

Medición de Emisividad Infrarroja Espectral y Direccional de Alta Precisión en la Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

J. Gabirondo-López⁽¹⁾, M. Sainz-Menchón⁽¹⁾, I. González de Arrieta^(1,2), R. Fuente⁽³⁾, T. Echániz⁽³⁾, I. López-Ferreño⁽³⁾, I. Arredondo⁽⁴⁾, J. M. Igartua⁽¹⁾ y G. A. López⁽¹⁾

⁽¹⁾Departamento de Física, Universidad del País Vasco UPV/EHU

⁽²⁾CNRS, CEMHTI UPR 3079, Univ. Orléans, Orléans 45071, Francia

⁽³⁾Departamento de Matemática Aplicada, Universidad del País Vasco UPV/EHU

⁽⁴⁾Departamento de Electricidad y Electrónica, Universidad del País Vasco UPV/EHU

Tlf: (+34) 94 601 3242, e-mail: jon.gabirondol@ehu.eus

RESUMEN: Se presenta la última actualización del emisómetro HAIRL (High Accuracy Infrared Radiometer, Leioa) así como los métodos utilizados para la medición precisa de emisividad infrarroja en función de la temperatura. Se trata de un instrumento singular, diseñado y construido en la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), mediante el cual se pueden llevar a cabo medidas de emisividad espectral direccional en el rango de longitudes de onda de entre 1,43 y 25 μm , bajo diferentes condiciones atmosféricas, y en un amplio rango de temperaturas (300-1273 K). Durante los últimos años, se han estudiado metales puros, aleaciones avanzadas y cerámicos, así como materiales multicapa y nanoestructurados con interés para el sector energético. En la actualidad, se va a actualizar el instrumento: se renovará la instrumentación que lo compone, se actualizará el método de medida y se rediseñará el sistema de control. Todo ello con el objetivo de mejorar la reproducibilidad de las medidas, de realizar una búsqueda de materiales de referencia en colaboración con otros centros, y de ampliar el abanico de materiales que pueden medirse.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto general

La emisividad es la propiedad termofísica que determina la capacidad que tiene una superficie para emitir radiación electromagnética. Se define como la ratio entre la radiación emitida por la superficie estudiada y la radiación emitida por un emisor perfecto, un cuerpo negro. Al tratarse de una propiedad superficial, factores como la rugosidad o la presencia de capas de óxido o de impurezas afectan considerablemente a la capacidad emisora de una muestra. Además, es una propiedad direccional y espectral, pues depende del ángulo desde el que se observa la superficie y de la longitud de onda medida. Conviene mencionar que la radiación térmica no es un fenómeno únicamente superficial y que, en general, se utiliza el término emitancia para hablar de la capacidad emisora de una muestra en su totalidad.

La emisividad infrarroja tiene especial importancia en las transferencias de calor a alta temperatura o en entornos de alto vacío. Bajo esas circunstancias, la radiación infrarroja es el componente principal de las transferencias de calor y está completamente condicionada por la emisividad de las superficies involucradas: cuanta más radiación emitan en el rango infrarrojo, mayor será el flujo de calor transmitido entre las superficies. Esas transferencias de calor dependen, a su vez, del cambio de la emisividad con la temperatura, que puede ser considerable.

Aunque la caracterización de la emisividad infrarroja se impulsó inicialmente con fines militares y aeroespaciales, hoy en día tiene un claro interés científico e industrial. Aparte de ser determinante en las transferencias de calor mencionadas, la emisividad es crítica en el ámbito de la

industria energética, puesto que juega un papel crucial a la hora de diseñar y desarrollar elementos como colectores solares o recubrimientos para placas fotovoltaicas. Las medidas de temperatura mediante técnicas pirométricas también requieren de la emisividad de la superficie como parámetro de calibración, puesto que es necesaria para convertir lecturas de radiancia emitida en valores de temperatura. Sistemas industriales como hornos de alta temperatura, tubos conductores de fluidos o sistemas de fabricación aditiva utilizan este tipo de termómetros para controlar y monitorizar la temperatura de los procesos.

