

## Gonio-espectrofotómetro para medir la función de distribución bidireccional de dispersión (BSDF)

### Gonio-spectrophotometer for bidirectional scattering distribution function (BSDF) measurements

A. M. Rabal<sup>(1,\*S)</sup>, A. Ferrero<sup>(1,S)</sup>, J. L. Fontecha<sup>(2,S)</sup>, A. Pons<sup>(1,S)</sup>, J. Campos<sup>(1,S)</sup>, A. Corróns<sup>(1,S)</sup>

1. Instituto de Óptica (CSIC), C/ Serrano, 144, 28006, Madrid, Spain.

2. Instituto de Física Aplicada (CSIC), C/ Serrano, 144, 28006, Madrid, Spain.

(\*) Email: rabal@io.cfmac.csic.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 21/12/2010. Revisado / Revised: 18/02/2011. Aceptado / Accepted: 21/02/2011

#### RESUMEN:

Se describe un gonio-espectrofotómetro desarrollado y construido en el CSIC para la medida, con baja incertidumbre, de la función de distribución bidireccional de dispersión (*BSDF*). Se presenta la ecuación de medida y de cálculo de la incertidumbre asociada a los valores de la función de distribución *BSDF* y los primeros resultados obtenidos al medir la *BSDF* de patrones colorimétricos cerámicos.

**Palabras clave:** *BSDF*, gonio-espectrofotómetro, patrón colorimétrico.

#### ABSTRACT:

A gonio-spectrophotometer developed and built at CSIC for bidirectional scattering distribution function (*BSDF*) low-uncertainty measurements is described. The measurement equation and the uncertainty analysis are explained, and first results on the *BSDF* of ceramic colour standards are shown.

**Key words:** *BSDF*, gonio-spectrophotometer, ceramic reflection standards.

#### REFERENCES AND LINKS

- [1] J. C. Stover, *Optical Scattering: Measurement and Analysis*, SPIE, Bellingham, WA (1995).
- [2] F. B. Leloup, S. Forment, P. Dutré, M. R. Pointer, P. Hanselaer, "Design of an instrument for measuring the spectral bidirectional scatter distribution function", *Appl. Opt.* **40**, 5454-5467 (2008).
- [3] D. Hünerhoff, U. Grusemann, A. Höpe, "New robot-based gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflection", *Metrologia* **43**, S11-S16 (2006).
- [4] G. Obein, R. Bousquet, M. E. Nadal, "New NIST reference goniospectrometer", *Proc. SPIE* **5880**, 241-250 (2005).
- [5] M. R. Pointer, N. J. Barnes, P. J. Clarke, M. J. Shaw, "A new goniospectrophotometer for measuring gonio-apparent materials", *Color Technol.* **121**, 96-103 (2005).
- [6] T. A. Germer, C. C. Asmail, "Goniometric optical scatter instrument for out-of-plane ellipsometry measurements", *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 3688-3695 (1999).
- [7] E. Chorro, E. Perales, F. M. Martínez-Verdú, J. Campos, A. Pons, "Colorimetric and spectral evaluation of the optical anisotropy of metallic and pearlescent samples", *J. Mod. Opt.* **56**, 1457-1465 (2009).
- [8] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, "Geometrical considerations and nomenclature for reflectance", *Natl. Bur Stand. Monogr.* **160**, 1-52 (1977).
- [9] A. M. Rabal, J. L. Fontecha, A. Pons, J. Campos, R. Zafra. "Diseño y construcción de un novedoso espectro-gonio-fotómetro", *IX Reunión Nacional de Óptica*, Ourense, Spain (2009).

- [10] JCGM 100:2008, *Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, BIPM (2008).
- [11] American Society for Testing and Materials Standard E2387-05, "Standard Practice for Goniometric Optical Scatter Measurements", ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI 10.1520/E2387-05. Available at [www.astm.org](http://www.astm.org).

## 1. Introducción

En el mundo moderno la armonización de la apariencia de objetos de naturaleza diferente que aparecen juntos en la misma escena es cada vez más importante, lo mismo que lo es la reproducción fidedigna de los mismos en distintos medios. Muestra de ello son las diversas iniciativas que están surgiendo alrededor de estudios de apariencia (congresos, redes temáticas, publicaciones científicas, etc.). La apariencia de un objeto viene determinada por sus atributos perceptibles: color, brillo, textura y translucidez, pero no está claro cómo interrelacionan entre ellos para producir una percepción determinada de apariencia. Para poder llegar a establecer esta relación es necesario entender primero cómo redistribuyen los objetos la luz que incide sobre ellos y la relación entre esa distribución y los atributos perceptivos, relación que está bastante bien establecida en alguno de ellos, como el color, pero no tan bien para otros como la textura o la translucidez o incluso el propio brillo, cuya escala perceptiva está siendo replanteada. En resumen, el estudio de la apariencia parte del conocimiento de la función de distribución bidireccional de dispersión (*BPDF* de sus iniciales en inglés) que, hoy por hoy, ha de ser medida puesto que los modelos simples existentes no dan cuenta de lo que se observa en muchos objetos. El término *BPDF* se usa de forma genérica para hacer referencia tanto a la dispersión producida por reflexión, *BRDF* (función de distribución bidireccional de reflectancia, de sus iniciales en inglés), como a la producida en la transmisión de un haz, *BTDF* (función de distribución bidireccional de transmitancia, de sus iniciales en inglés).

