la emisividad, ε , se determina multiplicando ε_n por el valor de $\varepsilon/\varepsilon_n$ correspondiente a cada emisividad normal dado por la Tabla A2 del Anexo.

En nuestro caso va a ser necesario no tomar los dos últimos valores de las longitudes de onda para realizar el promedio, ya que son valores que, como veremos más adelante, al medirse con el espectrómetro presentan mucho ruido, llegando a tomar valores superiores a 1 que no tienen sentido físico, por lo que es conveniente no tenerlos en cuenta.

3. Determinación de emisividad a partir de la medida del coeficiente de reflectancia

En este apartado se presentan las medidas de la emisividad calculadas a partir de los coeficientes de reflectancia obtenidos con el espectrómetro. Por un lado, se va a calcular integrando en el rango espectral visible e infrarrojo, tal y como se explica en la Sección 2.2; y por otro lado, según la norma europea detallada en la Sección 2.3.

Se van a analizar varios recubrimientos bajo emisivos, a los que vamos a denominar: SuperE, AN62 y AS50; además de una muestra de vidrio sin recubrimiento.

3.1. Estimación de la emisividad con el emisómetro

Antes de determinar la emisividad a partir de las medidas del espectrofotómetro, puede ser conveniente realizar una estimación de estos valores de emisividad. Para ello, empleamos el emisómetro *TIR-100-2* de la marca INGLAS ilustrado en la Figura 5.

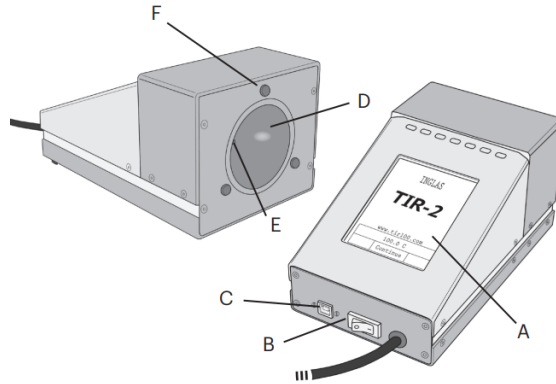


Figura 5: Esquema emisómetro *TIR-100-2* [9].

A. Pantalla. B. Interruptor On-Off. C. Conector USB-B. D. Semiesfera radiante.
E. Detector. F. Espaciador esfera-muestra.

El emisómetro consiste en un detector integrado en una semiesfera que se calienta a 100°C. Una vez alcanzada la temperatura, se realiza la calibración con un espejo patrón, cuya emisividad es conocida para el emisómetro, colocándolo en la parte externa de la semiesfera. Tras realizar la calibración, se coloca la muestra cuya emisividad se quiere medir y, en función de la radiación recibida por el emisómetro, este da el valor correspondiente de emisividad. [9]

Es necesario realizar varias repeticiones de las medidas para cada una de las muestras, ya que los valores que da el emisómetro no son estables. Una vez realizadas las medidas, en este caso cuatro para cada muestra, hacemos el promedio de estas, obteniendo así los resultados de la Tabla 1, que nos permiten una primera estimación de cuál es el recubrimiento que presenta mayor emisividad, en este caso el SuperE.

Muestra	ε
Vidrio	0.896 ± 0.007
SuperE	0.046 ± 0.003
AN62	0.022 ± 0.002
AS50	0.012 ± 0.003

Tabla 1: Estimación de la emisividad de las muestras con el emisómetro.

Hemos comentado que estos resultados son estimaciones y no unos valores completamente fiables. Esto es debido a posibles errores sistemáticos difíciles de cuantificar: el espejo patrón empleado para las medidas se encontraba algo rayado y desgastado, por lo que el valor de su emisividad puede ser diferente al tabulado por el emisómetro. Además, es posible que la semiesfera, que debía estar a 100 °C, no lo estuviese de manera estable, sino que presentase fluctuaciones de temperatura.

3.2. Medidas con espectrómetro

3.2.1. Espectrofotómetro en visible e infrarrojo cercano

A pesar de que las contribuciones a la emisividad que pueden presentar la transmitancia y reflectancia en el rango visible son despreciables, ya que, como podemos observar en la Figura 3, la densidad espectral en esas longitudes de onda es prácticamente nula; es interesante obtenerlas, ya que nos van a permitir demostrar lo indicado al comienzo de la [Introducción](#) sobre las propiedades de los recubrimientos bajo emisivos.

Para obtener medidas en el rango visible se hace uso del el espectrofotómetro UV-VIS-IR, que permite obtener medidas de reflectancia y transmitancia en el intervalo espectral de 0.3 μm a 2.5 μm , aunque solo se van a considerar las medidas hasta 2 μm , ya que a partir de este valor se obtendrán con el espectrómetro de infrarrojo de la siguiente subsección.

Como estas medidas no van a ser significativas en la determinación de la emisividad, y simplemente se realizan para comprobar las propiedades de los recubrimientos bajo emisivos se realiza una única toma de medidas para cada uno de los tres recubrimientos bajo emisivos y para el vidrio.

3.2.2. Espectrómetro en infrarrojo

En cuanto a las medidas en el infrarrojo necesarias para la determinación de la emisividad, se realizan haciendo uso del el modelo *Spectrum 100 FT-IR Spectrometer* de la marca PERKIN ELMER, ilustrado en la Figura 6, que permite obtener la reflectancia y transmitancia espectral en el rango de $2 \mu\text{m}$ a $50 \mu\text{m}$.

Este espectrómetro cuenta con una cubierta para la realización de las medidas, sin embargo, cuando se realizaron medidas con y sin la cubierta se observó que aunque salían medidas muy similares, la diferencia entre las medidas tomadas sin la cubierta era menor que en el caso de las tomadas con la cubierta, y con ello, también lo era el error asociado a ellas.

En la Figura 6a y 6b se muestran los complementos necesarios para las medidas de transmitancia y reflectancia respectivamente. Es importante recalcar que antes de medir la reflectancia es necesario realizar un ajuste de las posiciones de los espejos, de manera que el haz que llega al detector sea lo más intenso posible.

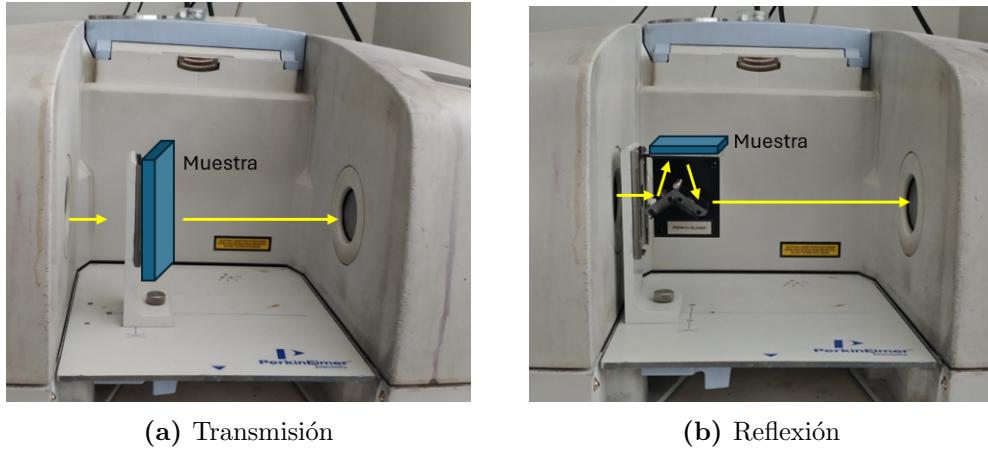


Figura 6: Espectrómetro *Spectrum 100 FT-IR* de PERKIN ELMER

Con este espectrómetro se realizan tres tomas de medidas para cada muestra. Cada una de estas medidas necesita una calibración previa.

