



Generación de iluminantes estándar a partir de una fuente de luz espectral y sintonizable basada en leds.

*Generation of standard illuminants with an led-based spectrally tuneable light source.*

**Burgos Fernández, Francisco Javier** (1); Perales Romero, Esther (2); Herrera Ramírez, Jorge A., (1); Vilaseca Ricart, Meritxell (1); Martínez-Verdú, Francisco Miguel (2); Pujol Ramo, Jaume (1).

(1) Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes, Universitat Politècnica de Catalunya.

(2) Grupo de Visión y Color, Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y Tecnologías, Universidad de Alicante.

francisco.javier.burgos@cd6.upc.edu

## INTRODUCCIÓN

La tecnología LED se está convirtiendo en una de las primeras opciones cuando se plantea el diseño de una fuente de luz. Las razones de su gran auge son ampliamente conocidas: tecnología económica, eficiente, ciclo de vida largo y se encuentra en constante evolución. Como consecuencia de todos estos motivos, la iluminación LED es una de las ramas de la óptica con mayores expectativas de crecimiento. Todo esto ha llevado al empleo de diodos emisores de luz en numerosos sectores, desde el crecimiento de cultivos [1] a la iluminación multiplexada en sistemas multiespectrales [2] pasando por su uso en equipos médicos [3].

Sin embargo, el trabajo aquí expuesto está centrado en una de las aplicaciones más versátiles: la generación de iluminantes estándar de la CIE. La gran ventaja de la generación de iluminantes con una fuente de luz basada en LEDs reside en el hecho de poder reproducir varios iluminantes con una única fuente. Por lo general, las investigaciones llevadas a cabo hasta el momento emplean métodos de minimización para ajustar lo máximo posible el espectro generado por la suma de los diferentes LEDs al espectro del iluminante [2][4]. Estos métodos empezaron a utilizarse como alternativa a los largos procesos de convergencia [5].

En definitiva, el modelo de generación de iluminantes aquí planteado forma parte de los procesos de minimización pero, en este caso, se parte de una fuente de luz con 31 canales en el rango visible (400-700nm), más de los habitualmente encontrados en este tipo de dispositivos. Por esa razón, se espera alcanzar un mejor ajuste que el que se ha conseguido en otros trabajos.

## MATERIALES Y MÉTODO

El primer prototipo de la fuente de luz consta de 62 LEDs, dos por cada canal. Se escogió este número para evaluar el comportamiento de cada uno de estos antes de incorporarlos en el prototipo definitivo. Las longitudes de onda de pico de los diodos se encuentran entre los 400 y 700nm, con intervalo medio de 10,06nm y un promedio de la anchura a media altura de 22,51nm (Figura 1). Esta caracterización se realizó mediante el tele-espectroradiómetro PR-655 de Photo Research, Inc.

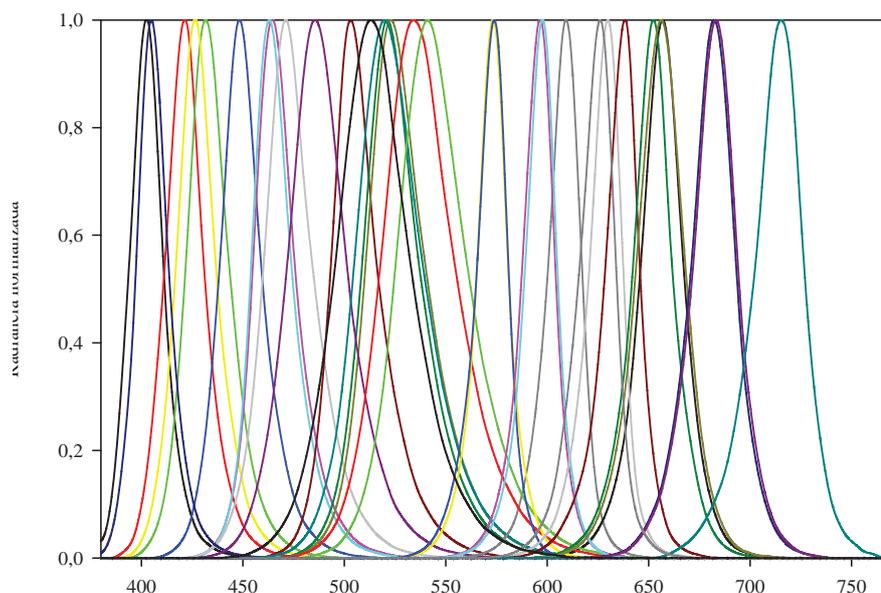


Figura 1. Distribución espectral de los LEDs considerando su radiancia espectral normalizada.