La necesidad de medir la *BPDF* ha dado lugar al desarrollo de instrumentos con características diversas en los últimos años, [2-6]. En casi todos ellos el sistema de iluminación no es móvil, obligando a mover el detector y la muestra para cambiar la geometría de incidencia y

observación, mientras que en otro [3], el sistema de iluminación es móvil y con una distribución lambertiana de radiancia; es decir, una radiancia constante en todas las direcciones. Los sistemas de iluminación sin movilidad son más versátiles, permitiendo usar fuentes espectrales o de amplio espectro con relativa facilidad, pero tienen una restricción muy seria en la divergencia del haz incidente sobre la muestra. Todos ellos realizan la medida exclusivamente en el plano de incidencia de la luz, sin embargo, la aparición de materiales con estructura superficial compleja, es decir, materiales cuyo color tiene una dependencia con el ángulo de iluminación y de observación, hace necesario realizar medidas en direcciones que no están contenidas en el plano de incidencia y con capacidad de variar el ángulo acimutal, pues no siempre son materiales isótropos [7]. Por este motivo, el Grupo de Investigación de Medidas de la Radiación Óptica (GIMRO) del CSIC ha diseñado y construido uno de los pocos instrumentos existentes que permiten realizar este tipo de medidas fuera del plano de incidencia. Entre las características metrológicas del goni-espectrofotómetro desarrollado y construido (GEFE) destaca la capacidad de medir la radiancia realmente retroreflejada en la dirección de incidencia de la luz, cosa que no puede hacer ningún otro instrumento de los referidos anteriormente, además de realizar medidas de forma absoluta (sin usar un patrón de referencia), con baja incertidumbre, alta resolución angular e información espectral en todo el intervalo visible.

La *BPDF* es una función de distribución que expresa cómo una muestra determinada dispersa la energía radiante en cada dirección del espacio. Se calcula como el cociente entre la radiancia de un objeto para cada dirección de observación y la irradiancia que incide sobre él [8]:

$$BPDF = \frac{L(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{E(\theta_i, \lambda)}, \quad (1)$$

siendo  $(\theta_i, \phi_i)$  y  $(\theta_r, \phi_r)$  las coordenadas esféricas del haz incidente y dispersado, respectivamente, respecto al sistema de referencia de la muestra,  $E$  la irradiancia sobre la muestra y  $L$  la radiancia de la muestra en esa dirección. Para facilitar la comprensión, en la Fig. 1 se representan estas coordenadas para un haz incidente en una dirección proveniente de una fuente (color rojo) y una hipotética dirección de observación (color azul). El disco representa la superficie de la muestra.

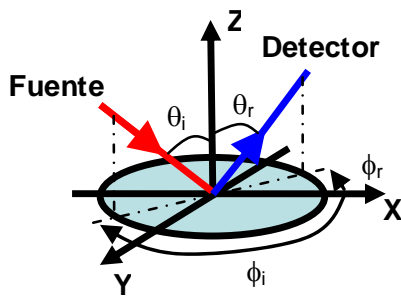


Fig. 1. Representación de las coordenadas en el sistema de referencia de la superficie de la muestra.

Desde el punto de vista físico, el conocimiento de la BSDF es importante para entender la apariencia visual de los objetos y poder reproducirlos en diferentes medios, pues permite calcular la reflectancia y la transmitancia de los mismos, así como sus factores de reflectancia y transmitancia en diversas configuraciones geométricas de incidencia y observación, parámetros que usan las aplicaciones de reproducción de imágenes de objetos o las aplicaciones informáticas de cálculo de ambientes luminosos. Por supuesto, la BSDF es interesante en otras aplicaciones como la caracterización de superficies o el diseño de sistemas ópticos para tener en cuenta la influencia del esparcimiento en las superficies ópticas, especialmente en instrumentos que trabajan con longitudes de onda muy cortas.

Este instrumento permite medir tanto la radiancia de la muestra en cada dirección del espacio como la irradiancia sobre la misma sin necesidad de usar un patrón de referencia, por lo que es un instrumento de medida absoluto. Esta característica metrológica es muy interesante, puesto que evita la dependencia de la medida de patrones externos y, además, permite crear patrones propios de medida de reflectancia

difusa y factor de reflectancia / radiancia, que se pueden calcular a partir de la BSDF de cada muestra [8]. A partir de los valores de reflectancia o transmitancia se calcula la métrica perceptiva deseada (color o brillo) para la geometría de iluminación/observación que se precise en cada circunstancia, ya sea cónica, hemisférica o direccional.

## 2. Descripción del instrumento

El gonio-espectrofotómetro GEFE está compuesto [9] por un sistema de iluminación, un sistema de posicionamiento de las muestras, un sistema de detección y un sistema de alineamiento, como se puede observar en la Fig. 2. Cada uno de ellos está compuesto por diversos elementos que se describen a continuación.

### 2.a. Sistema de iluminación

El sistema de iluminación es fijo, a diferencia de otros instrumentos como el desarrollado por el PTB [3], y consta de una lámpara de xenón debidamente monitorizada con un fotodiodo de silicio para corregir las derivas temporales y un sistema óptico tipo Köhler con lentes de cuarzo que permite producir una zona de irradiación uniforme sobre la muestra con un haz prácticamente colimado. Antes del fotodiodo de silicio se introduce un filtro que elimina la radiación ultravioleta de longitud de onda más corta que podría inestabilizar su respuesta a largo plazo. Esta radiación no es observada por el sistema de detección, como se verá más adelante, por lo que este filtro no introduce ninguna limitación espectral. La lámpara de xenón es de un modelo altamente estable.

