



Evaluación de TCC de fuentes LED mediante la reconstrucción de su espectro electromagnético empleando un SoCy sensor de 8 canales

TCC evaluation of LED sources by reconstructing their electromagnetic spectrum using an 8-channel SoC and sensor



Francisco Espín¹, Eduardo Manzano²,
Carlos Velásquez³

¹ Instituto de Investigación Geológico y Energético

Universidad Nacional de Tucumán, Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión

² Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.

Av. Independencia 1800 – (T4002BLR) San Miguel de Tucumán – Tucumán - Argentina

³ Universidad Central del Ecuador, Modalidad en Línea.

Instituto de Investigación Geológico y Energético

Universidad de Alicante, Departamento de Matemática Aplicada.

francisco.espin@geoenergia.gob.ec

DOI: <https://doi.org/10.26871/killkanatecnica.v7i1.1466>



Resumen

El presente trabajo expone la implementación de un colorímetro a partir del sensor AS7341 de 8 canales en conjunto con la placa ESP32. Con la lectura de los ocho canales se emplea la interpolación cúbica de Hermite, interpolación segmentaria cúbica e interpolación Akima para reconstruir el espectro electromagnético en un intervalo de 360nm a 830nm con pasos de 1nm, para fuentes LED con temperatura de color correlacionada (TCC) declaradas por fábrica de 2700K, 3000K, 4000K y 5000K. El colorímetro portátil UPRTEK, es empleado para comparar los resultados entre los espectros electromagnéticos medidos y los interpolados con cada técnica descrita. A partir de los espectros interpolados, se realiza el cálculo de coordenadas cromáticas x, y, u, v. Posteriormente se obtiene la TCC. Los resultados muestran que la TCC obtenida por las diferentes técnicas de interpolación se encuentran dentro de los rangos permitidos para los 2700K, mientras que para 3000K solo dos técnicas se encuentran dentro de los rangos y para las demás temperaturas todas las técnicas se encuentran fuera de los rangos.

Palabras clave: TCC, Espectro electromagnético, Colorímetro, LED, Interpolación

Abstract

The present work presents the implementation of a colorimeter from the 8-channel AS7341 sensor in conjunction with the ESP32 board. With the reading of the eight channels, Hermite's cubic interpolation, cubic segmental interpolation, and Akima interpolation are used to reconstruct the electromagnetic spectrum in a range of 360nm to 830nm with steps of 1nm, for LED sources with correlated color temperature (TCC) declared by the factory of 2700K, 3000K, 4000K, and 5000K. The UPRTEK portable colorimeter is used to compare the results between the measured electromagnetic spectra and those interpolated with each described technique. From the interpolated spectra, the calculation of chromatic coordinates x, y, u, v is performed, and then is the TCC is obtained. The results show that the TCC obtained by the different interpolation techniques are within the allowed ranges for 2700K, while for 3000K only two techniques are within the ranges. In the other temperatures, all the techniques are outside the ranges.

Keywords: CCT, Electromagnetic Spectrum, Colorimeter, LED, Interpolation

Introducción

Se estima que la energía eléctrica generada destinada a iluminación se encuentra alrededor del 22% [1]. Existen normativas y regulaciones que determinan la cantidad mínima requerida para iluminar un espacio, sea interior o exterior. Estas mediciones pueden ser realizadas por iluminancímetros, comúnmente denominados luxómetros. Con la masificación de la tecnología LED se añaden parámetros adicionales de medición, siendo la temperatura de color correlacionada (TCC) uno de los más importantes ya que está relacionado directamente con la eficacia[2] y calidad de las fuentes LED. Una de las ventajas de la tecnología LED es tener la capacidad de mantener el flujo luminoso inicial por mayor tiempo, por lo que podría ser empleada en infinidad de maneras, entre ellas como fuente de radiación para conocer propiedades de transmisión o reflexión de materiales. Otra de las aplicaciones puede centrarse en obtener la iluminancia a partir del espectro electromagnético de la fuente.

