

Distribución angular de la intensidad radiante espectral de LEDs blancos de alta luminosidad

Angular and spectral radiant intensity distribution of high brightness white LEDs

A. Villamarín^(S), A. Ferrero^(S), A. Pons^(S), J. Campos^(S), A. Rabal^(S), M. L. Hernanz^(S),
J. L. Velázquez, A. Corróns^(S)

Instituto de Óptica Daza de Valdés. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Serrano 144, 28006 Madrid, Spain.

(*) Email: ayalid.villamarin@io.cfmac.csic.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 30/09/2011. Revisado / Revised: 05/12/2011. Aceptado / Accepted: 27/12/2011.

RESUMEN:

En este trabajo abordamos el estudio de la distribución angular y espectral de la emisión de LEDs blancos convencionales empleando el Gonio-espectrofotómetro Español de baja incertidumbre (GEFE). Con este instrumento se obtienen los espectros de emisión para diferentes planos de observación, de manera que contamos con la información necesaria para caracterizar la emisión de cualquier fuente que emita en el rango visible (380 nm a 780 nm). Este estudio se lleva a cabo con la finalidad de determinar un protocolo de medida, que nos permita, más adelante, generar un modelo de irradiancia para LEDs en función de la distancia al emisor. Presentamos los resultados preliminares que se obtienen empleando LEDs blancos de alta luminosidad y el instrumento de medida antes mencionado.

Palabras clave: LEDs, Gonioespectrofotómetro, Intensidad Luminosa, Distribución Angular, Distribución Espectral, LEDs Blancos de Alta Luminosidad.

ABSTRACT:

In this paper we study the angular and spectral distribution of the emission of conventional white LEDs using the low uncertainty Spanish Gonio-spectro-photometer (GEFE). With this instrument we obtain the emission profiles for different observation planes, so that you can get the information needed to characterize the emissions from any source in the visible range (380 nm to 780 nm). This study was achieved in order to determine a measurement protocol that will allow us later to generate an irradiance model for LEDs based on the distance to the source. We show preliminary results obtained by using high brightness white LEDs and the instrument above mentioned.

Key words: LEDs, Gonio-Spectro-Photometer, Luminous Intensity, LED Angular Distribution, LED Emission, Spectral Distribution, High Brightness, White LEDs.

REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. N. Sándor, P. Csuti, P. Bodrogi, J. Schanda, "Visual observation of colour rendering", Proc. CIE Expert Symposium on LED Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment, CIE x026:2004, 16-19 (2004).
- [2]. N. Sándor, J. Schanda, "CIE visual colour-rendering experiments", Proc. AIC Colour '05, 511-514, (2005).
- [3]. N. Sándor, P. Bodrogi, P. Csuti, B. Kranicz, J. Schanda, "Direct visual assessment of colour rendering", Proc. 2f1' CIE Session. CIE 152:2003, 01-42-01-45 (2003).

- [4]. F. Szabó, N. Sándor, P. Bodrogui, J. Schanda, "Colour rendering of white LED light sources: Visual experiment with colour samples simulated on a colour monitor", CIE León '05: CIE Midtenn Meeting - International Lighting Congress, (2005).
- [5]. P. Bodrogui, P. Csuti, F. Szabó, J. Schanda, "Why does the CIE colour rendering index fail for white RGB LED light sources", Proc. CIE Expert Symposium on LEDs Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment (2004).
- [6]. CIE Technical Report 127, "Measurements of LEDs", 2nd Edition, International Commission on Illumination, Vienna (2007).
- [7]. A. M. Rabal, A. Ferrero, J. L. Fontecha, A. Pons, J. Campos, A. Corróns, A. M. Rubiño, "Gonio-spectrophotometer for low-uncertainty measurements of bidirectional scattering distribution function (BSDF)", Proc CIE. Expert Symposium on "Spectral and Imaging Methods for Photometry and Radiometry, Bern, Switzerland, 30 - 31 August (2010).
- [8]. Hebei LTD (electronics components from China), <http://www.hebeiltd.com.cn/?p=led.diode>.
- [9]. A. M. Rabal, A. Ferrero, J. L. Fontecha, A. Pons, J. Campos, A. Corróns, "Gonioespectrofotometro para medir la función de distribución bidireccional de dispersión (BSDF)", *Opt. Pura-Apl.* **44**, 137-147 (2011).