El sistema de iluminación tiene una disposición periscópica con un divisor de haz como último elemento. Esta configuración periscópica permite posicionar el sistema de detección en la dirección de incidencia sin ocluir el haz incidente sobre la muestra, por lo que se puede medir realmente la radiancia de la muestra correspondiente a la retrorreflexión. Esta capacidad de medida no está disponible en ninguno de los "gonios" referidos en la literatura hasta la fecha y es muy interesante para la caracterización de materiales retrorreflectantes. El divisor (50 / 50) tiene forma de cuña y un

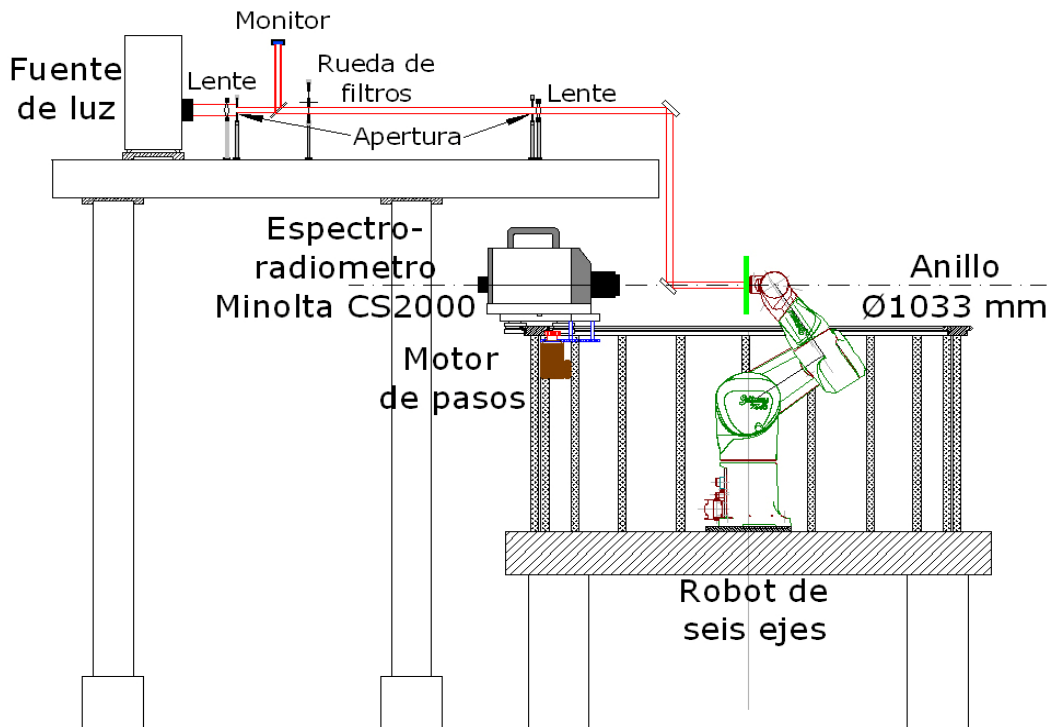


Fig. 2. Esquema del gonio-espectrofotómetro GEFE.

tratamiento antirreflejante de banda ancha en la superficie posterior para minimizar la interferencia entre sus caras.

Dado que las muestras a estudiar pueden reflejar la luz especularmente en distinto grado y que la diferencia entre la componente especular y la difusa de la radiancia puede ser de varios órdenes de magnitud, se han incluido en el sistema de iluminación filtros de densidad neutra que atenúen la radiación incidente cuando se mide la componente especular. Estos filtros están situados en una rueda motorizada controlada automáticamente por el ordenador de control y su transmitancia se ha determinado en este laboratorio.

El diseño del sistema de iluminación permite sustituir la lámpara de xenón por otro tipo de fuente de luz de forma fácil y fiable, sin necesidad de cambiar los elementos ópticos. Así este sistema permite usar fuentes tipo LED e incluso láseres, o incluir un monocromador para estudio de muestras fluorescentes sin necesidad de modificar su diseño.

### 2.1. Sistema de posicionamiento

El sistema de posicionamiento basado en un brazo-robot de seis ejes permite posicionar y orientar la muestra respecto del haz incidente en las direcciones del espacio que se requieran. El sexto eje, que permite rotar la muestra alrededor de su normal, es muy interesante para estudios de uniformidad o simetría [7] y para evaluar posibles direcciones dominantes en la estructura superficial.

La utilización de un robot para el posicionamiento de la muestra permite situar el centro de la superficie de la misma en el centro de giro del sistema de detección con una incertidumbre despreciable frente a otras fuentes y facilita la conversión entre los distintos sistemas inerciales de referencia: sistema de la muestra y sistema del robot.

La sujeción de las muestras opacas se realiza con un sistema de ventosa mecánicamente estable. Este sistema es muy versátil en lo que respecta al tamaño de las muestras a medir.

## 2.2 Sistema de detección

El sistema de detección está constituido por un espectrorradiómetro que mide la radiancia en el intervalo espectral de 380 nm a 780 nm. El instrumento se sitúa sobre una plataforma que se mueve sobre un anillo dentado alrededor del centro de la muestra con un motor de pasos. Así determina la radiancia espectral en cualquier dirección contenida en el plano del anillo. La medida se realiza en el intervalo visible del espectro con un campo de visión variable y seleccionable de forma manual, siendo el valor mínimo  $0,1^\circ$  y el máximo  $1^\circ$ . En lugar del espectrorradiómetro se puede usar otro sistema de detección constituido por un radiómetro, un fotómetro o cualquier otro tipo de detector con o sin sistema de análisis espectral, según sea el interés en la magnitud a determinar.