En el caso de la transmitancia basta con realizar la medida de calibración sin ninguna muestra colocada, a continuación medir la muestra (de donde se obtiene τ') y por último hacer una medida de comprobación (τ_c) quitando la muestra, con la que debería obtenerse el 100 %. Sin embargo, este valor de comprobación suele diferir de lo previsto, por lo que es necesario que el valor final de la transmitancia, τ , tenga en cuenta esta medida de comprobación:

$$\tau = \frac{\tau'}{\tau_c} \quad (12)$$

En cuanto a las medidas de reflectancia, para realizar la calibración es necesario usar una muestra de oro patrón, cuya reflectancia de 99 % en el infrarrojo debemos tener en cuenta; y una vez calibrado, tomar la medida de la muestra correspondiente (R').

Sin embargo, conviene también medir las contribuciones del fondo (R_f), es decir, realizar una toma sin colocar ninguna muestra. Al igual que en el caso de transmitancia, es necesario realizar una comprobación de la calibración (R_c), quedando la expresión para la reflectancia:

$$R = 0.99 \cdot \frac{R' - R_f}{R_c - R_f} \quad (13)$$

3.2.3. Medidas de transmitancia y reflectancia

Una vez obtenidas la transmitancia y reflectancia en el rango visible e infrarrojo, las representamos en la Figura 7 y 8 respectivamente. Notar que en el caso de las medidas tomadas con el segundo emisómetro se realiza el promedio de las tres medidas.

Con este espectrómetro, además de las reflectancias y transmitancias de los recubrimientos bajo emisivos y el vidrio, se determina también la de una muestra de oro con el fin de obtener más adelante su emisividad. Notar que esta muestra de oro no es la usada como oro patrón, sino una lámina con una capa más fina de oro.

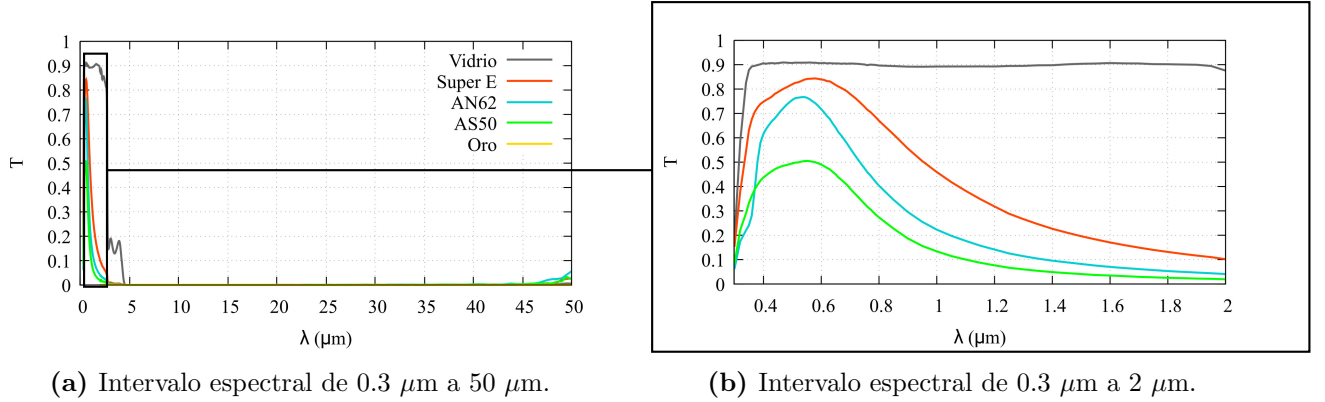


Figura 7: Transmitancia de las muestras de recubrimientos bajo emisivos.

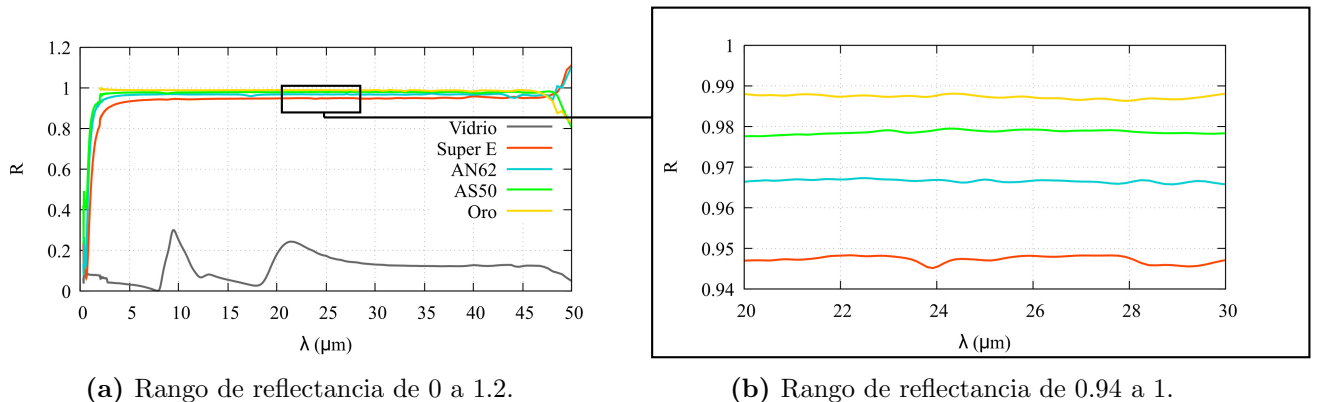


Figura 8: Reflectancia de las muestras de recubrimientos bajo emisivos.

Podemos observar como, tal y como habíamos indicado, los recubrimientos bajo emisivos presentan una elevada transmitancia en el rango visible (400-700 nm); sin embargo, en el rango infrarrojo la transmitancia disminuye drásticamente, siendo aproximadamente nula en el infrarrojo térmico.

En cuanto a la reflectancia de los recubrimientos, podemos observar como toma valores reducidos en el rango visible mientras que en el infrarrojo sus valores se aproximan a uno. Si ampliamos rango de reflectancia más pequeño (Figura 8b) podemos observar que la muestra con mayor reflectancia, y por ello menor emisividad, es la de AS50; y la de menor reflectancia y mayor emisividad la de SuperE, por lo que coincide con las estimaciones realizadas en la Sección 3.1.

Por último, notar lo indicado en la explicación de la norma europea en la Sección 2.3: en ambas gráficas de reflectancia y transmitancia, a partir de aproximadamente $45 \mu\text{m}$, se observa un incremento de los valores, algunos de ellos superiores a 1.

3.3. Determinación de la emisividad

Vamos a determinar la emisividad de las muestras de recubrimientos bajo emisivos (SuperE, AN62 y AS50) y de oro. Para ello, es necesario aplicar la Ec. (8) con los valores de reflectancia obtenidos con el espectrómetro de la Figura 8.

En el apartado anterior se han representado los promedios de los coeficientes de reflectancia y transmitancia medidos con el espectrómetro de infrarrojo, sin embargo, para determinar la emisividad vamos a usar estos valores por separado para luego realizar el promedio de la emisividad y obtener un error aleatorio asociado a la desviación estándar. Los valores de emisividad obtenidos para temperatura ambiente (25°C), así como sus correspondientes errores aleatorios quedan representados en la Tabla 2.

Muestra	ϵ
Vidrio	0.8844 ± 0.0003
SuperE	0.05208 ± 0.00012
AN62	0.0334 ± 0.0002
AS50	0.0233 ± 0.0009
Oro	0.013 ± 0.002

Tabla 2: Determinación de la emisividad de las muestras con las medidas del espectrómetro.

Notar que los errores aleatorios son generalmente bajos, aunque aumentan notablemente al disminuir la emisividad.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que estos errores aleatorios puede que no sean los más significativos, sino que sean los errores sistemáticos asociados a la toma de medidas con el espectrómetro.