1.2 Desarrollo del emisómetro HAIRL

Dado el interés científico e industrial de las medidas de emisividad, en el año 2002 se comenzó a trabajar en el diseño y la construcción del emisómetro HAIRL (*High Accuracy Infrared Radiometer, Leioa*) en la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU). Ese proyecto se llevó a cabo como parte de la tesis doctoral de la Dra. Leire del Campo entre los años 2002 y 2007 y fue impulsado por la empresa ITP [1]. Ese proyecto fue seguido de la tesis doctoral del Dr. Luis González-Fernández, que realizó varios estudios sobre la calibración del instrumento y sobre el cálculo de incertidumbres [2]. En esa primera etapa del emisómetro, entre los años 2002 y 2012, se realizaron medidas de aleaciones de interés industrial, como el hierro ARMCO, y las superaleaciones en base Ni o Co como Inconel, Haynes y René. También se estudiaron materiales para el sector de la máquina-herramienta y se estudió el cambio de la emisividad durante procesos de oxidación.

El impacto científico del HAIRL fue considerable, puesto que el artículo principal en el que se describió por primera vez el emisómetro ha servido de referencia a nivel mundial a la hora de construir emisómetros similares y, de hecho, es el artículo más citado dentro de los que describen este tipo de instrumentos. Además, parte de los emisómetros basados en el diseño del HAIRL siguen utilizando la metodología propuesta en los estudios mencionados o alguna modificación de la misma.

Entre los años 2012 y 2020, durante las tesis doctorales de los Dres. Telmo Echániz e Iñigo González de Arrieta, se midieron materiales con aplicación en la industria energética: se estudiaron aleaciones para el almacenamiento de energía y con aplicación en el campo de la energía nuclear, y se midieron recubrimientos para sistemas de energía termosolar de concentración (CSP) [3]. También se revisó y actualizó el método de medida y de cálculo de errores, y se adaptó la metodología utilizada para medir materiales cerámicos además de metales [4].

2. INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA

2.1 Hardware

El emisómetro HAIRL se compone de cuatro elementos principales dispuestos en forma de T, tal y como se muestra en la Fig. 1: un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR), una cámara en la que se introduce la muestra, un cuerpo negro de referencia y un sistema óptico que permite seleccionar la fuente de radiación.

El espectrómetro es un IFS 66v/S de la marca Bruker, que se encarga de medir la señal infrarroja que incide en el detector. Está dotado de un sistema óptico de KBr, un divisor de haz de Ge/KBr

y un detector de DLaTGS, que permite medir en el rango de $\sigma = 400\text{-}7000\text{ cm}^{-1}$ ($\lambda = 1,43 - 25\ \mu\text{m}$) con una resolución de $\Delta\sigma = 8\text{ cm}^{-1}$.

Para calibrar la respuesta del detector se utiliza un cuerpo negro de alta temperatura Isotech Pegasus 970 R con una emisividad certificada mayor que 0,995 y un cuerpo gris formado por una placa metálica pintada con Nextel 811-21. Dicha pintura tiene una emisividad nominal de 0.97 respaldada por medidas experimentales realizadas en [5].

A la hora de medir, las muestras se sitúan en un portamuestras dotado de un calefactor eléctrico que permite llegar a temperaturas superficiales de hasta 1273 K. El portamuestras va dentro de una cámara pintada de Nextel 811-21. En la cámara se pueden realizar medidas en diferentes