## 2.3. Sistema de alineamiento

El posicionamiento incorrecto del punto de referencia de la superficie de la muestra en el centro de giro del sistema de detección da lugar a errores sistemáticos en la medida de la *BSDF*. Para evitar estos errores se ha diseñado un sistema de alineamiento constituido por dos láseres que se propagan a lo largo de dos diámetros del anillo, de forma que el punto en el que se cruzan es el centro del anillo y en consecuencia el centro de giro del sistema de detección. Los haces de los láseres tienen un diámetro de un milímetro aproximadamente, por lo que la posición del centro virtual se determina con una incertidumbre despreciable. Este sistema de alineamiento también es una novedad de este instrumento con respecto a los desarrollados en otros laboratorios.

## 3. Características metrológicas

Con el gonio-espectrofotómetro GEFE se pueden realizar medidas absolutas de la *BSDF* con baja incertidumbre en todas las direcciones de incidencia / observación de hasta  $75^\circ$  respecto a la normal a la superficie de la muestra. Este límite viene dado por el tamaño del área irradiada, pudiendo llegarse a ángulos mayores en caso de ser necesario con tan sólo aumentar esa área, puesto que no hay limitaciones mecánicas. Las dos cualidades más novedosas de

este instrumento son la capacidad para medir en direcciones que no están contenidas en el plano de incidencia, aspecto muy importante si se quiere determinar la *BSDF* de superficies estructuradas, y la capacidad de medir en la dirección de incidencia, aspecto muy importante para las medidas de retrorreflexión. Ésta última capacidad se consigue gracias al divisor de haz del sistema de iluminación, cuyo soporte introduce una zona de oclusión parcial que se analiza más adelante.

La capacidad de realizar medidas absolutas es otra característica muy importante de este instrumento y que no tienen otros muchos. La irradiancia sobre la muestra se determina a partir de una lectura de radiancia del mismo espectrorradiómetro y del ángulo sólido del haz incidente, lo que permite calcular la emitancia radiante de la imagen de irradiación de la muestra, que es igual a la irradiancia en esta configuración. Esta forma de medir la irradiancia permite a su vez reducir la incertidumbre de la *BRDF*, puesto que, como se puede ver en el apartado 4, ésta se calcula a partir del cociente de dos respuestas del mismo espectrorradiómetro, quedando reducida la influencia de la calibración del instrumento al factor de linealidad de su respuesta.

El sistema de iluminación produce una irradiancia uniforme sobre la muestra con un área mayor que la proyección de la observada desde el sistema de detección en cualquier orientación y con una distribución angular conocida. Esto se consigue con un camino óptico largo y un haz de rayos casi paralelos, cuya divergencia es  $2^\circ$ .

Otra característica importante del gonio-espectrofotómetro GEFE es su amplio rango dinámico de medida de radiancia. La irradiancia sobre la muestra se puede variar en tres órdenes de magnitud mediante filtros neutros cuya inserción en el camino óptico se controla mediante el ordenador de control central. Además, el control del tiempo de integración del espectrorradiómetro permite variar otras tres décadas, lo que hace un total de hasta seis décadas de rango dinámico.

El tiempo de medida es relativamente más corto que el habitual en este tipo de

instrumentos, siendo tan sólo de 5 adquisiciones del espectro completo por minuto. Esta característica está determinada tanto por el tiempo de adquisición del espectrorradiómetro como por el tiempo de posicionamiento de las muestras y del propio espectrorradiómetro.

### 3.1. Ángulo de oclusión

GEFE tiene un ángulo de oclusión parcial de la radiación emitida por la muestra en la región cercana a la de incidencia, es decir en la zona de retroreflexión, pero no tiene ningún ángulo muerto como ocurre en los otros gonio-espectrofotómetros desarrollados en otros laboratorios [2-6].

Para determinar la extensión y magnitud de esa oclusión parcial producida por la montura del divisor de haz, se midió la radiancia del bulbo de una lámpara patrón de flujo luminoso con bulbo translúcido en la zona de retroreflexión. La gráfica superior de la Figura 3 muestra la respuesta relativa del espectrorradiómetro para cada posición, con un campo de observación de  $0,1^\circ$ , calculada como la

relación entre la radiancia medida con el divisor y sin él, y teniendo en cuenta el efecto de desplazamiento que produce el espesor del divisor. Cada punto es el valor medio del espectro. En el eje de abscisas se representa el desplazamiento angular entre la dirección del eje óptico de iluminación del gonio que pasa por el centro del divisor y la de observación del espectrorradiómetro. Se puede apreciar que para el ángulo de  $3,2^\circ$ , comienza la región en la que el detector se encuentra tras la montura del divisor y, para ángulos mayores que  $7,5^\circ$ , el espectrorradiómetro ha salido de la zona crítica de detección. Se observa que la respuesta relativa es superior al 20% en la región de mayor oclusión. Como esta respuesta relativa depende parcialmente de la transmitancia del divisor, siempre existirá una dependencia con la longitud de onda, menor cuanto menos intersecte el objetivo con la región del divisor. La gráfica inferior de la Fig. 3 muestra la reproducibilidad de la medida. Se aprecia un ligero aumento en la zona de la montura del divisor pero siempre es inferior al 1%.