Tras dicha evaluación, se procedió al desarrollo del modelo matemático que permitiría conocer la intensidad necesaria de cada LED para reconstruir los siguientes iluminantes estándar: D65, D50, A, E, F2, F11 y HP1. El resultado de esta técnica debe ser una matriz de ponderación que relacione el espectro del iluminante estándar con el conjunto de los espectros de los LEDs de la fuente, ambos expresados en valores de radiancia:

$$I_m = p_n L_{m,n} , \tag{Ec. 1}$$

donde  $I_m$  representa el espectro del iluminante a reconstruir,  $L_{m,n}$  contiene los espectros de los 31 LEDs distribuidos en columnas y  $p_n$  es la matriz de ponderación que contiene los pesos de cada LED para igualar al iluminante escogido. La resolución espectral que se fijó para la reconstrucción fue de 1nm, de modo que el modelo desarrollado deberá simular el espectro de cada iluminante para 301 longitudes de onda distintas (de 400 a 700nm en pasos de 1nm) y a partir de 31 canales ( $n$ ).

En primer lugar, la ecuación 1 fue resuelta teóricamente mediante la aplicación de las ecuaciones normales o de Gaus debido a que  $L_{m,n}$  no es una matriz cuadrada:

$$p = (L^T L)^{-1} L^T I , \tag{Ec. 2}$$

Puesto que este método se limita a resolver el sistema de ecuaciones sin valorar las restricciones experimentales, como que el peso de un LED no puede ser negativo, se aplicó un segundo método que sí lo consideraba. Tal y como se ha introducido, este segundo método se engloba dentro de las rutinas de minimización; concretamente, se empleó la función *fmincon* del programa Matlab 7.11. Esta función es una rutina de minimización cuyo objetivo es minimizar la distancia entre el espectro objetivo y el generado por los LEDs. Por tanto, la función objetivo a minimizar fue:

$$f = \sum_{i=400}^{700} (SPD_{65_i} - SPD_{LEDs_i})^2$$

Gracias a esta segunda técnica se obtuvieron valores de ponderación positivos dentro del rango [0,1].

La valoración cuantitativa de las reconstrucciones se realizó mediante el cálculo del coeficiente de bondad de ajuste (*Goodness of Fit Coefficient*, GFC), de la raíz del error cuadrático medio (*Root-Mean-Square Error*, RMSE), de la temperatura correlacionada de color (TCC), del rendimiento de color (Ra) y de las coordenadas cromáticas CIE-xy.

## RESULTADOS

En la Figura 2 aparece la comparativa entre los espectros generados a partir de ambos métodos y el espectro real para cada uno de los iluminantes seleccionados. Además, en la Tabla 1 se encuentran los valores de TCC, Ra, CIE-xy, GFC y RMSE.

Como se observa en la Figura 2 y en la Tabla 1, el modelo teórico ofrece reconstrucciones más precisas tanto a nivel de ajuste como colorimétrico, sin embargo no son experimentalmente viables. A pesar de que el ajuste mediante el método de mínimos cuadrados no negativos no es tan exacto, los pesos hallados para cada uno de los LEDs son totalmente transferibles a la fuente de luz. Específicamente, en ambos métodos, las mejores reconstrucciones se dan para los iluminantes D65, D50, A y E.

Para todos los iluminantes, el rango del espectro donde el ajuste es menor es el comprendido entre 550 y 600nm, el conocido como hueco verde (*green gap*). Este fenómeno se debe a que la tecnología LED para ese intervalo aún no es capaz de ofrecer valores de radiancia semejantes a los encontrados en otras regiones espectrales.

(Ec. 3)

Generación de iluminantes estándar a partir de una fuente de luz espectral y sintonizable basada en leds.