Las causas de estos errores sistemáticos incluyen la humedad y la temperatura ambiente, ya que pueden influir en la transmisión del haz o en la respuesta del detector; sin embargo, el principal error sistemático puede venir dado por el desgaste de la muestra de oro patrón, ya que es posible que haya perdido reflectancia en el infrarrojo y esta ya no sea 99 %.

Por último, añadir que si realizamos una representación de la emisividad de los recubrimientos bajo emisivos y del oro en función de la temperatura (Figura 9) podemos observar como para el caso de los recubrimientos, existe un ligero aumento de la emisividad en función de la temperatura; sin embargo, esto no ocurre con el oro. Esto puede explicarse si tenemos en cuenta la Figura 8, donde podemos observar valores más bajos de la reflectancia en longitudes de onda más cortas del rango infrarrojo. Cuando aumenta la temperatura se pondera en mayor medida las longitudes de onda más cortas (Figura 3), que llevan asociadas una menor reflectancia, por lo que aumenta la emisividad. En cuanto al oro, podemos observar en la Figura 8 como desde el inicio del rango representado, $2 \mu\text{m}$, el valor de su reflectancia es constante, de ahí que en las temperaturas representadas su emisividad es constante.

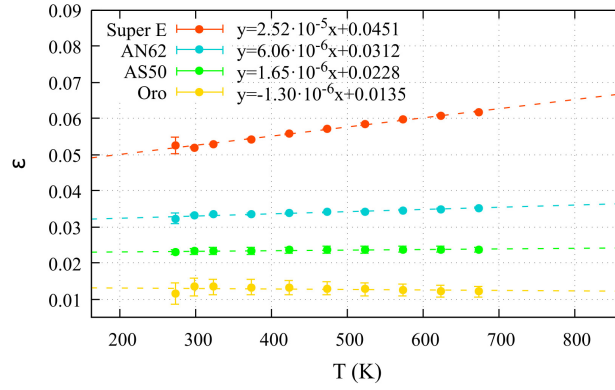


Figura 9: Emisividad de los recubrimientos en función de la temperatura.

3.4. Emisividad según la norma europea

En la Tabla 3 se expresan los resultados obtenidos para la emisividad según la norma europea especificada en la Sección 2.3. Como podemos observar, los valores son muy similares a los obtenidos realizando la integral de la Ec. (8), lo que nos indica que es un método eficaz para determinar la emisividad de las muestras.

Muestra	ϵ
Vidrio	0.8834 ± 0.0006
SuperE	0.054 ± 0.002
AN62	0.034 ± 0.002
AS50	0.0225 ± 0.0009
Oro	0.012 ± 0.002

Tabla 3: Determinación de la emisividad de las muestras según la norma europea.

4. Medida de emisividad con cámara termográfica

Tras haber determinado la emisividad con otros métodos, vamos a determinarla mediante la cámara termográfica. Para ello, usaremos el modelo de cámara termográfica FLIR AX8, cuyo funcionamiento vamos a detallar en la [Sección 4.1](#). Además, será necesario contar con una placa calefactora con la que calentaremos las muestras para así asegurar una diferencia de temperatura entre las muestras y el entorno. También contaremos con un termopar con el que mediremos la temperatura de la placa. La ilustración de este montaje, así como sus correspondientes optimizaciones se encuentran en la [Sección 4.3](#).

4.1. Cámara termográfica

En primer lugar, una cámara termográfica es un dispositivo que mide la temperatura y ofrece una imagen térmica de los objetos, sin necesidad de contacto, a partir de las emisiones de radiación térmica de estos, que será mayor cuanto más alta sea la temperatura a la que se encuentren los objetos. Con ello, permite registrar la temperatura de cada píxel de la imagen, asignando a cada píxel un tono de color.

Como hemos mencionado anteriormente, para la realización del trabajo, hacemos uso de la cámara FLIR AX8, que cuenta con una resolución de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y es capaz de medir en un rango de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Presenta un rango espectral de detección entre 6 y $15\text{ }\mu\text{m}$, sin embargo, no presenta la misma responsividad, $S(\lambda)$, en todas las longitudes de onda, tal y como podemos observar en la [Figura 10](#).

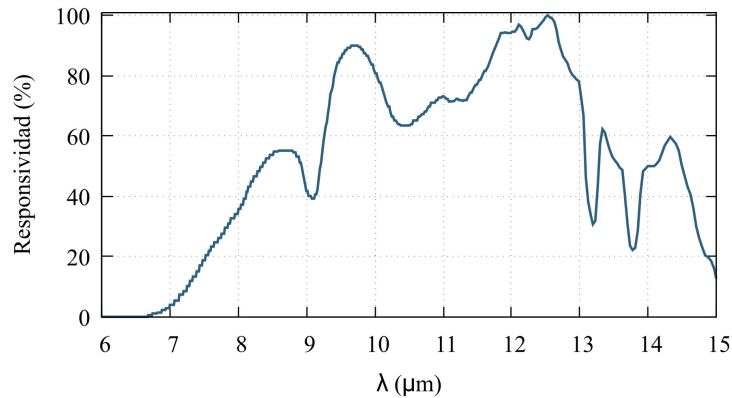


Figura 10: Responsividad en función de la longitud de onda para la cámara FLIR AX8.

Notar que esta función no es continua, sino que va a escalones. Esto se debe a que para obtener la responsividad fue necesario contactar con el fabricante de la cámara, que proporcionó la gráfica de la [Figura A1](#) del [Anexo](#), a partir de la cual, haciendo uso del programa automeris.io, se obtuvo la responsividad para varias longitudes de onda. Como estas longitudes de onda no correspondían a las proporcionadas por el espectrofotómetro, fue necesario realizar una aproximación a dichas longitudes de onda.

Teniendo en cuenta lo anterior, nos interesa determinar la emisividad de las muestras de la Sección 3.3 en el rango espectral de la cámara, ponderando por los valores de la responsividad, ya que pueden diferir de los obtenidos teniendo en cuenta todo el rango.

En cuanto al funcionamiento de la cámara, es importante tener en cuenta el esquema ilustrado en la Figura 11, en el que podemos observar las tres contribuciones de radiación que recibe la cámara: potencia de radiación del objeto, $\varepsilon\tau W_{\text{obj}}$; potencia de radiación del entorno reflejada a través de la superficie del objeto, $(1-\varepsilon)W_{\text{refl}}$; y potencia de radiación de la atmósfera, $(1-\tau)W_{\text{atm}}$; donde ε y τ son la emisividad del objeto y la transmitancia de la atmósfera; y W_{obj} , W_{refl} y W_{atm} son las potencias emitidas por un cuerpo negro a la temperatura del objeto, T_{obj} , la de los alrededores de la cámara, T_{refl} y la atmosférica, T_{atm} , respectivamente. De esta manera, la potencia de radiación total recibida por la cámara, W_{tot} , vendrá dada por:

$$W_{\text{tot}} = \varepsilon\tau W_{\text{obj}} + (1-\varepsilon)\tau W_{\text{refl}} + (1-\tau)W_{\text{atm}} \quad (14)$$

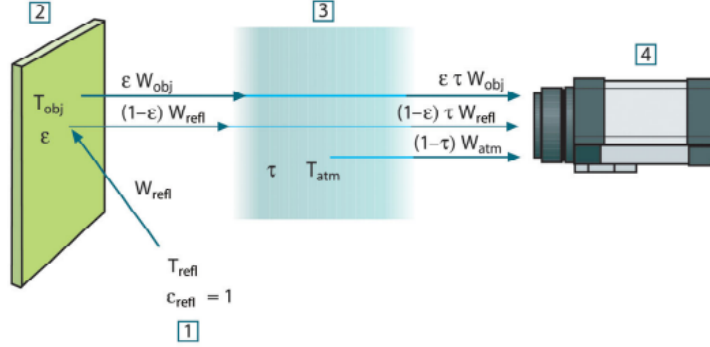


Figura 11: Esquema de la radiación recibida por el detector de la cámara termográfica [10].