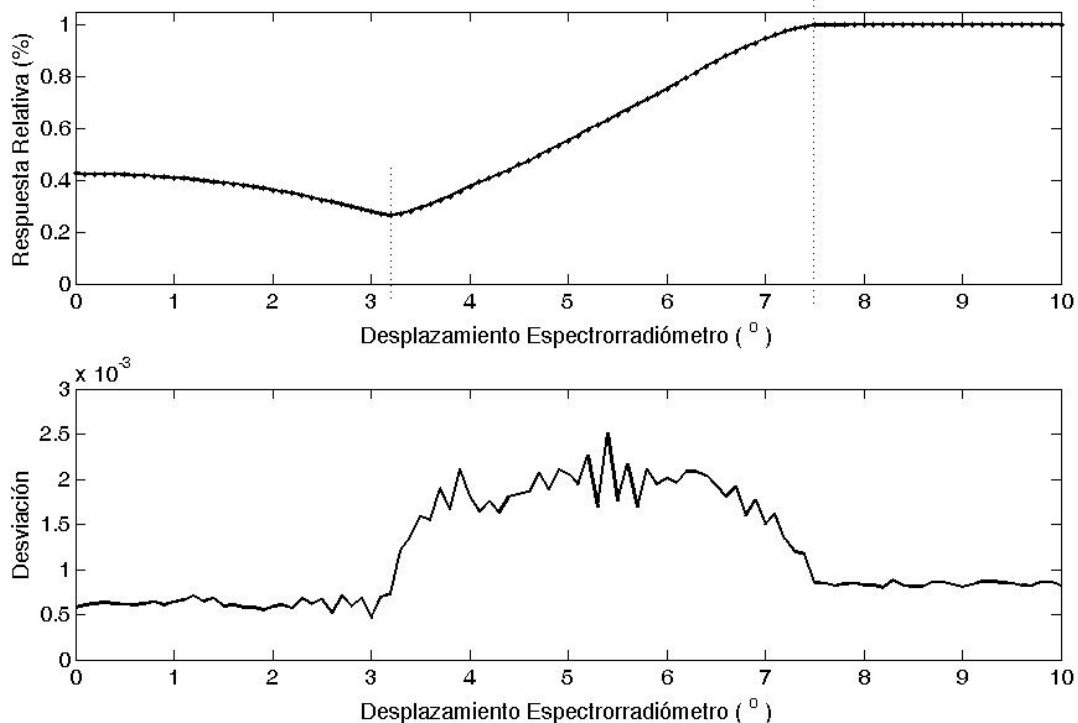


Fig. 3. Variación de la respuesta relativa del espectrorradiómetro con el desplazamiento angular respecto al eje óptico del gonio y repetibilidad de la medida en la región tras el divisor del haz.

### 3.2. Radiación parásita

La radiación parásita contribuye a la señal del espectrorradiómetro sin provenir de la fuente de interés. La radiación parásita junto a la señal de oscuridad limitan la mínima radiancia medible de la fuente. Existen dos orígenes de radiación parásita: la ambiental, procedente de los distintos elementos del gonio como pantallas luminosas de instrumentos o radiación del sistema óptico insuficientemente apantallada, y la procedente de interreflexiones dentro del divisor del gonio, cuyo contenido espectral debe ser similar al de la lámpara de xenón. Por la configuración del instrumento y su entorno, se asume que la radiación parásita ambiental no depende de la dirección de observación, mientras que la procedente del divisor afecta sólo cuando el espectrorradiómetro está situado en posiciones de medida tras el divisor.

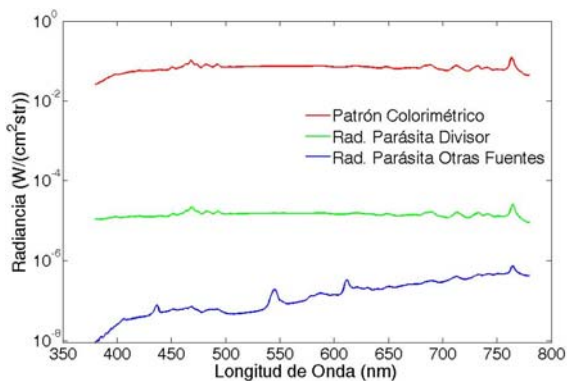


Fig. 4. Relación entre la radiancia típica medida para un patrón cerámico colorimétrico y las señales correspondientes a las radiaciones parásitas del gonio-espectrofotómetro GEFE.

En la Fig. 4, se muestran ambas componentes de radiación parásita junto con un valor típico de la radiancia de un patrón cerámico colorimétrico en este instrumento. Para obtener estas señales se situó el espectrorradiómetro en la dirección del sistema óptico de iluminación, tras el divisor de haz ( $\phi_A = 0$ ) para registrar la procedente de las interreflexiones del divisor y en otra dirección que no interceptaba al divisor de haz ( $\phi_A \neq 0$ ) para medir la radiación parásita de las otras fuentes. En ambos casos no había ninguna muestra reflejando luz en la dirección de observación del espectrorradiómetro. Se puede observar que la radiación parásita ambiental

está entre 2 y 3 órdenes de magnitud por debajo de la de interreflexiones en el divisor y entre 5 y 6 por debajo de la radiancia medida, mientras que la componente de radiación parásita por interreflexiones es 3 órdenes de magnitud inferior a la radiancia medida. En consecuencia, se puede decir que la radiación parásita ambiental es despreciable y que la de interreflexiones se considerará según sea la cuantía de la radiancia de la muestra en la dirección de incidencia.

### 4. Ecuación de medida e incertidumbre asociada

Para establecer la ecuación de medida, partimos de la definición de la *BSDF* (1), en particular, de la componente de reflectancia, la *BRDF*, que es la que se ha determinado en los resultados que se indican a continuación. Esto no resta generalidad puesto que la ecuación de las componentes de reflexión y transmisión es la misma que la general de la *BSDF*:

$$BRDF = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{E(\theta_i, \lambda)} \quad (2)$$

En el gonio-espectrofotómetro GEFE, la radiancia se obtiene directamente del espectrorradiómetro y la irradiancia se calcula a partir de la radiancia que emite el plano de la muestra, considerado como objeto virtual, y del ángulo sólido del haz incidente. Esta radiancia se mide colocando el espectrorradiómetro en la dirección del haz incidente en ausencia de muestra. En estas condiciones la irradiancia sobre la muestra viene dada por

$$E = L_i(\theta_i, \lambda) \omega_i \cos \theta_i, \quad (3)$$

siendo  $L_i$  la radiancia medida,  $\theta_i$  la dirección de incidencia del haz y  $\omega_i$  el ángulo sólido del haz incidente.