De manera general, la ecuación que relaciona una cantidad radiométrica dada $X_{e,\lambda}(\lambda)$ a su correspondiente cantidad fotométrica X_v es dada como[3]:

$$X_v = K_m \int_{\lambda} X_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Donde $K_m = 683.002 \text{ [lm} \cdot \text{W}^{-1}]$ [4] es un factor de escalamiento y es conocido como la máxima eficacia luminosa espectral establecida para condiciones fotópicas.

Como se observa en la ecuación previa, cualquier fotométrica fotométrica tiene relación directa con la curva $V(\lambda)$, por tanto los equipos deben acercarse lo más posible a la $V(\lambda)$, convirtiendo a este en uno de los parámetros que nos permite evaluar la calidad de los equipos fotométricos. En la normativa ISO/CIE S [5] lo denomina factor f_1 , el cual

describe la desviación de la responsividad espectral relativa de un fotómetro $S_{rel}(\lambda)$ con respecto a la función de eficiencia luminosa fotópica $V(\lambda)$. En estudios se estima un rango entre 0.6% a 9% [6] para los valores de f_1 , mientras que en [7] el rango se encuentra entre 2.6% al 36.4%. La variación del f_1 ocasiona que exista una variabilidad en las magnitudes fotométricas, por este motivo, la mejor aproximación de los valores es conocer el espectro radiante y en conjunto con la curva teórica $V(\lambda)$, realizar los cálculos correspondientes para la magnitud de interés. La medición de $X_{e,\lambda}(\lambda)$ por lo general se la realiza con espectrómetros o espectroradiómetros que permiten descomponer la radiación incidente, por lo general en pasos de 1nm o 5nm. Debido a esta precisión, se tratan de equipos delicados y en ocasiones complejo de conseguir.

Por otra parte, el desarrollo de los sistemas en chip (SoC) es cada vez más frecuente en proyectos de investigación o desarrollo [8]–[10] ya que permiten la incorporación de sensores, facilitando mediciones de distintas magnitudes. El presente trabajo busca analizar las mediciones de TCC obtenidas a partir del sensor AS7341 de ocho canales que se encuentra montado en una placa ESP 32.

Con el espectro de una fuente de luz, se calcula los valores triestímulos:

$$X = k \int_{360nm}^{830nm} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Y = k \int_{360nm}^{830nm} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$Z = k \int_{360nm}^{830nm} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Donde las funciones de emparejamiento de color (CMF) $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ se encuentran definidas por la CIE [11] y Buro Internacional de Pesas

y Medidas [12]. La función ϕ_λ es el estímulo de color vista por el observador. Aplicando las recomendaciones [11] [13] la integración puede llevarse a cabo como una sumatoria, para el presente estudio, con intervalo de $\Delta\lambda=1nm$, por lo que se puede emplear:

$$X = k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \quad (5)$$

$$Y = k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \quad (6)$$

$$Z = k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \quad (7)$$

La constante k es calculada considerando la distribución espectral relativa $S(\lambda)$ de la fuente de luz.

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda} \quad (8)$$

Con los valores X, Y, Z , las coordenadas cromáticas x, y, z son calculadas como:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (9)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (10)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (11)$$

A partir de estos valores se pueden obtener las coordenadas cromáticas u, v y considerando que $x+y+z=1$ se puede conocer w :

$$u = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad (12)$$

$$v = \frac{6Y}{X+15Y+3Z} \quad (13)$$

Para encontrar las coordenadas cromáticas (u, v) en base a la TCC, se utiliza la aproximación indicada en [14].

$$u(T) = \frac{0.860117757 + 1.54118254x10^{-4}T + 1.28641212x10^{-7}T^2}{1 + 8.42420235x10^{-4}T + 7.08145163x10^{-7}T^2} \quad (14)$$

$$v(T) = \frac{0.317398726 + 4.22806245x10^{-5}T + 4.20481691x10^{-8}T^2}{1 - 2.89741816x10^{-5}T + 1.61456053x10^{-7}T^2} \quad (15)$$

Mediante la programación, a partir de $u(T)$ $v(T)$ se obtienen las coordenadas cromáticas u, v sobre el locus Planckiano por cada grado kelvin desde 1000K hasta 10000K.