1. Alrededores. 2. Objeto. 3. Atmósfera. 4. Cámara termográfica.

Cuando la potencia de radiación procedente de un cuerpo negro, W , que se encuentra a una temperatura T_{source} , incide sobre el detector de la cámara, este genera una señal de salida, U . Esta señal está relacionada con la potencia de radiación mediante una constante, C , cuyo valor y unidades desconocemos:

$$U = CW(T_{\text{source}}) \quad (15)$$

Al no conocer el valor de la constante C , no podemos determinar la señal generada por la cámara, U . Sin embargo, sabemos que esta será proporcional a la potencia emitida por un cuerpo negro a una temperatura T , ponderando por la responsividad de la cámara, $S(\lambda)$:

$$U \propto \int_0^\infty E(\lambda, T) S(\lambda) d\lambda \quad (16)$$

Representamos la ecuación anterior en la Figura 12 lo que nos permite obtener su dependencia polinómica de segundo grado con la temperatura.

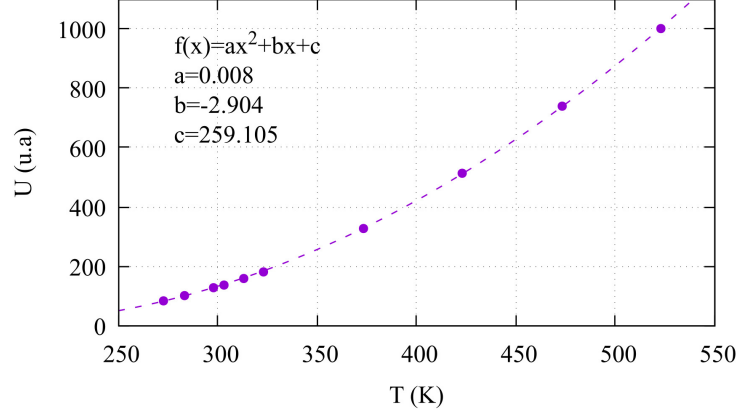


Figura 12: Ajuste de la señal de salida de la cámara en función de la temperatura.

Esto nos permite reescribir la Ec. (11), donde U_{obj} , U_{refl} y U_{atm} son las señales emitidas cuando el detector recibe potencia emitida por un cuerpo negro a temperatura T_{obj} , T_{refl} , T_{atm} ; y U_{tot} la señal total que emite la cámara:

$$U_{\text{tot}} = \varepsilon\tau U_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon)\tau U_{\text{refl}} + (1 - \tau)U_{\text{atm}} \quad (17)$$

En cuanto a la toma de medidas de temperatura con la cámara, se realiza mediante un *software* asociado a la cámara, al que debemos proporcionarle el valor de emisividad del objeto, ε ; la temperatura de los alrededores, T_{refl} ; la distancia objeto-cámara, d ; y la temperatura de la atmósfera, T_{atm} . De esta manera, la cámara genera una señal U_{tot} , y a partir de las temperaturas T_{refl} y T_{atm} determina las señales U_{refl} y U_{atm} , lo que le permite obtener U_{obj} despejando de la Ec. (17):

$$U_{\text{obj}} = \frac{1}{\varepsilon\tau} [U_{\text{tot}} - (1 - \varepsilon)\tau U_{\text{refl}} - (1 - \tau)U_{\text{atm}}] \quad (18)$$

Una vez obtenido U_{obj} , realiza el proceso inverso al cálculo de U y determina la temperatura a la que se encuentra el objeto, T_{obj} . Notar que este proceso se realiza en cada píxel de la cámara.

4.2. Obtención de la fórmula de la emisividad

En el apartado anterior se ha explicado el funcionamiento de la cámara para las medidas de temperatura, sin embargo, el objetivo de este trabajo es la determinación de la emisividad mediante la cámara termográfica.

En primer lugar, debemos tener en cuenta que el montaje con el que vamos a trabajar presenta una distancia cámara-objeto inferior a un metro. Esto nos permite despreciar la contribución de la radiación procedente de la atmósfera, lo que implica $\tau = 1$. De esta manera, la Ec. (17) puede reescribirse:

$$U_{\text{tot}} = \varepsilon U_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon)U_{\text{refl}} \quad (19)$$

A continuación, supongamos que en la placa calefactora tenemos una muestra de emisividad ε' que queremos determinar. A la cámara le proporcionamos unos valores arbitrarios de emisividad, ε , y temperatura del entorno, T_{refl} ; de manera que si medimos la temperatura aparente de la muestra, obtendremos, un valor T_{obj} inferior o superior a su temperatura real, T'_{obj} , en función de si la emisividad proporcionada es mayor o menor que la de la muestra. Notar que también dependerá del valor que hayamos fijado de T_{refl} . La señal total recibida por la cámara vendrá dada por la Ec. (19), siendo U_{refl} y U_{obj} las señales correspondientes a las temperaturas T_{refl} y T_{obj} .

Ahora, si la emisividad proporcionada a la cámara coincidiese con la de la muestra, ε' , y la temperatura ambiente que hemos fijado fuese la real, T'_{refl} ; la temperatura que nos da la cámara sería a la que se encuentra la muestra, T'_{obj} . La radiación que le llega a la cámara, y por tanto la señal generada, seguiría siendo la misma, ya que aunque hayamos variado los parámetros, sigue siendo la misma muestra a la misma temperatura. La expresión para este caso es la siguiente:

$$U_{\text{tot}} = \varepsilon' U'_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon') U'_{\text{refl}} \quad (20)$$

Con U'_{obj} y U'_{refl} las señales asociadas a T'_{obj} y T'_{refl} .

Si igualamos las ecuaciones para la señal total, U_{tot} , Ec. (19) y Ec. (20), podemos despejar el valor de la emisividad de la muestra que queremos determinar, ε' :

$$\begin{aligned} \varepsilon' U'_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon') U'_{\text{refl}} &= \varepsilon U_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) U_{\text{refl}} \\ \varepsilon' &= \frac{\varepsilon (U_{\text{obj}} - U_{\text{refl}}) + U_{\text{refl}} - U'_{\text{refl}}}{U'_{\text{obj}} - U'_{\text{refl}}} \end{aligned} \quad (21)$$

Por tanto, para determinar la emisividad de una muestra, ε' , con la cámara a la que le hemos proporcionado un valor de temperatura ambiente T_{refl} ¹ y emisividad, ε , debemos conocer la temperatura real a la que se encuentra la muestra, T'_{obj} ; medir su temperatura aparente con la cámara, T_{obj} ; y registrar el valor de la temperatura a la que se encuentra el entorno T'_{refl} . Con estas temperaturas podemos obtener las respectivas señales de salida de la cámara (Figura 12) y al aplicar la Ec. (21) obtener la emisividad de la muestra.

4.3. Optimización del montaje y proceso de medida

En primer lugar, conviene cubrir la placa calefactora con una capa de papel aluminio, ya que así se evita un sobrecalentamiento de la cámara, al ser bajo emisivo el papel de aluminio. Al colocarlo se consigue también disminuir el efecto de la radiación procedente de la placa calefactora que refleja en las paredes de alrededor, influyendo en la toma de imágenes.

En cuanto a la posición de la cámara, esta se coloca en un soporte, como se puede observar en la Figura 13, donde se encuentran las tres posiciones de la cámara que se valoraron.

¹Notar que la temperatura elegida no afecta a las mediciones de emisividad, pero sí que afecta si lo que buscamos es medir la temperatura de una superficie.

La primera posición, Figura 13a, en la que situamos la cámara paralela a la placa calefactora, fue descartada ya que, al mirar la imagen de las muestras tomada por la cámara, se observó que aparecía el reflejo de la propia cámara.

Para evitarlo, se planteó el montaje de la Figura 13b, en el que se giró la cámara hacia la pared. Sin embargo, con este montaje se observó que el efecto de la radiación de la pared que estaba al lado era más significativo.