Sustituyendo (3) en (2), queda:

$$BRDF = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{L_i(\theta_i, \lambda) \omega_i \cos \theta_i} \quad (4)$$

Las radiancias,  $L_r$ , reflejada, y  $L_i$ , incidente, se expresan en función de la adquisición del espectrorradiómetro, es decir, de una radiancia medida,  $L_M$ . Para tener en cuenta la uniformidad de la zona irradiada en el campo de visión y la

incertidumbre del posicionamiento, los valores de radiancia se pueden escribir:

$$L_i(\theta_i, \lambda) = L_M(\lambda, \phi_A = \pi)(1 + \zeta_1), \quad (5)$$

$$L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = L_M(\lambda, \phi_A)(1 + \zeta_2)g(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r), \quad (6)$$

donde  $\phi_A$  es el ángulo que define la posición del espectrorradiómetro sobre el anillo tomando como origen la dirección del haz de iluminación,  $\zeta_1$  y  $\zeta_2$  representan la uniformidad de la irradiancia en el campo de visión del espectrorradiómetro con valor esperado nulo y la función  $g$ , con valor esperado 1, representa la incertidumbre del posicionamiento angular para cada configuración.

Esta relación de valores de radiancia debe ser corregida para tener en cuenta la transmitancia de los filtros de densidad neutra que se utilicen en cada medida. Finalmente, la relación para la *BRDF* es:

$$BRDF = \frac{L_M(\lambda, \phi_A)g(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)(1 + \zeta_2)\tau_i(\lambda)}{L_M(\lambda, \phi_A = \pi)\omega_i \cos\theta_i(1 + \zeta_1)\tau_{r,j}(\lambda)}, \quad (7)$$

siendo  $\tau_i$  y  $\tau_{r,j}$  las transmitancias espectrales de los filtros neutros usados en la medida de la radiancia incidente y reflejada, respectivamente. De acuerdo con las reglas para el cálculo de la incertidumbre de medida de la ISO [10], la incertidumbre relativa asociada a la medida de la *BRDF* vendrá dada por:

$$u_r^2(BRDF) = u_r^2(M) + u_r^2(g) + u_r^2(\tau) + u_r^2(\omega_i) + u_r^2(\zeta), \quad (8)$$

donde:

$u_r(M)$  incluye las incertidumbres relativas de la medida del espectrorradiómetro. Incertidumbres asociadas a la repetitividad, corrección de linealidad de respuesta y deriva de la fuente de luz. El valor es menor que  $1 \times 10^{-2}$ .

$u_r(g)$  incluye las incertidumbres asociadas al posicionamiento, tanto de la muestra como del espectrorradiómetro. Su valor estimado es menor que  $1 \times 10^{-2}$ .

$u_r(\tau)$  incluye las incertidumbres relativas de la transmitancia de los filtros y del divisor de haz cuando se mide la retrorreflexión. Su valor es menor que  $3 \times 10^{-3}$ .

$u_r(\omega_i)$  es la incertidumbre relativa asociada a la caracterización del ángulo sólido, cuyo valor es menor que  $6 \times 10^{-4}$ .

$u_r(\zeta)$  es la incertidumbre relativa a la no uniformidad de la zona iluminada en la muestra. Su valor es variable, es menor que  $1 \times 10^{-3}$  para ángulos hasta los  $55^\circ$ , y menor que  $1 \times 10^{-2}$  para ángulos hasta los  $75^\circ$ .

Tras una primera valoración individual de los términos que componen esta expresión, se puede concluir que la incertidumbre de la medida es menor del 1%, lo que se puede considerar baja incertidumbre.

## 5. Resultados

Un ejemplo de los primeros resultados obtenidos se muestra en la Fig. 5, donde se puede observar la *BRDF* de un patrón cerámico de color rosa con acabado en brillo. Como se puede observar en la figura, la mayor modulación espectral de la radiancia (responsable de la cromaticidad) se encuentra en las direcciones de observación correspondientes a la reflexión difusa, cuya distribución espectral se corresponde con la que se conoce para la reflectancia 0:d de este patrón colorimétrico. Los valores de radiancia mayores corresponden a las direcciones en las que se da la reflexión de Fresnel. Es de notar la gran similitud entre todas las distribuciones espectrales correspondientes a reflexiones difusas y entre las correspondientes a reflexiones especulares. Además, se observa en la región difusa que para las longitudes de onda más largas, hay una pequeña desviación en las configuraciones de retrorreflexión. Estos resultados son muy previos y todavía no se ha estimado totalmente la incertidumbre de los mismos, pues hay que refinar los sistemas de alineamiento del instrumento, las rutinas a seguir y el control de la radiación parásita en el divisor de haz.