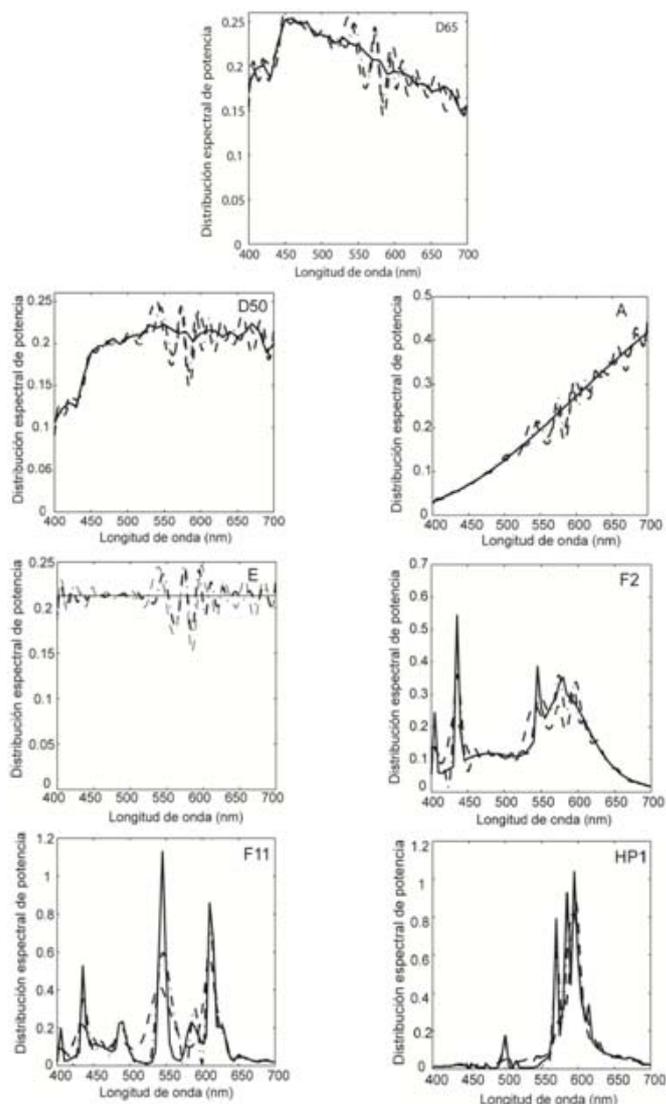


Figura 2. Comparativa de los espectros de los iluminantes estándar D65, D50, A, E, F2, F11 y HP1 (línea de trazos) y los espectros reconstruidos mediante el método teórico (línea de puntos) y el experimental (línea sólida).

	Iluminantes	TCC (K)	Ra	x	y	GFC	RMSE
Estándares de la CIE	D65	6505	99,55	0,3127	0,3293	-	-
	D50	5008	99,56	0,3457	0,3585	-	-
	A	2864	99,47	0,4472	0,4077	-	-
	E	5457	95,31	0,3333	0,3338	-	-
	F2	4230	64	0,3721	0,3751	-	-
	F11	4000	83	0,3805	0,3769	-	-
	HP1	1959	8	0,533	0,415	-	-

Método teórico	D65	6557	99.06	0.3118	0.3286	0.9984	2.6466
	D50	5037	98.90	0.3447	0.3581	0.9981	2.7750
	A	2867	98.66	0.4467	0.4072	0.9980	3.4059
	E	5496	94.39	0.3325	0.3331	0.9983	2.7809
	F2	4261	63.48	0.3708	0.3751	0.9846	7.0262
	F11	4027	77.77	0.3808	0.3819	0.9254	21.0611
	HP1	1936	8.79	0.5418	0.4224	0.9754	11.8635
Método experimental	D65	6615	98.32	0.3108	0.3281	0.9966	3.8852
	D50	5070	98	0.3438	0.3576	0.9958	4.1065
	A	2875	97.31	0.4461	0.4069	0.9957	4.9892
	E	5541	93.46	0.3315	0.3325	0.9964	4.0655
	F2	4423	70.07	0.3649	0.3726	0.9543	12.0390
	F11	4259	83.35	0.3749	0.3934	0.8323	30.8079
	HP1	1940	23.47	0.5398	0.4206	0.9273	20.3312

Tabla 1. Parámetros TCC, Ra, coordenadas cromáticas CIE-xy, GFC y RMSE.

## CONCLUSIONES

En síntesis, se ha desarrollado una rutina de minimización capaz de reproducir el espectro de iluminantes estándar mediante una fuente de luz espectral y sintonizable basada en LEDs pero se debe continuar investigando para conseguir un mayor nivel de ajuste. Además, se intentarán localizar e implementar nuevos LEDs sintonizables espectralmente en la región espectral de 500-600nm, para aumentar el muestreo espectral en esta zona. En consecuencia, se conseguirán mejorar las prestaciones del algoritmo, el cual se considera robusto y aplicable a cualquier conjunto de fuentes de luz cuasi-monocromáticas (LEDs o cualquier otra tecnología futura).

## AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Economía y Competitividad por la concesión del proyecto coordinado “Nuevos desarrollos en óptica visual, visión y tecnología del color” (DPI2011-30090-C02), y de la beca FPI BES-2012-053080. Fco. Javier Burgos agradece también a la Generalitat de Catalunya la concesión de una beca predoctoral de formación de investigadores.

## REFERENCIAS

- [1] K.M. Folta, L.L. Koss, R. McMorrow, H.-H. Kim, J.D. Kenitz, R. Wheeler, J.C. Sager: “Design and fabrication of adjustable red-green-blue LED light arrays for plant research”, *BMC plant biology*, 5, 17 (2005).
- [2] J. Park, M. Lee, M.D. Grossberg, S.K. Nayar, “Multispectral Imaging Using Multiplexed Illumination”, *Proc, IEEE 11th International Conference on Computer Vision*, 1-8 (2009).

Generación de iluminantes estándar a partir de una fuente de luz espectral y sintonizable basada en leds.

- [3] N.L. Everdell, I.B. Styles, E. Claridge, J.C. Hebden, A.S. Calcagni, "Multispectral Imaging of the Ocular Fundus using LED Illumination", *Proc, SPIE Novel Optical Instrumentation for Biomedical Applications IV*, 73711C-1-73711C-6 (2009).
- [4] M. Mackiewicz, S. Crichton, S. Newsome, R. Gazerro, G.D. Finlayson, A. Hurlbert, "Spectrally tunable LED illuminator for vision research", *Proc, Computer Graphics, Imaging and Visualization 2012*, 372-377 (2012).
- [5] I. Fryc, S.W. Brown, Y. Ohno, "Spectral matching with an LED-based spectrally tunable light source", *Proc, SPIE*, 5941, 59411I-1-59411I-9 (2005).