Finalmente, se probó con la posición de la Figura 13c, elevando la parte delantera de la cámara, de manera que al quedar inclinada se evitase el reflejo. Para este caso se observó una menor influencia de los alrededores, por lo que fue la posición elegida.

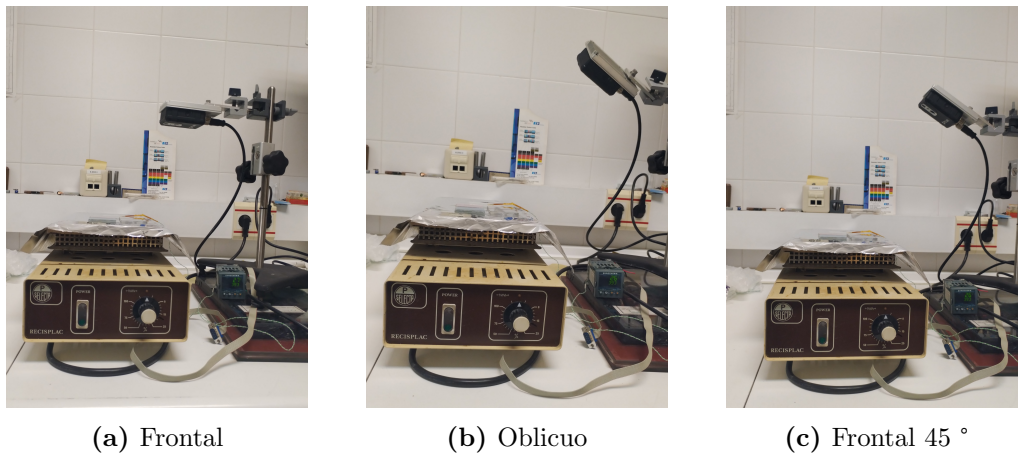


Figura 13: Posibles posiciones de la cámara para optimizar el montaje

Una vez elegida la posición, se probó a ajustar la distancia y altura de la cámara, para poder observar la mayor superficie de la placa calefactora. Sin embargo, se observó que, debido a posibles reflejos de las muestras en función de la posición en la que se encontrasen, existía una variación no superior a $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre medir la temperatura de una muestra en una posición de la superficie de la placa o en otra. Es por ello, que para tomar imágenes en las que sea necesaria una mayor precisión, como puede ser la medida de la temperatura aparente de dos muestras con emisividades parecidas, es conveniente medir siempre en la misma posición.

Para poder calcular la emisividad de las muestras, es necesario conocer la temperatura real a la que se encuentran las muestras. Inicialmente se planteó fijar la emisividad del vidrio, que es aproximadamente 0.9, de ahí que se determinase su emisividad en apartados anteriores; de manera que la temperatura que marcase el vidrio sería la real de las muestras. Sin embargo, la cámara puede medir una temperatura máxima de $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que se planteó medir la temperatura de la placa calefactora con un termopar puntual como el de la Figura 14a.

No obstante, se observó que este tipo de sensor no hacía buen contacto con la superficie de la placa calefactora. Es por ello que se decidió cambiar por un termopar con sensor superficial, como el ilustrado en la Figura 14b, que se colocó pegado con kapton en el vidrio.

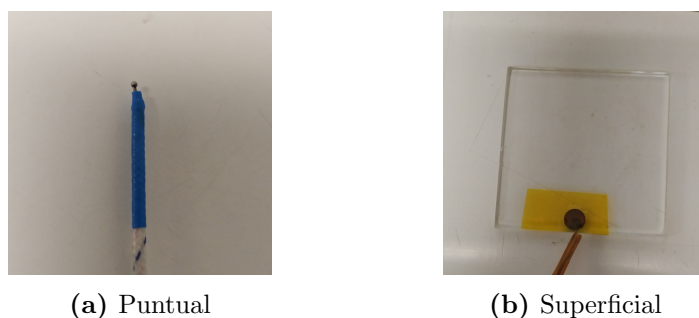


Figura 14: Termopares empleados para la determinación de la temperatura real de las muestras.

Por último, se propuso tratar de realizar las medidas sujetando un vidrio congelado sobre el montaje, tal y como se muestra en la Figura 15. Como se puede observar en la Figura 16, las temperaturas aparentes de las muestras de recubrimientos bajo emisivos bajaban drásticamente, alcanzándose valores negativos; mientras que las del vidrio apenas variaban. Esto nos indica que la contribución de los reflejos de los alrededores es significativa, de ahí que en los recubrimientos bajo emisivos y en el aluminio, que poseen una alta reflectancia sí que se note el efecto, pero no se note en el vidrio, cuya reflectancia es baja.



Figura 15: Posible método para evitar la radiación de los alrededores.

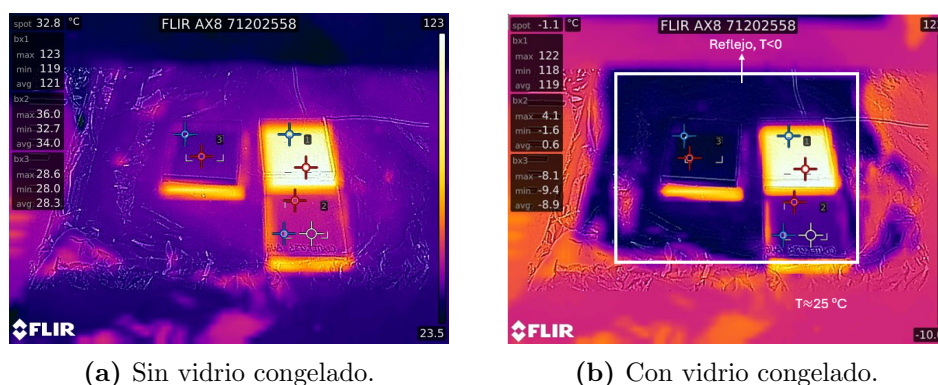


Figura 16: Comparación de medidas con y sin vidrio congelado.
Box 1: Vidrio. Box 2: Oro. Box 3: SuperE.

5. Resultados obtenidos con la cámara termográfica

En este apartado vamos a presentar y analizar los resultados obtenidos para la emisividad con la cámara termográfica. Para ello, será necesario fijar una emisividad en el programa de la cámara, ε y una temperatura de los alrededores, T_{refl} , que como se ha explicado en la Sección 4.1, no tiene por qué coincidir con la real. Con el termopar superficial colocado en el vidrio se medirá la temperatura real de las muestras, T'_{obj} ; mediante la cámara termográfica obtendremos la temperatura aparente de cada muestra, T_{obj} y también la temperatura real de los alrededores, T'_{refl} que se medirá al comienzo de cada toma de medidas. Con estas temperaturas se obtendrán las señales correspondientes: U_{refl} , U'_{obj} , U_{obj} y U'_{refl} , según el ajuste de la Figura 12. Con estas señales y la emisividad fijada a la cámara, ε , se podrá obtener el valor de la emisividad, ε' aplicado la Ec. (21).

Con ello se obtendrán las emisividades de las siguientes muestras: SuperE, AN62, AS50 y oro, que relacionaremos con las obtenidas con el espectrómetro, tratando de establecer un modelo que las relacione. Por último, realizaremos una validación del modelo midiendo la emisividad de unas muestras a las que denominaremos AS40, DAG66 y Bronce.

5.1. Toma de medidas

Para la realización de estas medidas, se ha fijado en la cámara un valor de emisividad, ε , igual a 0.9; una distancia cámara-objeto de 30 cm; y temperatura de los alrededores, T_{refl} , igual a 25 °C.