Conocer la *BRDF* permite estudiar el comportamiento de la luz reflejada para una determinada configuración de iluminación / observación o elegir un intervalo espectral y observar la evolución en ese intervalo para distintas geometrías en el hemisferio. A continuación se presentan los resultados



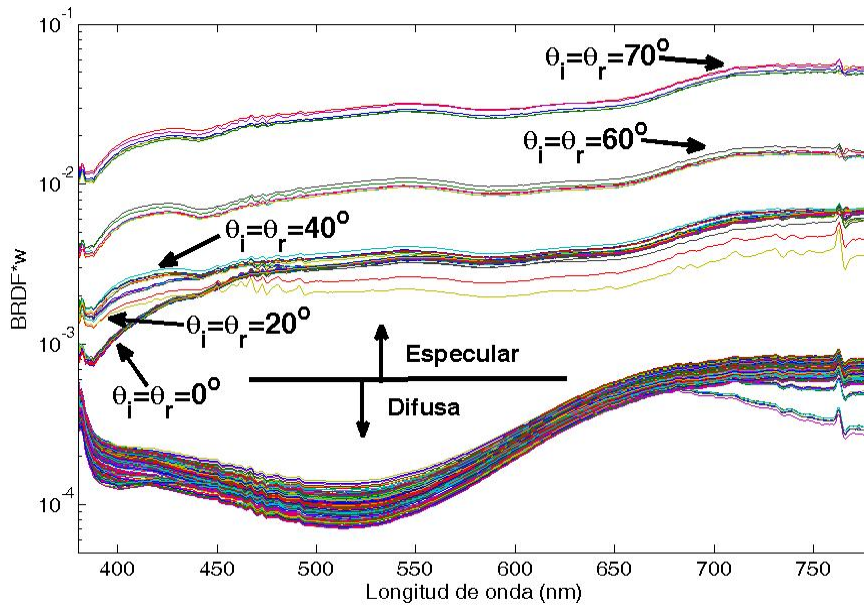


Fig. 5. Resultados de una medida de la función de distribución bidireccional de reflectancia, *BRDF*, a distintas configuraciones. Se indican los ángulos de incidencia y observación. En la región especular se encuentran las medidas correspondientes a la reflexión de Fresnel, mientras que en la difusa se encuentran las demás direcciones.

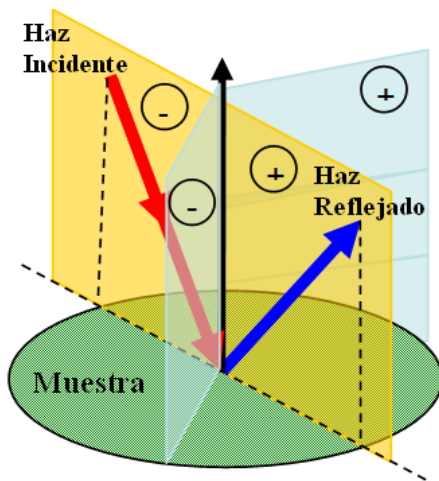


Fig. 6. Esquema indicativo de la situación de los planos de medida. En amarillo, plano de incidencia de la muestra, en añil, semiplanos simétricos fuera del plano de incidencia de la muestra.

obtenidos a la longitud de onda de 550 nm para la *BRDF* de una teja cerámica mate tanto en el plano de incidencia como en dos semiplanos simétricos fuera del mismo. Los resultados obtenidos en otros planos y longitudes de onda son análogos. Estos resultados provienen de una medida con 900 configuraciones diferentes de iluminación / observación, de las cuales se han seleccionado las más significativas para estas figuras.

Para una mejor comprensión de los resultados, se muestra en la Fig. 6 un croquis con la situación relativa de los planos de medida: el plano donde está situada la muestra en color verde, un posible plano de incidencia (en amarillo), definido por un haz incidente, su haz reflejado especular y la normal a la muestra, y dos semiplanos simétricos fuera del plano de incidencia (en añil). Con el plano de incidencia queda fijado el ángulo azimutal de detección, con  $\phi_r=0^\circ$  se define el semiplano donde está incluido el haz incidente y con  $\phi_r=180^\circ$ , el semiplano del haz especular. Por otra parte, se diferencian los ángulos polares de detección como positivos y negativos, de manera que, cuando  $\theta_r > 0$  se trata del semiplano  $\phi_r=180^\circ$ , mientras que si  $\theta_r < 0$  se trata del semiplano  $\phi_r=0^\circ$ .

En la Fig. 7 se presenta la *BRDF* de la teja cerámica mate en función del ángulo polar de observación para tres ángulos polares de incidencia diferentes dentro del plano de incidencia. Se observa cómo cambia la *BRDF* con respecto al ángulo polar de detección. En la primera gráfica se puede observar el típico comportamiento simétrico de la radiancia de estas muestras en incidencia normal, con la caída habitual de radiancia para direcciones de observación que se alejan de la normal. No hay una dirección privilegiada o especular pues es

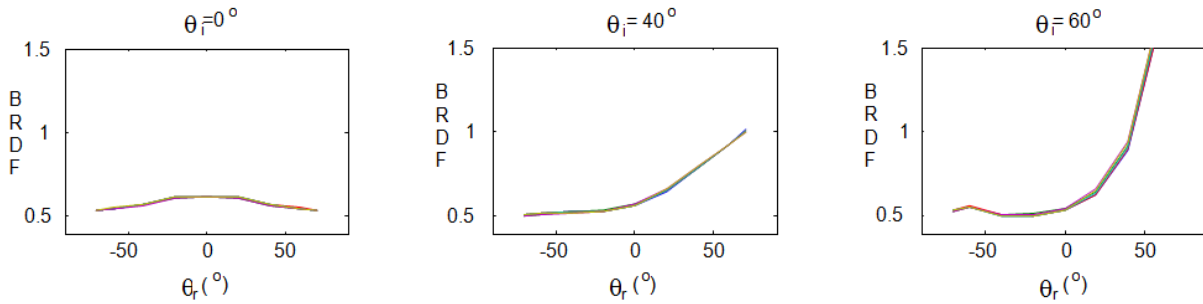


Fig. 7. Valores de la *BRDF* de una teja cerámica mate en el plano de incidencia.