Metodología

Se obtuvo el espectro electromagnético de fuentes LED de TCC de 2700K, 3000K, 4000K y 5000K mediante el sensor AS7341, que consta de los 8 canales distribuidos conforme la Tabla 1.

Tabla 1. Canales del sensor AS7341

Canal	Longitud de onda central típica [nm]
F1	415
F2	445
F3	480
F4	515
F5	555
F6	590
F7	630
F8	680

Con la finalidad de obtener mayores puntos para la interpolación, se agregan dos longitudes de onda en 730nm y 860nm con valores de cero. Esto es posible, ya que las curvas de sensibilidad espectral definidas por CIE, son prácticamente nulas en 730nm y 860nm, lo que implica que, al realizar la convolución, en estos puntos se asume cero.

En base a los resultados de los ocho canales más los dos adicionales, se procede a utilizar las técnicas de interpolación por partes mediante polinomio de tercer grado.

La interpolación con polinomio cúbico por partes (spline) consiste en ajustar la función a la forma:

$$S(x) = \begin{cases} S_1(x) & x_1 \leq x < x_2 \\ S_2(x) & x_2 \leq x < x_3 \\ \vdots & \vdots \\ S_{n-1}(x) & x_{n-1} \leq x < x_n \end{cases} \quad (16)$$

Donde s_i es un polinomio de tercer grado definido por:

$$s_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad (17)$$

Para $i = 1, 2, \dots, n-1$

$$s'_i(x) = 3a_i(x - x_i)^2 + 2b_i(x - x_i) + c_i \quad (18)$$

$$s''_i(x) = 6a_i(x - x_i) + 2b_i \quad (19)$$

La función debe cumplir con la condición de continuidad en todo el intervalo de manera que en cada sub función, sea estable en los puntos de los datos obtenidos por cada canal del sensor:

$$s_i(x_i) = s_{i-1}(x_i) \quad (20)$$

$$s'_i(x_i) = s'_{i-1}(x_i) \quad (21)$$

$$s''_i(x_i) = s''_{i+1}(x_i) \quad (22)$$

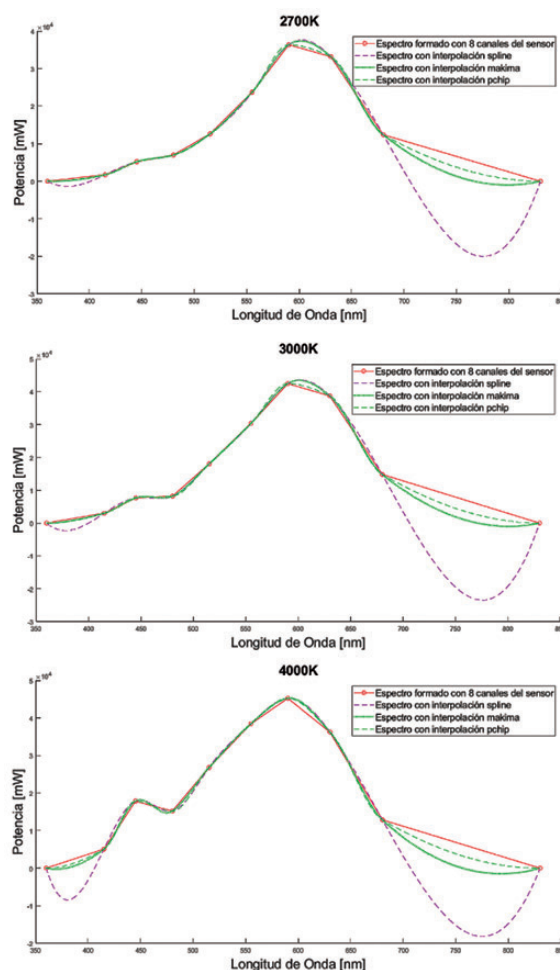
En base a las condiciones expuestas y las de frontera, el programa desarrollado calcula el polinomio que se ajuste a las mediciones de los ocho canales e interpola para obtener los 471 valores correspondientes al espectro de la fuente de luz que va de 380nm a 860nm con pasos de 1nm. Mayores detalles en la interpolación con spline se encuentran en [15] [16].