En primer lugar, en la Figura 17 comprobamos que, tal y como hemos indicado en la Introducción, la cámara termográfica permite una medida cualitativa de la emisividad de las muestras, puesto que a mayor temperatura aparente de las muestras, mayor emisividad. En este caso, se observa mayor temperatura aparente para la muestra SuperE, y menor para el caso del oro, lo que nos indica que son las muestras de mayor y menor emisividad respectivamente. También se puede observar una zona de temperatura superior, que corresponde a los cantos de vidrio de las muestras.

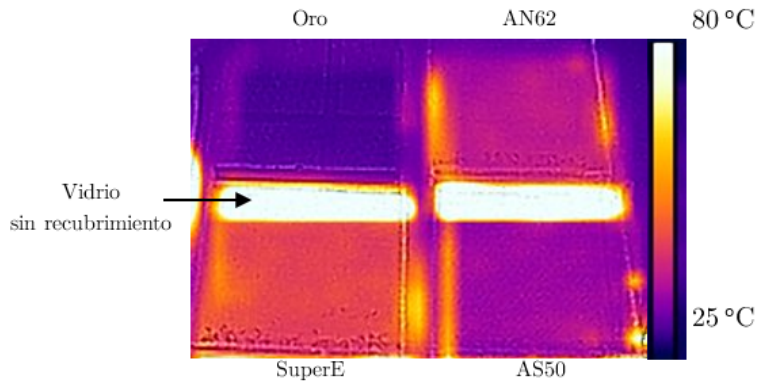


Figura 17: Imagen tomada con la cámara termográfica para una temperatura real de las muestras de 280 °C. Rango de medida de 25 °C a 80 °C. Temperatura real del vidrio mayor a 80 °C.

En la Sección 4.1 se detalla que la responsividad de la cámara varía con la longitud de onda, por lo que es conveniente calcular la emisividad a partir de las medidas de reflectancia y transmitancia del espectrómetro en el rango de detección de la cámara, ponderando por los valores de la responsividad. Este resultado se presenta en la Figura 18. Podemos observar como la dependencia de la emisividad con la temperatura es menor que cuando lo comparamos con la Figura 9, en la que se ha considerado todo el rango espectral. Teniendo en cuenta este resultado teórico, vamos a considerar que la emisividad no depende de la temperatura para este rango espectral, lo que nos indica que el rango espectral escogido por el fabricante es adecuado.

En la Tabla 4 se encuentran las emisividades de las muestras calculadas mediante las medidas del espectrómetro teniendo en cuenta la respuesta de la cámara para 100 °C. Con estos valores compararemos los resultados obtenidos con la cámara.

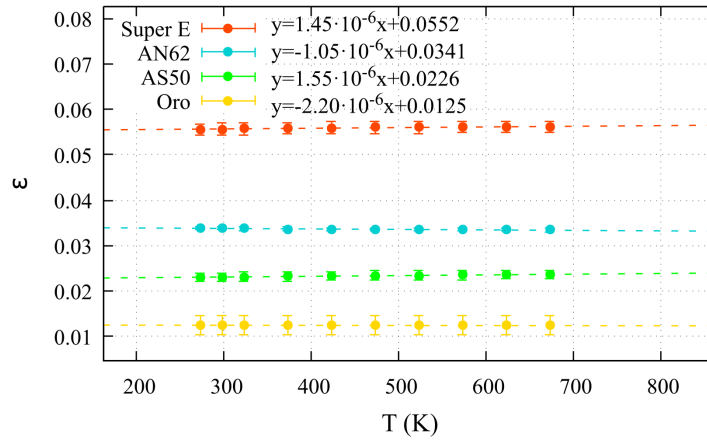


Figura 18: Emisividad de las muestras en el rango de 6-15 μm teniendo en cuenta la responsividad de la cámara.

Muestra	ϵ
SuperE	0.0558 ± 0.0013
AN62	0.0336 ± 0.0004
AS50	0.0232 ± 0.0009
Oro	0.012 ± 0.002

Tabla 4: Valores de emisividad obtenidos a partir de las medidas con el espectrómetro ponderando por la responsividad de la cámara.

Con el fin de determinar el método de medida con la cámara más óptimo se realizaron cinco mediciones. Las tres primeras, a las que vamos a denotar Medición 1, Medición 2 y Medición 3, fueron tomadas para los siguientes rangos de temperatura real de las muestras, T'_{obj} : 100 °C a 320 °C, en intervalos de 20 °C; 40 °C a 100 °C, en intervalos de 10 °C; y 60 °C a 150 °C, en intervalos de 10 °C.

En la Medición 2 fue necesario desechar las medidas para 40 °C y 50 °C, ya que se obtenían emisividades negativas sin sentido físico, lo que nos indica que para medir la emisividad con la cámara es necesario que exista una diferencia mínima entre la temperatura ambiente y la de las muestras.

Durante estas tomas de medidas no se permitió que se estabilizase la temperatura de la placa calefactora ni de las muestras, sino que se fijó una temperatura alta para la placa calefactora y conforme aumentaba la temperatura se tomaron las medidas. En cada medición el valor de la emisividad para cada muestra vendrá dado por el promedio de las emisividades obtenidas para las temperaturas de medida.

En cuanto a las demás mediciones, Medición 4 y Medición 5, se realizó una única medida para cada medición, y se permitió que se alcanzase un valor estable de la temperatura. Para el caso de la Medición 4 se midió a 172 °C tras dejar estabilizar media hora, y para la Medición 5 se midió a 110 °C tras estabilizar durante aproximadamente tres horas.

Para estas dos mediciones, a cada valor de emisividad se le ha asociado un error aleatorio de 0.004, ya que corresponde a la variación de la emisividad si modificamos la temperatura aparente de las muestras, T_{obj} , en 0.1 °C, que es lo que variaban las medidas de temperatura aparente estando a temperatura estable.

5.2. Análisis de resultados y establecimiento del modelo

En la Tabla 5 se encuentran las emisividades obtenidas para las cinco mediciones, que han sido calculadas aplicando la Ec. (21).

Muestra	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
SuperE	0.083 ± 0.004	0.079 ± 0.002	0.074 ± 0.006	0.078 ± 0.004	0.063 ± 0.004
AN62	0.056 ± 0.004	0.053 ± 0.004	0.049 ± 0.004	0.058 ± 0.004	0.040 ± 0.004
AS50	0.047 ± 0.003	0.035 ± 0.005	0.041 ± 0.006	0.040 ± 0.004	0.030 ± 0.004
Oro	0.019 ± 0.003	0.012 ± 0.003	0.016 ± 0.003	0.008 ± 0.004	0.003 ± 0.004

Tabla 5: Emisividad de las muestras medida con la cámara termográfica.

En primer lugar, observamos como, en general, los valores obtenidos con la cámara termográfica son superiores a los medidos con el espectrómetro de la Tabla 4, siendo los valores que mejor se ajustan los de la Medición 5.

Estas diferencias pueden deberse a que, al medir con la cámara, hayamos despreciado alguna contribución de radiación, como puede ser una contribución interna de la cámara, que puede haberse calentado al realizar las medidas, siendo esta contribución mayor en el caso de la Medición 1, ya que se alcanzaron temperaturas más elevadas.

También hay que tener en cuenta errores sistemáticos que no podemos cuantificar, como puede ser que en las tres primeras mediciones, al no permitir que se estabilizase el sistema, la temperatura de las muestras aumentaba muy rápido, por lo que es posible que cuando se tomaron las medidas de temperatura aparente, T_{obj} , a una temperatura real de las muestras, T'_{obj} , esta temperatura no fuese correcta, sobre todo en la primera medición, donde al alcanzar temperaturas más elevadas comenzó a desprenderse el kapton del vidrio. Además, hay que tener en cuenta que es posible que la placa calefactora no calentase en todas las zonas por igual, por lo que la temperatura real de las muestras podía diferir entre ellas.

Notar también que temperatura ambiente, T'_{ref} , fue registrada al comienzo de cada medición y se tomó la misma para todas las medidas, pudiendo existir variaciones que no se tuvieron en cuenta. Además, es necesario considerar que es posible que la emisividad de los recubrimientos bajo emisivos haya variado desde que se tomaron las medidas con el espectrómetro, ya que las muestras han sido sometidas a altas temperaturas.