1. Introducción

En los últimos años, la iluminación basada en fuentes de estado sólido, en particular los LEDs, se ha identificado, por su eficacia energética, como una alternativa real a la basada en lámparas de incandescencia (cuya fabricación en Europa está previsto que finalice en el año 2012), pero además, los LEDs son también potenciales sustitutos de las lámparas fluorescentes compactas, contaminantes de mercurio. La iluminación con LEDs presenta, a priori, indudables ventajas: fiabilidad, mayor eficiencia energética, mayor resistencia a las vibraciones, mejor visión ante diversas circunstancias de iluminación, menor disipación de energía, menor riesgo para el medio ambiente, capacidad de operar de forma intermitente o en modo continuo, respuesta rápida, etc. Este avance es importante, pero el uso de esta nueva tecnología puede verse amenazado si no viene acompañado de una determinación exacta y sin ambigüedades de sus características. A diferencia de los emisores tradicionalmente empleados en iluminación, la emisión de los LEDs es muy dependiente de la temperatura y de la corriente de alimentación y se produce en un ángulo sólido más o menos estrecho, por lo que su propagación no obedece a la ley del inverso del cuadrado de la distancia tal y como la conocemos. Otra característica importante de los LEDs es que la emisión espectral de los mismos se encuentra en un régimen intermedio entre fuentes monocromáticas y fuentes de amplio ancho de banda y

tanto la reproducción como la percepción del color difieren de la obtenida mediante las fuentes tradicionales, por lo cual no es posible aplicar los métodos y modelos utilizados para la obtención de los índices de rendimiento del color (CRI) para fuentes tradicionales [1-5]. Además, en su utilización en iluminación, habitualmente se usan elementos ópticos externos, para redirigir o difundir la luz emitida. Para diseñar y calcular estos elementos ópticos es imprescindible conocer con precisión la distribución angular de intensidad radiante espectral de las fuentes de luz, que en el caso concreto de los LEDs presenta además una variación espectral con la temperatura, que se debe tener en cuenta si se quiere obtener una iluminación uniforme. Es por esto que deben establecerse nuevos métodos e instrumentos de medida que nos permitan obtener la información más precisa y sin ambigüedades del comportamiento de estas fuentes.

En la actualidad, nuestro grupo está inmerso en un proyecto de investigación cuyos objetivos incluyen, por una parte, el estudio y desarrollo de métodos de medida de características radiométricas, fotométricas y colorimétricas de fuentes de estado sólido, en particular LEDs y OLEDs, de acuerdo con las recomendaciones internacionales [6] y por otra, estudiar la distribución espectral y angular de la emisión de los LEDs de manera que se pueda desarrollar un modelo para la propagación que facilite su uso en iluminación. Nuestro laboratorio dispone de un gonioespectrofotómetro de baja incer-

tidumbre [7], diseñado y construido para determinar la distribución angular de fuentes tanto primarias como secundarias. Este instrumento permite caracterizar la distribución angular de la radiación óptica emitida por los LEDs en todo el hemisferio.

Para este estudio, como un primer paso, empleamos LEDs blancos de alta luminosidad de $\varnothing 5\text{mm}$ del fabricante HB (Hebei I. T) [8], con ángulos de divergencia de 30° y 60° los cuales etiquetaremos a lo largo del texto como LED(a) y LED(b), respectivamente. Antes de realizar cualquier tipo de medida debemos conocer las propiedades operacionales de cada LED, por lo que realizamos un estudio de las características espectrales de la emisión, la estabilidad con el tiempo y el comportamiento de la distribución espectral ante variaciones en la corriente de alimentación. Posteriormente medimos y analizamos, empleando el gonioprotómetro, la distribución angular de la radiancia a diferentes ángulos θ y ϕ , que son las coordenadas esféricas respecto a un sistema de referencia ortogonal (XYZ) centrado en la superficie extrema del LED donde Z es la dirección del eje de simetría del LED.