Otra forma de reconstruir el espectro electromagnético de la fuente LED es mediante la interpolación cúbica Hermite (pchip), es semejante al spline, pero además de interpolar los valores de $S(x)$, también interpola los valores de $S'(x)$, consecuentemente para cada x_i , la pendiente del polinomio de grado 3 deberá coincidir con la pendiente de la función S en x_i .

Adicionalmente se plantea completar el espectro electromagnético mediante la interpolación

cúbica de Hermite con Akima modificada (makima). El método supone que la pendiente de la curva en cada punto dado está determinada localmente por las coordenadas de varios puntos, con el punto en cuestión como punto central y dos puntos a cada lado del mismo. Un polinomio de grado tres que representa una porción de la curva entre un par de puntos dados está determinado por las coordenadas de y las pendientes en los dos puntos [17]. Con esta metodología se producen menos ondulaciones que la interpolación con polinomio cúbico por partes (spline), pero no aplanan de forma tan pronunciada como interpolación cúbica Hermite (pchip).

La Figura 1 presenta la reconstrucción de los espectros de fuentes LED empleando las técnicas descritas, el espectro es formado con 471 pasos en el rango de 360nm a 830nm.



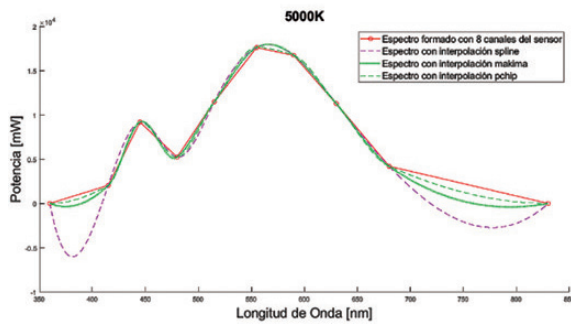


Figura 1. Valores medidos por el sensor AS7341 y espectros interpolados con distintas técnicas

En la Figura 1 se pueden observar en círculos rojos, los valores puntuales medidos con el sensor AS7341 y se incluyen los valores iniciales y finales asignados con un valor de cero. Empleando las técnicas de interpolación se pueden presentar valores negativos, esto no tiene un significado físico, por lo que el programa desarrollado, los convierte en cero. La figura 2 presenta los espectros corregidos, asignando a cero a los valores negativos.

Los valores interpolados a partir de la lectura de los ocho canales, son comparados con los medidos por el colorímetro UPRTEK MK350N PLUS. Este equipo cuenta con el rango de detección desde 380nm a 780nm, con pasos de 1nm y entrega entre otros, el espectro electromagnético así como las coordenadas cromáticas x, y y u', v'.