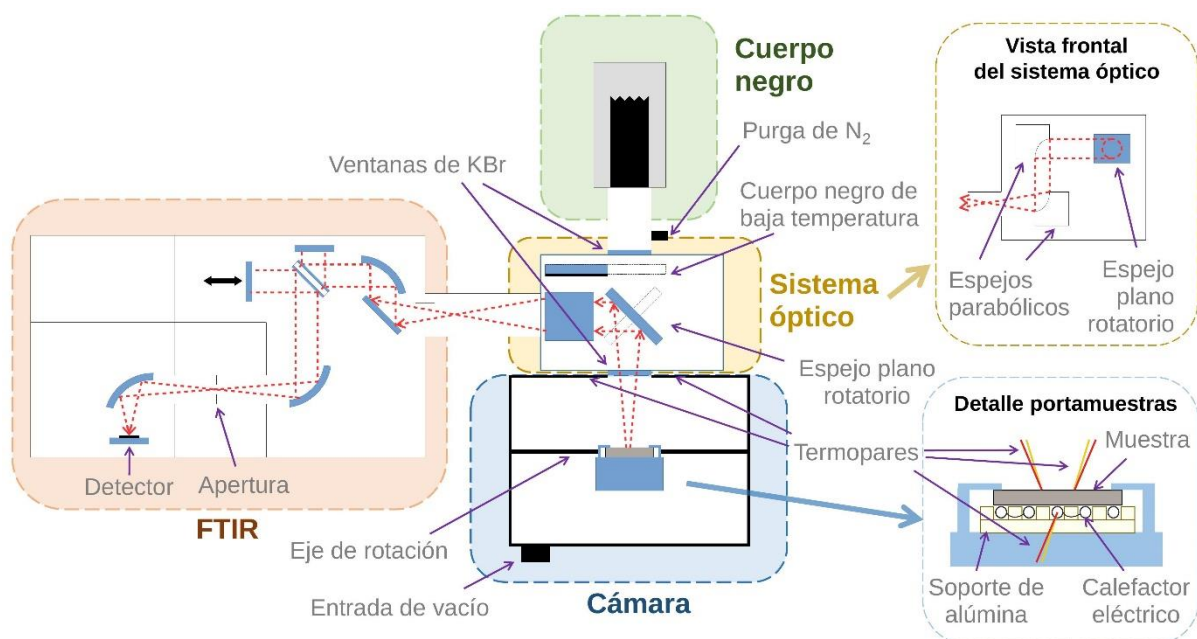


Fig. 1: Vista superior del HAIRL mostrando sus componentes y el sistema óptico.

condiciones atmosféricas, incluyendo aire, atmósfera reductora (N_2+H_2), atmósfera inerte (Ar), y vacío de hasta $2 \cdot 10^{-4}$ mbar. Además, está refrigerada por agua para controlar el entorno térmico de la muestra. Todo el portamuestras está acoplado a un eje paralelo a la superficie de la muestra que permite realizar medidas direccionales.

Para calcular la emisividad de la muestra es necesario medir la temperatura de la superficie, de la cámara y de los cuerpos negros. Mientras que el cuerpo negro de alta temperatura se mide utilizando un termopar tipo R calibrado por el *National Physical Laboratory* (NPL), el resto de temperaturas se registran con termopares tipo K. En el detalle de la Fig. 1 puede verse cómo se acoplan las muestras al calefactor y la disposición de los termopares de la superficie y del termopar de control del calefactor.

2.2 Método de medida y fuentes de error

Como ya se ha mencionado en la Sección 1.1, la emisividad se define como la ratio entre la radiancia de una superficie respecto a la de un cuerpo negro a la misma temperatura. Por lo

tanto, la radiancia de una muestra puede escribirse como la radiancia de un cuerpo negro multiplicada por la emisividad de la muestra, tal y como indica la Ecuación (1)

$$L_S(T_S, \theta, \lambda) = \varepsilon_S(T_S, \theta, \lambda) \cdot L_{BB}(T_S, \lambda) \quad (1)$$

donde $\varepsilon_S(T_S, \theta, \lambda)$ es la emisividad espectral y direccional de la muestra y $L_S(T_S, \theta, \lambda)$ y $L_{BB}(T_S, \lambda)$ son las radiancias de la superficie y de un cuerpo negro a una temperatura T_S .

El método de medida actual utilizado en el HAIRL es una modificación del denominado *blacksur* [1], para el cual se requiere que la muestra esté dentro de una cámara de alta emisividad. En dicha configuración y en el caso de una muestra opaca, la radiancia espectral que sale de la cámara y entra en el espectrómetro tiene dos componentes principales: la radiación emitida por la muestra y la radiación emitida por la cámara y reflejada en la muestra. Aplicando la Ley de Kirchhoff para materiales opacos donde la reflectividad de la superficie de la muestra es igual a 1 menos su emisividad, se obtiene la expresión de la radiancia que incide en el detector:

$$L(\lambda) = \varepsilon_S(T_S, \theta, \lambda) L_{BB}(T_S, \lambda) + (1 - \varepsilon_S(T_S, \theta, \lambda)) \varepsilon_{sur} L_{BB}(T_{sur}, \lambda) \quad (2)$$

donde ε_S es la emisividad de la muestra que se quiere medir, ε_{sur} la emisividad de la cámara y T_S y T_{sur} son las temperaturas de la superficie de la muestra y de la cámara, respectivamente.

La señal espectral medida por el detector es lineal respecto a la radiancia $L(\lambda, T)$ que incide sobre él según la Ecuación (3),

$$S(\lambda) = R(\lambda)L(\lambda, T) + S_0(\lambda) \quad (3)$$

donde $R(\lambda)$ es la respuesta del detector y $S_0(\lambda)$ es la señal de fondo del propio espectrómetro.