2. Características operacionales

Los LEDs de este estudio han sido diseñados y construidos por el fabricante para operar en condiciones óptimas a corriente directa de 20 mA, voltaje V_f entre 3.2 V y 3.5 V y temperatura ambiente $T_a=25^\circ\text{C}$. Estas condiciones aseguran un valor máximo del espectro de emisión en $LDO_{max}=460\text{ nm}$ para LED(a) y $LDO_{max}=457\text{ nm}$ para LED(b). Cada LED ha sido montado en un zócalo de forma cilíndrica que tiene el eje axial del cilindro alineado con el eje mecánico del LED.

Una vez fijadas las condiciones de medida, estudiamos la estabilidad temporal de cada LED midiendo la temperatura ambiente T_a , y el voltaje de alimentación V_{LED} . Las medidas se hacen cada 30 segundos desde el encendido, registrando asimismo en cada medida, la curva de distribución espectral relativa empleando un espectrorradiómetro Minolta CS1000. En la Fig. 1 se muestran las variaciones de la radiancia relativa L_{max} a la longitud de onda de máxima

emisión LDO_{max} en función del tiempo, correspondientes a un LED(a). La radiancia relativa decae con el tiempo hasta transcurrido los primeros 3000 s cuando comienza a estabilizarse y se mantiene constante. Aunque en valores cercanos a los 1000 s observamos una pequeña discontinuidad en torno al 0,09%, podría decirse que esta discontinuidad es despreciable ya que la misma es producto de una variación puntual en la tensión de alimentación V_{LED} atribuida a las condiciones experimentales. No se observaron cambios en las medidas de la temperatura ambiente registrada, manteniéndose ésta constante en el valor $T_a=22,3^\circ\text{C}$.

Para determinar las variaciones en el espectro de emisión en función de la corriente de alimentación, medimos los espectros de emisión para valores de corriente de entrada alrededor del valor óptimo indicado por el fabricante ($I_f=20\text{ mA}$) y representamos estos espectros para cada valor de corriente. Estas medidas se hicieron aumentando gradualmente la corriente en 5 mA desde 5mA hasta 80 mA (medida 1) y posteriormente, una vez alcanzada la máxima corriente, disminuyendo la misma gradualmente hasta alcanzar 5 mA (medida 2). Comparando las medidas 1 y 2 podremos determinar si el comportamiento al aumentar o disminuir la corriente de alimentación es reproducible independientemente de que la medida se haga tras aumentar o disminuir la corriente. En la Fig. 2 se muestra la gráfica de la variación de la longitud de onda de máxima emisión (LDO_{max}) en función de la corriente de alimentación para las medidas 1 y 2. De acuerdo

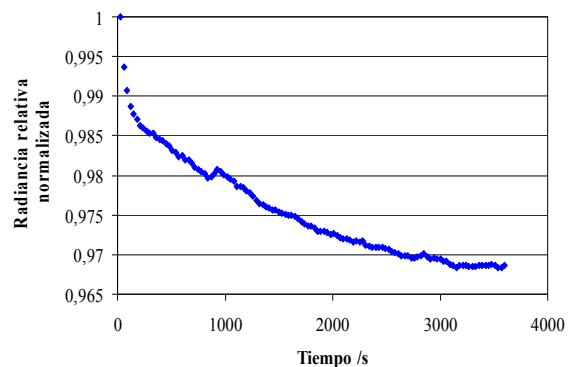


Fig. 1. Radiancia relativa a la longitud de onda de máxima intensidad de un LED(a) en función del tiempo.

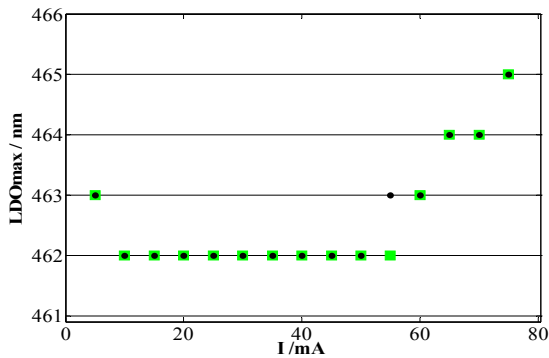


Fig. 2. Variaciones en la longitud de onda de máxima emisión LDO_{max} del espectro de un LED(a) en función de la corriente de alimentación (medida 1, ■, incrementando la corriente; medida 2, ●, disminuyendo la corriente).