A continuación, representamos en la Figura 19 las medidas obtenidas con la cámara (Tabla 5) frente a las obtenidas con el espectrómetro (Tabla 4).

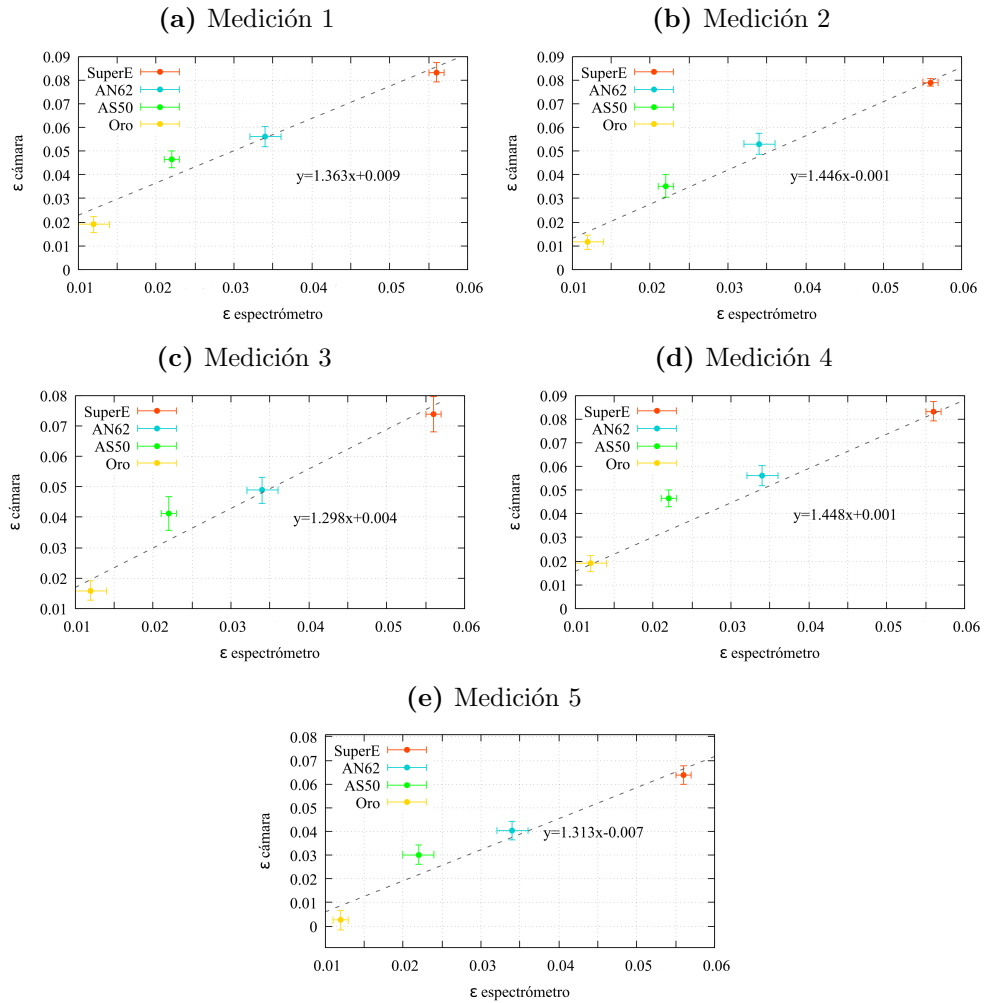


Figura 19: Representación de la emisividad obtenida con la cámara en función de la obtenida con el espectrómetro.

Como podemos observar en la Figura 19, para todas las mediciones existe una dependencia que vamos a tomar lineal entre las medidas tomadas con la cámara y las del espectrómetro; en la que vamos considerar la pendiente y el término independiente como las contribuciones de la radiación no consideradas previamente.

Teniendo esto en cuenta, se plantea un modelo de determinación de emisividad que requiera una calibración previa dada por el ajuste de las muestras de emisividad conocida. Para ello, se realizan medidas de temperatura aparente tanto de las muestras de emisividad conocida (calibración), que en nuestro caso son SuperE, AN62, AS50 y oro; y de las muestras cuya emisividad queremos determinar, que vamos a denotar como AS40, Bronce y DAG66. A continuación se realiza un ajuste lineal con las muestras de calibración, de donde se obtiene una pendiente, m , y término independiente, n , que nos permite ajustar la emisividad medida con la cámara, ε_c , según la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_c - n}{m} \quad (22)$$

Donde ε_a es el valor ajustado de la emisividad de las muestras medida con la cámara.

En cuanto a la toma de medidas, a pesar de que todas las mediciones presentan un ajuste lineal similar, se van a tomar las medidas de la Medición 4 y Medición 5, ya que al permitir estabilizar la temperatura disminuyen los errores sistemáticos asociados a la toma de la temperatura real de las muestras, T'_{obj} .

5.3. Validación del modelo

En primer lugar, representamos en la Tabla 6 las temperaturas aparentes, T_{obj} , de las muestras denominadas AS40, Bronce y DAG66, medidas con la cámara termográfica, para las dos mediciones: dejando estabilizar media hora y midiendo a 172 °C, (Medición 4); y dejando estabilizar tres horas y midiendo a 110 °C (Medición 5). Esto nos permite ordenar las muestras en función de su emisividad, siendo la muestra con mayor emisividad la Bronce al tener mayor temperatura aparente, y la de menor emisividad la DAG66.

Muestra	Medición 4	Medición 5
DAG66	39.2 °C	32.7 °C
AS40	40.6 °C	33.2 °C
Bronce	48.0 °C	37.2 °C

Tabla 6: Temperaturas aparentes de las muestras tomadas a 172 °C y 110 °C.

Tras aplicar la Ec. (21) se obtienen las emisividades de las muestras de la Tabla 7. A estos valores se les aplica la Ec. (22) según sus respectivas calibraciones dadas por la Figura 19d y 19e, obteniendo así los valores de la Tabla 8.

Muestra	Medición 4	Medición 5
DAG66	0.044 ± 0.004	0.040 ± 0.004
AS40	0.050 ± 0.004	0.043 ± 0.004
Bronce	0.083 ± 0.004	0.080 ± 0.004

Tabla 7: Emisividad de las muestras medida con la cámara termográfica.

Para poder validar el modelo, es necesario comparar los valores de la Tabla 8 con los de la Tabla 9, que son las emisividades obtenidas midiendo con el espectrómetro en el rango de la cámara y teniendo en cuenta la responsividad.

Muestra	Medición 4	Medición 5
DAG66	0.029 ± 0.008	0.035 ± 0.009
AS40	0.033 ± 0.009	0.038 ± 0.009
Bronce	0.056 ± 0.011	0.066 ± 0.012

Tabla 8: Emisividad de las muestras ajustada a partir de la calibración.

Muestra	ε
DAG66	0.0328 ± 0.0005
AS40	0.036 ± 0.004
Bronce	0.0694 ± 0.0014

Tabla 9: Emisividad de las muestras a partir de las medidas del espectrómetro.

Observamos como los resultados que hemos obtenido con realizando el ajuste a las medidas de la cámara se encuentran a menos de un σ de error de los medidos con el espectrómetro, a excepción de la emisividad del bronce obtenida en la primera medida. Sin embargo, existe una diferencia notable entre los valores obtenidos en ambas medidas. Para poder verificar cuál de las dos medidas permite un mejor ajuste al modelo establecido, vamos a representar los puntos obtenidos con la cámara termográfica (sin ajustar, Tabla 7) en función de los obtenidos con el espectrómetro (Tabla 9), junto a sus respectivas rectas de calibración, dadas por la Figura 19d y 19e.