Para caracterizar la respuesta del detector y obtener las funciones $R(\lambda)$ y $S_0(\lambda)$ se realiza una medida del cuerpo negro de alta temperatura, S_{BB1} , y otra del cuerpo gris a temperatura ambiente, S_{BB2} , siendo la diferencia de temperatura entre ellos de aproximadamente $\Delta T = 800$ K. Aunque esos parámetros son útiles para entender la respuesta del espectrómetro, están correlacionados entre sí, por lo que conviene utilizar directamente las medidas de radiancia en la ecuación de medida. Para ello se calcula el factor Q , que depende únicamente de las señales medidas:

$$Q = \frac{S_S - S_{BB1}}{S_{BB1} - S_{BB2}} \quad (4)$$

Finalmente, la emisividad de la superficie de la muestra puede calcularse de la siguiente manera:

$$\varepsilon_S(T_S, \theta, \lambda) = \frac{Q \cdot (\varepsilon_{BB1} L_{BB}(T_{BB1}, \lambda) - \varepsilon_{BB2} L_{BB}(T_{BB2}, \lambda)) + \varepsilon_{BB1} L_{BB}(T_{BB1}, \lambda) - L_{BB}(T_{sur}, \lambda)}{L_{BB}(T_S, \lambda) - L_{BB}(T_{sur}, \lambda)} \quad (5)$$

En la referencia [4] se recoge el cálculo de sensibilidades de la emisividad respecto a las temperaturas medidas (T_S , T_{sur} , T_{BB1} , T_{BB2}), el valor del factor Q y las emisividades de las referencias de calibración ε_{BB1} y ε_{BB2} . En dicho artículo se clasifican también las fuentes de incertidumbre, que pueden ser de Tipo A, si la componente se evalúa mediante métodos estadísticos (como la repetibilidad de las medidas de temperatura o del factor Q), o de Tipo B, si se evalúan mediante otros métodos, como pueden ser las fichas de calibración del cuerpo negro, por ejemplo.

La temperatura de la superficie de la muestra se determina de forma diferente dependiendo del tipo de muestra. En el caso de muestras metálicas, se sueldan dos termopares tipo K simétricamente alrededor del área de medida. Para materiales cerámicos, se realiza una medida de temperatura sin contacto. A diferencia de los materiales metálicos, los materiales cerámicos suelen presentar una longitud de onda en la que su emisividad es 1 conocida como punto de Christiansen. Para conocer la temperatura de la superficie, primero se obtiene la longitud de onda del punto de Christiansen haciendo una medida a temperatura ambiente de reflectividad con una

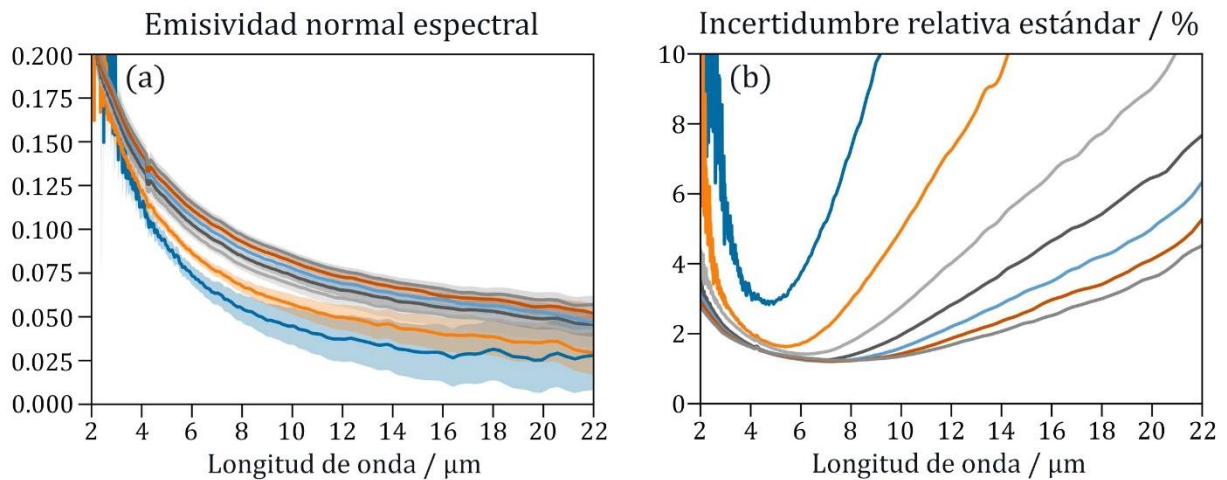


Fig. 2: (a) Medidas normales espectrales de Ni para temperaturas entre 473-1073 K y (b) las incertidumbres relativas estándar de cada una de ellas.

esfera integrante. Posteriormente, tras realizar la medida emisividad, se ajusta la temperatura de la superficie para que la emisividad en ese punto sea 1 [6].