con la Fig. 2, la LDO_{max} permanece constante dentro del intervalo de corrientes de alimentación de 10 mA a 50 mA; valor a partir del cual se observa un desplazamiento hacia longitudes de onda mayores. También se puede apreciar el mismo comportamiento en las medidas 1 y 2, aunque hay un punto en el que no coinciden. No obstante ha de tenerse en cuenta que la resolución de la medida de longitud de onda es 1 nm.

3. Distribución angular

Hemos medido la distribución angular de emisión de cada LED empleando el Goni-espectrofotómetro Español (GEFE), diseñado originalmente para realizar medidas absolutas y de baja incertidumbre de la función de distribución bidireccional de dispersión de emisores secundarios (BSDF) [9], pero que puede adaptarse fácilmente a la medida angular de la emisión de fuentes primarias.

Este instrumento se compone de tres subsistemas: el de iluminación, el de posicionamiento de la muestra o fuente y el sistema de detección. El primer subsistema es fijo, y los otros dos son móviles. Para los LEDs empleamos únicamente los subsistemas de posicionamiento y detección. El subsistema de posicionamiento consta de un brazo robot (ROBOT ARM TX-40 Stäubli) de 6 ejes, 3 que permiten posicionar la fuente en el centro del plano de referencia (X,Y,Z) y realizar traslaciones a lo largo de las tres dimensiones del espacio que forman dicho sistema y 3 ejes

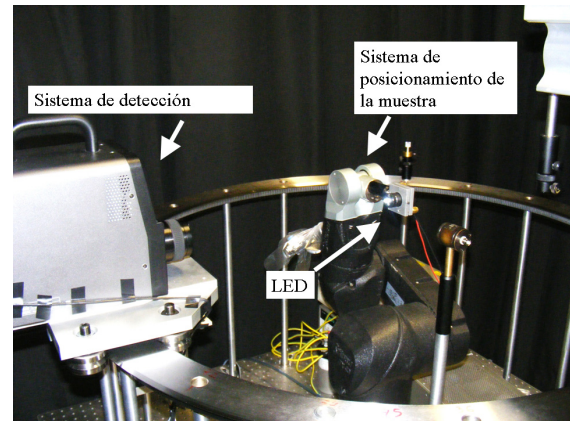


Fig. 3. Fotografía del sistema de medida.

que permiten rotar la fuente alrededor de cada eje del sistema de referencia. El subsistema de detección consta de un espectrorradiómetro (Konica -Minolta CS-2000A) con campo de visión variable ($0,1^\circ$, $0,2^\circ$ y 1°) y respuesta espectral en el visible (380 nm -780 nm). Este espectrorradiómetro se sitúa en una plataforma que se desplaza sobre un anillo dentado (de diámetro 1,03 m) girando alrededor del centro de la fuente. La figura 3 muestra una fotografía del montaje experimental. El LED se sitúa en el centro de giro del sistema, que se determina mediante el punto de intersección de 2 láseres que se propagan a lo largo de dos diámetros del anillo dentado.

Alineamos el LED respecto al espectrorradiómetro, enfocando justo en el centro de la cabeza del LED, siguiendo las recomendaciones de la CIE [6]. Se utiliza el campo de visión (1°) para recoger la mayor cantidad de luz emitida por la fuente y tener así la mejor relación señal-ruido, ya que el objetivo es determinar la distribución angular.

Una vez alineado el sistema de detección y posicionado el LED, se realizaron medidas de θ entre 0° y 40° en pasos de 1° y para ϕ entre 0° y 360° en pasos de 45° , lo que se realizó rotando el LED alrededor de su eje mecánico. Para cada medida se registró el espectro de emisión correspondiente. En las Figs. 4 y 5 se muestran las representaciones en 3D y polares de la radiancia relativa en función de los ángulos θ y ϕ a la longitud de onda LDO_{max} , normalizados al valor máximo, para LEDs de tipo LED(a) y LED(b), respectivamente.