Esta representación se encuentra en la Figura 20, en la que podemos observar como los puntos de la medida en la que se ha permitido estabilizar la temperatura durante 3h, se ajustan mejor que en la que se ha permitido estabilizar 30 minutos, lo que nos permite concluir que el mejor método para medir la emisividad es permitiendo una mayor estabilización de la temperatura.

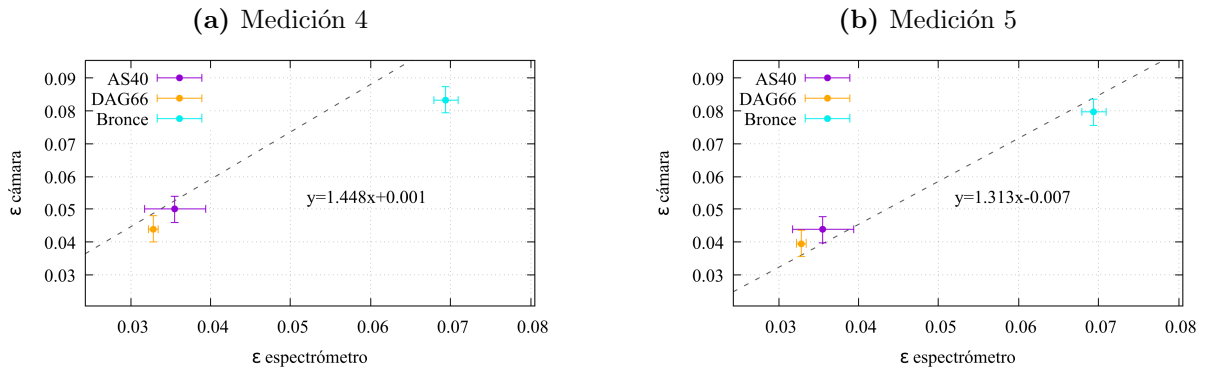


Figura 20: Comparación del ajuste al modelo teórico de las dos medidas.

6. Conclusiones

Con la realización de este trabajo se ha conseguido diseñar un procedimiento de medida y establecer un modelo que permita obtener la emisividad de muestras de recubrimientos bajo emisivos con una cámara termográfica, obteniendo resultados válidos.

Este procedimiento presenta varias ventajas frente al espectrómetro. El primero de ellos es que sin necesidad de hacer ningún tipo de cálculo, tan solo midiendo la temperatura aparente de las muestras, se pueden ordenar en función de su emisividad, tal y como se ha observado en la Figura 17. También es importante tener en cuenta que al contrario que el espectrómetro, la cámara termográfica permite realizar medidas de emisividad simultáneas. Además, el equipamiento necesario para este método (placa calefactora y cámara termográfica) es más barato que el espectrómetro.

En cuanto al método de medida cuantitativa de la emisividad, se ha llegado a la conclusión de que el método más óptimo es permitiendo que se alcance una temperatura estable, es decir, realizando medidas más largas.

Con respecto a los errores sistemáticos asociados al método, se deben principalmente a las contribuciones de radiación de la cámara u otras fuentes que no se han tenido en cuenta, y que probablemente afecten más al estar a distancias cortas. Este error sistemático queda subsanado al realizar el ajuste lineal de calibración.

En cuanto a posibles mejoras para trabajos futuros, se propone tratar de estimar para qué temperaturas fijas se obtienen los mejores resultados tras dejar estabilizar la temperatura de las muestras. Además, aunque se ha indicado que la contribución de la radiación no tomada en cuenta en la toma de medidas se subsana con el ajuste lineal, no se ha establecido un principio físico que explique su comportamiento, por lo que se propone tratar de encontrarlo. Respecto a posibles mejoras en la toma de medidas se plantea tratar de medir la temperatura del entorno de la cámara con un termopar a tiempo real, además de intentar trabajar en un entorno con superficies menos emisivas.

Por último, añadir que durante la realización de este trabajo ha sido necesario un estudio previo de la teoría asociada a la radiación de cuerpo negro, así como el aprendizaje del funcionamiento de la cámara termográfica, permitiendo adquirir habilidades útiles para el trabajo en el laboratorio.

Referencias

- [1] Palma, R. J. M., Duart, J. M. M., Riera, A. M. I. (1998). Recubrimientos espectralmente selectivos sobre vidrios arquitectónicos: recubrimientos de baja emisividad. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 37(1), 7-12.
- [2] B.P. Jelle, S.E. Kalnæs, T. Gao, Low-emissivity materials for building applications: A state-of-the-art review and future research perspectives, Energy and Buildings 96 (2015) 329–356.
- [3] M. Rabizadeh, M.H. Ehsani, M.M. Shahidi, ZnO/metal/ZnO (metal = Ag, Pt, Au) films for energy-saving in windows application, Sci Rep 12 (2022) 15575.
- [4] Herguedas, N., Carretero, E. (2023). Desarrollo de recubrimientos bajo emisivos con nuevas estructuras multicapa y ajuste teórico de las propiedades ópticas. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Zaragoza.
- [5] Martínez, R. (1999). La teoría de la radiación del cuerpo negro. Momento, (19), 59-75.
- [6] Carretero, E. (2022). Notas sobre recubrimientos ópticos en arquitectura. Asignatura de Aplicaciones de la Óptica en el entorno industrial, máster de Física y Tecnologías Físicas, Universidad de Zaragoza.
- [7] Domingo, A. (2020). La radiación del cuerpo negro. Universidad Autónoma de Barcelona.
- [8] Comité Europeo de Normalización. UNE-EN 12898: Vidrio para la edificación. Determinación de la emisividad.
- [9] TIR 100-2 Operators Manual. Disponible en [inglas.org](https://www.inglas.org)
- [10] User's manual, FLIR AX Series. Disponible en docs.rs

Anexo

Nº Ordinal	λ (μm)	Nº Ordinal	λ (μm)	Nº Ordinal	λ (μm)
1	5.5	11	11.8	21	19.2
2	6.7	12	12.4	22	20.3
3	7.4	13	12.9	23	21.7
4	8.1	14	13.5	24	23.2
5	8.6	15	14.2	25	25.2
6	9.2	16	14.8	26	27.3
7	9.7	17	15.6	27	30.9
8	10.2	18	16.3	28	35.7
9	10.7	19	17.2	29	43.9
10	11.3	20	18.2	30	50.0

Tabla A1: Tabla de longitudes de onda para las que se debe promediar la emisividad.

Emisividad total normal ε_n	Relación $\varepsilon/\varepsilon_n$
0.03	1.22
0.05	1.18
0.1	1.14
0.2	1.10
0.3	1.06
0.4	1.03
0.5	1.00
0.6	0.98
0.7	0.96
0.8	0.95
0.89	0.94

Tabla A2: Relación entre la emisividad total corregida ε y la emisividad normal ε_n .

Figure 47 - Normalized Response as a Function of Signal Wavelength for Lepton 1.5, 2.0 and 2.5

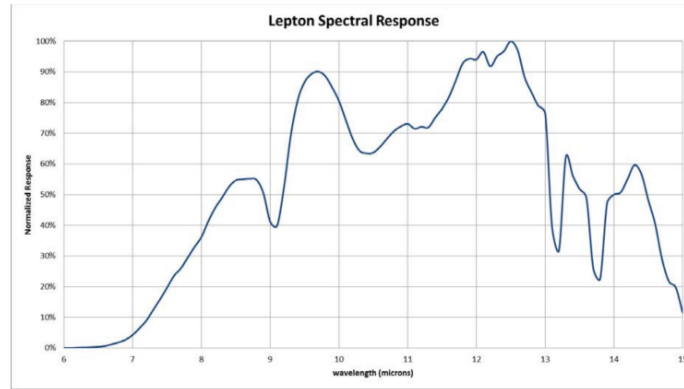


Figura A1: Capacidad de respuesta de la cámara proporcionada por el fabricante.