Como ejemplo de las curvas de emisividad obtenidas siguiendo la metodología descrita, la Figura 2 muestra la emisividad normal espectral de Ni a diferentes temperaturas (izquierda), junto al

error relativo de cada medida (derecha). Como puede observarse, el error relativo disminuye según aumenta la temperatura y la longitud de onda en la que el error relativo es mínimo varía también con la temperatura de medida.

Cabe mencionar que las propiedades que pueden tener una aplicación industrial más directa, como puede ser la emisividad normal total o la emisividad hemisférica total se calculan integrando las emisividades espectrales direccionales. En esos casos, el cálculo de esas propiedades es demasiado complejo como para obtener el valor de la incertidumbre con los métodos habituales, por lo que se aplica un método de Monte Carlo para realizar el cálculo de incertidumbres [4].

2.3 Limitaciones del equipo

Como ya se ha mencionado en la Sección 1.2, el emisómetro ha sufrido múltiples modificaciones y actualizaciones desde su puesta en marcha. Aun así, la configuración actual del equipo tiene limitaciones instrumentales y metodológicas que van a ser solventadas mediante una nueva actualización.

En lo que a los instrumentos respecta, el espectrómetro IFS 66v/S se encuentra descatalogado y fuera del servicio técnico. Además, dicho instrumento utiliza una tarjeta de adquisición de Bruker y una interfaz completamente obsoleta para comunicarse con el ordenador de control. Esto hace que se requiera de un PC antiguo para controlar el emisómetro, limita la capacidad de controlar y monitorizar el experimento, y dificulta enormemente las tareas de mantenimiento y actualización del emisómetro. Por otro lado, los sistemas de vacío, de refrigeración y de rotación de la muestra también requieren de una revisión con el objetivo de digitalizar y controlar automáticamente factores que hasta ahora se ajustaban de forma manual.

En cuanto a la metodología utilizada, *a priori* puede aplicarse únicamente a materiales opacos en el rango infrarrojo, aunque ya se presentaron unas medidas preliminares de un monocristal semitransparente [4]. En ese caso, se conocía bien la transmitancia de la muestra en temperatura y su espesor era lo suficientemente pequeño como para evitar gradientes de temperatura, por lo que esas medidas no son generalizables a otros materiales.

3. PERSPECTIVAS

Con el objetivo de mantener y aumentar el buen rendimiento científico del instrumento (un total de cuatro tesis doctorales defendidas y veintiocho artículos en revistas indexadas en JCR), y de poder seguir dando servicio al sector industrial tanto local como internacional, a partir de septiembre del 2021 se plantea una nueva etapa de mejora del emisómetro.

3.1 Mejoras instrumentales

La actualización instrumental del HAIRL se centra en tres etapas principales: el cambio del espectrómetro, la actualización de los sensores de temperatura y de vacío, y la mejora de los actuadores que controlan el estado de la muestra y de la cámara.

A nivel instrumental, uno de los hitos más relevantes de esta actualización es el reemplazo del espectrómetro IFS 66v/S por el Vertex 80v de Bruker. Esta actualización solventará el problema de obsolescencia del espectrómetro y permitirá reemplazar el ordenador de control por uno actual. Ese nuevo espectrómetro, además de contar con el detector y el divisor de haz mencionados anteriormente, va a estar dotado de un nuevo detector de InGaAs y un divisor de haz de CaF₂ que permitirán medir hasta longitudes de onda de 0.83 μm .