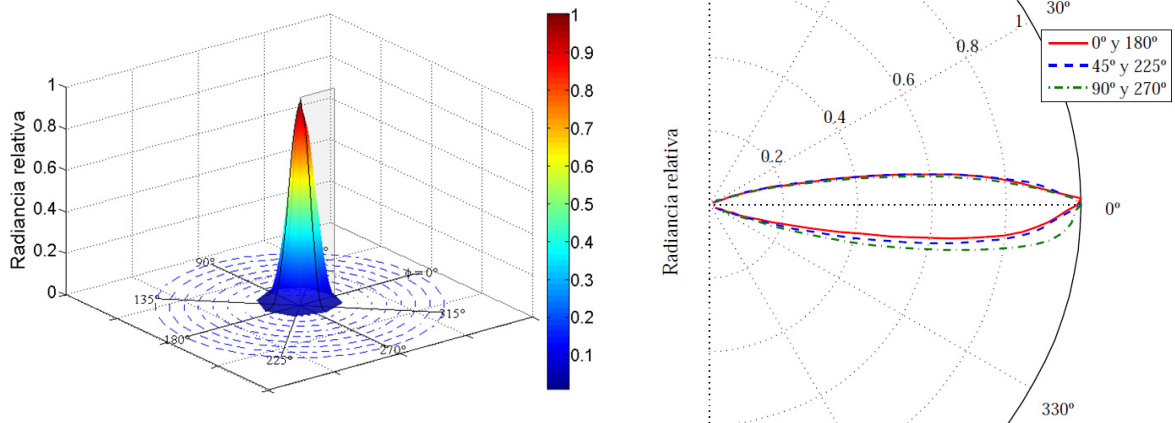


Fig.4. Diagrama 3D y representación polar de la radiancia relativa para la longitud de onda de máxima emisión ($LDO_{max}=460$ nm) de un LED(a) vista desde 3 planos ($0^\circ, 45^\circ$ y 90°).

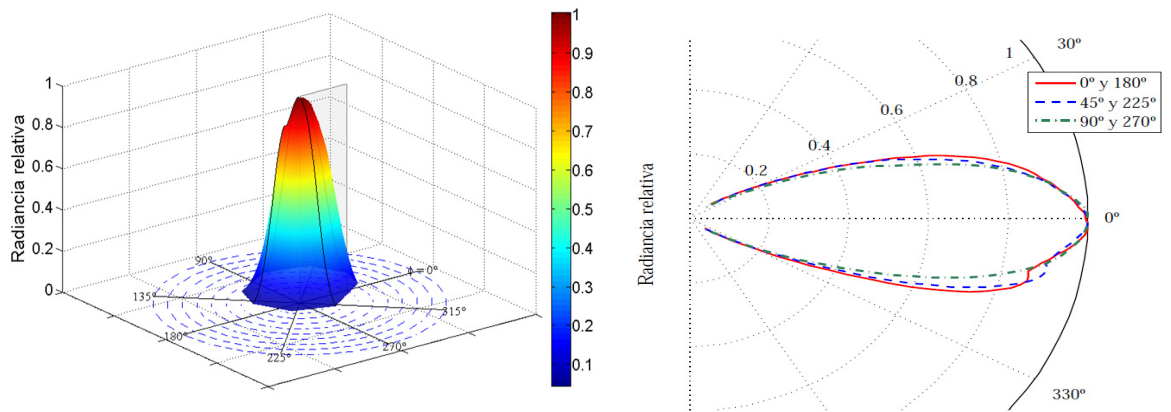


Fig. 5. Diagrama 3D y representación polar de la radiancia relativa para la longitud de onda de máxima emisión ($LDO_{max}=457$ nm) de un LED(b) vista desde 3 planos ($0^\circ, 45^\circ$ y 90°)

Se observa falta de simetría en los perfiles alrededor del máximo valor de la radiancia en los planos de 45° y 90° para el LED(a), mientras que la asimetría se hace presente en los planos 0° y 45° para el LED(b). Debemos considerar que en algunos casos el eje óptico de la distribución de la emisión de los LEDs no coincide con su eje mecánico, lo que podría generar errores en el alineamiento, por lo que la CIE [1] recomienda alinear respecto al eje mecánico del LED. Nosotros alineamos los LEDs siguiendo estas recomendaciones, por lo que podemos atribuir la falta de simetría de los perfiles a las características propias de la emisión.