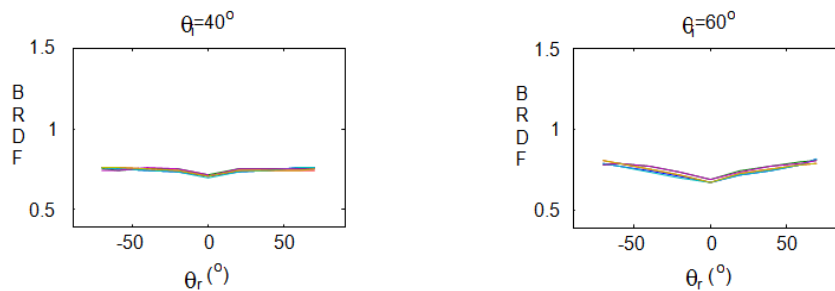


Fig. 8. Valores de la *BRDF* en dos semiplanos simétricos fuera del plano de incidencia para una teja cerámica mate.

una muestra mate, pero sí se observa un aumento de la *BRDF* en el semiplano especular, mayor cuanto mayor es el ángulo polar de incidencia. Dicho aumento significa que la muestra no es un difusor perfecto sino que tiene una cierta componente especular que se muestra conforme aumenta el ángulo polar incidente,  $\theta_i$ . También es de notar la aparición de un máximo relativo en la dirección de incidencia de  $60^\circ$  en las direcciones de observación próximas a la de incidencia. Se podría decir que se da un efecto de intensificación de la retrorreflexión, pero téngase en cuenta que se trata de una muestra mate.

Aunque no se aprecia bien, en cada gráfica de la Fig. 7 hay representadas seis líneas de datos, cada una es una orientación del haz incidente, es decir, tiene diferentes ángulos azimutales de incidencia,  $\phi_i$ . Están solapadas porque la muestra es isótropa con respecto a la iluminación y el resultado de la *BRDF* es independiente de la orientación desde donde se ilumina la muestra.

Existen diversos instrumentos que realizan este tipo de medidas pero no hay tantos que sean capaces de medir fuera del plano de incidencia.

En la Fig. 8 se muestran resultados de la *BRDF* de la misma muestra que la Fig. 7, pero observando fuera del plano de incidencia, semiplanos azules en la Fig. 6. Estos semiplanos corresponden a posiciones desplazadas  $60^\circ$  respecto al semiplano especular. Los ángulos azimutales de observación,  $\phi_r$ , son  $120^\circ$  y  $240^\circ$ , semiplanos simétricos respecto al plano de incidencia. Se puede observar que se mantiene la simetría en relación al ángulo polar de detección para todos los ángulos de incidencia, lo que es debido a que la muestra es isótropa respecto a la observación. Es de notar el mínimo relativo de radiancia que se produce cuando  $\theta_r$  es igual a  $\theta_i$ .

Al igual que en la Fig. 7, en cada gráfica de la Fig. 8 hay representadas seis líneas de datos, cada una corresponde a una orientación del haz incidente, es decir, tiene diferentes ángulos azimutales de incidencia,  $\phi_i$ . Nuevamente están solapadas porque la muestra es isótropa con respecto a la iluminación y el resultado de la *BRDF* es independiente de la orientación desde donde se ilumina la muestra.

## 6. Conclusiones

Se ha descrito un gonio-espectrofotómetro (GEFE) para la medida de la *BRDF* de superficies diseñado y construido por el grupo GIMRO del Instituto de Óptica del CSIC con características que no tienen otros instrumentos descritos en la bibliografía. Este instrumento es capaz de medir la *BRDF* de forma absoluta, sin necesidad de usar un patrón de referencia, en direcciones de observación tanto contenidas en el plano de incidencia como no contenidas en el mismo, incluyendo la medida de la radiancia en la propia dirección de incidencia.

El instrumento tiene un sistema de iluminación fijo que permite utilizar distintos tipos de fuentes de iluminación, tanto de banda ancha como estrecha desde el punto de vista espectral. El sistema de detección también es versátil, pudiéndose sustituir el espectroradiómetro actual por otros sistemas con relativa facilidad. No existen limitaciones mecánicas para los ángulos de incidencia ni de observación, siendo el tamaño de la mancha luminosa sobre la muestra el que limita el ángulo máximo de observación. Este tamaño se puede cambiar con facilidad por utilizar un sistema de iluminación tipo Köhler.

La utilización de un robot para el posicionamiento de las muestras junto con un sistema de alineamiento con láseres y el método de medida de la irradiancia, permite realizar medidas de la *BRDF* con baja incertidumbre

(menor que 1 %). Aún hay partes que deben mejorarse como reducir la radiación parásita producida por el divisor de haz.

Los primeros resultados previos de la *BRDF* de un patrón colorimétrico con acabado en brillo obtenidos con GEFE están en consonancia con la curva de distribución espectral conocida para dicho patrón. Por otra parte, la medida de la *BRDF* de un patrón colorimétrico con acabado en mate, ha puesto de manifiesto su divergencia angular respecto al difusor perfecto, así como otras características interesantes que deberán estudiarse en mayor profundidad, como el aumento de la componente especular con el ángulo de incidencia.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Plan Nacional de Física el apoyo para la realización de este trabajo mediante la subvención de referencia FIS2007-66671-C02-01, al Dr. Armanda del IAI (CSIC) por las discusiones mantenidas sobre el diseño mecánico y el sistema de sujeción, y al Programa JAE del CSIC por la concesión de la ayuda de Investigador en Formación. Asimismo agradecen al Instituto de Física Aplicada el apoyo dado a este proyecto que, en su mayor parte, se desarrolló mientras el grupo de investigación pertenecía a ese instituto del CSIC.