En lo que a sensores respecta, se va a reformar el sistema de adquisición de temperaturas y de presión. Por un lado, aunque los termopares tipo K utilizados hasta ahora permiten medir en un amplio rango de temperaturas, son propensos a presentar errores sistemáticos. En consecuencia, se planea reemplazar los termopares tipo K por termopares tipo N para medir altas temperaturas y termopares tipo T para medir temperaturas cercanas a temperatura ambiente. Los termopares tipo N tienen el mismo rango de medida y sensibilidad que los de tipo K, pero tienden a mantener mucho mejor sus propiedades. Estos termopares se utilizarán para medir la temperatura de la muestra. Los termopares tipo T, en cambio, pueden medir en un rango mucho más reducido, pero con una mayor sensibilidad y un menor error. Esos termopares medirán la temperatura interna de la cámara. Por el otro, se han reemplazado los sensores de vacío analógicos por unos digitales de la marca Edwards, que se registran desde el ordenador de control.

La actualización de los actuadores se centra en la reforma del sistema de refrigeración de la cámara y en la renovación del calentador de muestras. Por un lado, se instalará un refrigerador de circulación (*chiller*, en inglés) LAUDA Microcool MC 600, que permitirá regular la temperatura de la cámara. Por el otro, se va a realizar un estudio exhaustivo del calefactor con el objetivo de controlar la temperatura de la superficie de la muestra en vez de la temperatura del calefactor en sí. Para ello, se implementará y sintonizará un controlador por rechazo activo de perturbaciones (*ADRC*, de sus siglas en inglés *Active Disturbance Rejection Control*) que es capaz de controlar correctamente la temperatura de la superficie de la muestra en un amplio rango de temperatura. Finalmente, la rotación del portamuestras se controlará mediante un motor paso a paso.

El nuevo sistema de sensores de temperatura y de refrigeración de la cámara afecta directamente a la precisión de las medidas, reduciendo su error y minimizando los errores sistemáticos.

3.2 Mejoras de software

Esa actualización tan significativa a nivel de hardware debe ir acompañada de un cambio de paradigma desde el punto de vista del control y de la monitorización del emisómetro. El objetivo principal de este cambio es lograr un instrumento modular en el que cada elemento pueda ser actualizado de forma independiente y que permita realizar experimentos de forma autónoma. Para ello, en este caso se va a optar por conectar los componentes del emisómetro mediante Ethernet. Algunos elementos, como el espectrómetro, disponen directamente de este tipo de conexión. Para conectar el resto de medidores o actuadores se han instalado adaptadores de puerto serie a Ethernet. De esa manera, el ordenador de control no debe tener ninguna tarjeta especial instalada y puede reemplazarse fácilmente. El programa de control se va a reconstruir utilizando Python y se integrará con una base de datos de series temporales basada en InfluxDB y con una interfaz de monitorización basada en Grafana. Tanto el nuevo programa de control, como InfluxDB y Grafana pueden consultarse mediante cualquier navegador web, permitiendo a quien opere el instrumento monitorizar y controlar el experimento de forma remota.

Finalmente, el nuevo programa de control permitirá definir declarativamente las condiciones del experimento. De esta forma el personal puede definir las condiciones en las que desea realizar su experimento, y dejar que el programa de control se encargue de llevarlo a cabo. Así se evitan errores humanos y se registra adecuadamente el desarrollo del experimento.

3.3 Mejoras metodológicas y científicas

Las mejoras instrumentales y técnicas planteadas hasta ahora van a permitir mejorar la metodología actual y abrir nuevas líneas de investigación dentro del laboratorio.

La actualización de los componentes del HAIRL requiere de un nuevo estudio de calibración del instrumento. El objetivo principal de ese estudio será conocer la respuesta del espectrómetro para los dos detectores, y revisar y modificar el método actual de medida de materiales opacos. También se actualizará el método de cálculo de errores para incluir las nuevas características del emisómetro.

Por otro lado, se va a mejorar el método de medida de materiales semitransparentes. El método más utilizado para dispositivos similares al nuestro es el método de los dos substratos [7], que requiere de cuatro medidas experimentales realizadas en las mismas condiciones para determinar la emisividad, transmitancia y reflectividad de una muestra semitransparente. El nuevo sistema de control nos permitirá replicar este método e investigar posibles modificaciones del mismo que reduzcan la cantidad de medidas necesarias o faciliten realizarlas de forma sistemática. Esa nueva metodología se validará mediante comparaciones con medidas realizadas en el *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB) y el *Conditions Extrêmes et Matériaux: Haute Température et Irradiation* (CEMHTI).