Debido a aberraciones cromáticas de la lente del LED y las propiedades físicas del luminóforo es posible observar variaciones de la distribución espectral relativa en función del

ángulo en LEDs blancos y azules. Este efecto puede estimarse con más claridad a partir de las características colorimétricas. Con los datos obtenidos del espectro de emisión para cada ángulo de observación, se han calculado las coordenadas de color y la temperatura de color correlacionada TCC para cada LED. En la Fig. 6 se muestran las curvas correspondientes a la temperatura de color correlacionada en función del ángulo de observación correspondientes a las medidas realizadas en un LED(a) y un LED(b), en el plano de observación $\phi=0^\circ$.

En el LED(a) se observa un comportamiento asimétrico de la TCC con el ángulo de observación, mientras que para el LED(b) el comportamiento es más simétrico y la TCC disminuye alrededor del valor máximo, de modo

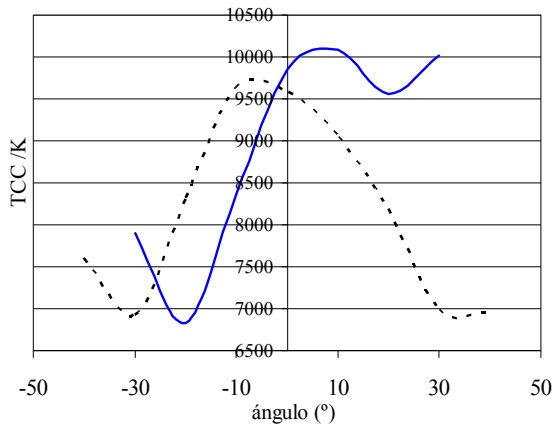


Fig. 6. Temperatura de color correlacionada en función del ángulo de observación. LED(a) línea continua y LED(b) línea discontinua..

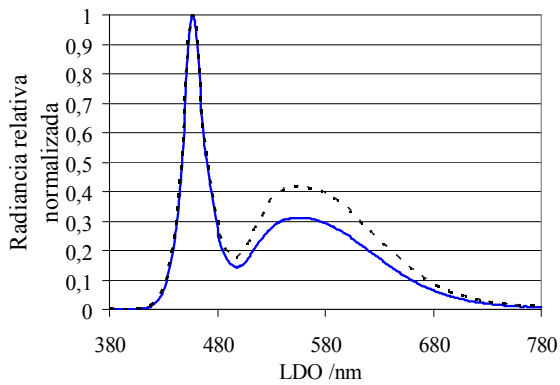


Fig. 7. Espectros de emisión normalizados correspondientes a un LED(a) y ángulos de observación de 0° (línea continua) y 30° (línea discontinua).

que la emisión tiende más hacia los rojos a medida que aumenta el ángulo de observación. Ese comportamiento se evidencia en el cambio de la relación entre los máximos relativos del pico máximo del espectro de emisión y la fluorescencia. Al aumentar el ángulo de visión, aumenta la fluorescencia, tal y como se muestra en la Fig. 7.

4. Conclusiones

Hemos adaptado y optimizado el sistema de posicionamiento del goniómetro espectrofotómetro español (GEFE) para la caracterización de la radiación angular de LEDs.

Hemos realizado medidas de distribución angular para LEDs blancos de alta luminosidad a diferentes ángulos de divergencia, y diferentes planos de observación, comprobando la eficacia del sistema de medida.

Hemos realizado un protocolo de medida que nos permitirá realizar estudios sistemáticos para otros tipos de LEDs, específicamente LEDs blancos de alta potencia.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Plan Nacional I+D+i mediante la subvención FIS2010-19756 y el programa JAE del CSIC a través de los contratos JAE-DOC.

Agradecemos también la colaboración del Dr. Erik Benkler del PTB y Rigoberto Chil por su ayuda con las aplicaciones informáticas.