Aprovechando las mejoras instrumentales y el nuevo sistema de control, parte del trabajo de los próximos meses va a consistir en mejorar la reproducibilidad de nuestras condiciones de medidas. Eso facilitará las colaboraciones con otros centros como los mencionados anteriormente, y

permitirá abordar uno de los grandes problemas de las medidas de emisividad: no hay estándares establecidos que permitan evaluar este tipo de instrumentos. Por lo tanto, se tratará de establecer patrones de emisividad corroborados por diferentes laboratorios.

El trabajo realizado en la búsqueda de patrones de emisividad se va a complementar con el despliegue de una base de datos de medidas de emisividad. Ese servicio web abierto al público recogerá los datos experimentales de diversos laboratorios, que deberán especificar las condiciones de medida y las características de la propia muestra. La base de datos será de gran interés tanto científico como industrial, puesto que facilitará el acceso a los datos de las medidas de emisividad. De esa manera, se impulsará que los diferentes grupos de investigación comparen sus medidas con las realizadas en otros laboratorios y permitirá que organizaciones y empresas tengan acceso a las propiedades termo-ópticas de materiales de interés industrial.

En lo que a nuevos estudios de materiales respecta, aparte de comenzar a medir materiales semitransparentes de forma sistemática, también se estudiarán transiciones de fase en materiales con interés tecnológico e industrial, como pueden ser las Aleaciones de Alta Entropía (HEA).

4. CONCLUSIONES

El emisómetro HAIRL va a ser actualizado para mantener su buen rendimiento científico y para aumentar sus capacidades: se va a reemplazar el espectrómetro, el sistema de adquisición de temperaturas y el calentador de muestras, entre otros. Esas mejoras instrumentales irán acompañadas de un nuevo sistema de control que permitirá definir experimentos de forma declarativa y monitorizar y controlar el emisómetro remotamente. A nivel científico, esa actualización permitirá mejorar la repetibilidad y reproducibilidad de nuestras medidas, y también medir de forma sistemática materiales semitransparentes, algo novedoso en nuestro laboratorio. La mejora en la reproducibilidad va a ir acompañada, por un lado, por una mayor colaboración con otros grupos de investigación, y por el otro, por el despliegue de una base de datos de medidas de emisividad. A largo plazo, el laboratorio trabajará constantemente en lograr la trazabilidad de sus medidas al Sistema Internacional de Unidades.

5. REFERENCIAS

- [1] del Campo, L., Pérez-Sáez, R. B., Esquisabel, X., Fernández, I., & Tello, M. J. (2006). New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment. *Review of scientific instruments*, 77(11), 113111.
- [2] González-Fernández, L., Pérez-Sáez, R. B., del Campo, L., & Tello, M. J. (2010). Analysis of calibration methods for direct emissivity measurements. *Applied Optics*, 49(14), 2728-2735.
- [3] Echániz, T. Infrared spectral emissivity studies on metals and materials for solar thermal applications. *University of the Basque Country*, 2016.
- [4] González de Arrieta, I. G., Echániz, T., Campillo-Robles, J. M., Igartua, J. M., & López, G. A. (2020). Updated measurement method and uncertainty budget for direct emissivity measurements at UPV/EHU. *Metrologia*, 57(4), 045002.

- [5] Adibekyan, A., Kononogova, E., Monte, C., & Hollandt, J. (2017). High-accuracy emissivity data on the coatings Nextel 811-21, Herberts 1534, Aeroglaze Z306 and Acktar Fractal Black. *International Journal of Thermophysics*, 38(6), 1-14.
- [6] Rousseau, B., Brun, J. F., De Sousa Meneses, D., & Echegut, P. (2005). Temperature measurement: Christiansen wavelength and blackbody reference. *International Journal of Thermophysics*, 26(4), 1277-1286.
- [7] Jeon, S., Park, S. N., Yoo, Y. S., Hwang, J., Park, C. W., & Lee, G. W. (2010). Simultaneous measurement of emittance, transmittance, and reflectance of semitransparent materials at elevated temperature. *Optics letters*, 35(23), 4015-4017.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la UPV/EHU (GIU19/019) y por el Gobierno Vasco (PIBA-2021-1-0022). Los autores J. Gabirondo-López e I. González de Arrieta desean agradecer el apoyo económico realizado por dichas instituciones mediante la beca predoctoral (UPV/EHU, PIF 21/06) y la beca postdoctoral (Gobierno Vasco, POS-2021-2-2022).