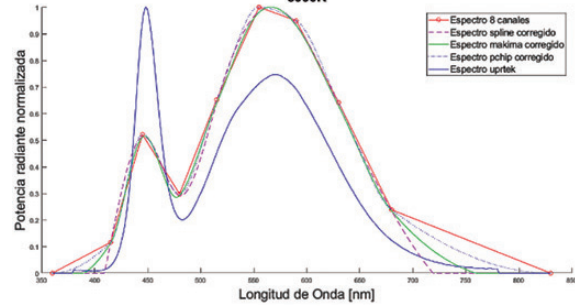
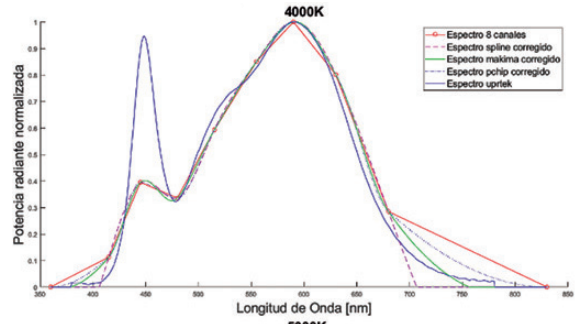
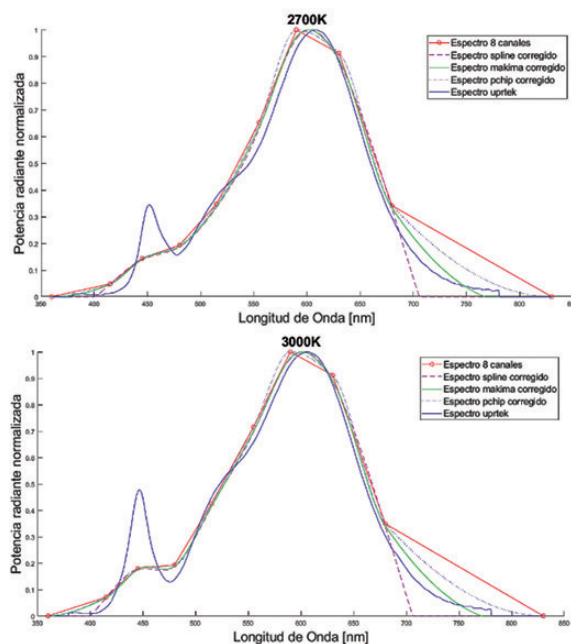


Figura 2. Resultados de interpolaciones con escalamiento de valores negativos

A partir de la reconstrucción del espectro, se emplean las ecuaciones descritas previamente para calcular la TCC de cada fuente LED considerada, los resultados de coordenadas cromáticas y TCC se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Coordenadas cromáticas de mediciones y a partir de las distintas interpolaciones.

2700K					
	x	y	u	v	TCC
spline	0,47347388	0,428645744	0,263157961	0,357363557	2653
makima	0,472606882	0,429641407	0,262177651	0,35751397	2671
Pchip	0,471328079	0,43075501	0,260892184	0,357650925	2696
upr tek	0,461767566	0,412662148	0,262800561	0,352280624	2689
3000K					
	x	y	u	v	TCC
spline	0,459399127	0,431467753	0,253153795	0,356643143	2864
makima	0,458827665	0,432142789	0,252517334	0,356746835	2877
Pchip	0,457540079	0,432473817	0,251582066	0,356698772	2898
upr tek	0,441100278	0,407583915	0,251740597	0,348918681	2959
4000K					
	x	y	u	v	TCC
spline	0,406816788	0,411846628	0,228275405	0,346646667	3628
makima	0,407424456	0,413728685	0,227933103	0,347189994	3629
Pchip	0,407035258	0,413303428	0,227853186	0,347043043	3634
upr tek	0,376632085	0,375250176	0,223198049	0,333568662	4095
5000K					
	x	y	u	v	TCC
spline	0,378292823	0,41289662	0,210215998	0,344167811	4278
makima	0,379835831	0,415856794	0,210126580	0,345080264	4257
Pchip	0,379724111	0,415340587	0,210238391	0,344936762	4257
upr tek	0,344300231	0,357305444	0,208696376	0,324869161	5047

Por lo general los espectrómetros y espectroradiómetros son calibrados un espectro incandescente de TC de 2856K, por esta razón se procede a tomar franjas permisibles de variación de TCC

que se encuentran definidas en la NOM-031-2019 [18], ya que se encuentran establecidas para distintas TCC, entre ellas las declaradas por

el fabricante, es decir 2700K, 3000K, 4000K y 5000K, los límites para cada TCC se muestran en la Figura 3.

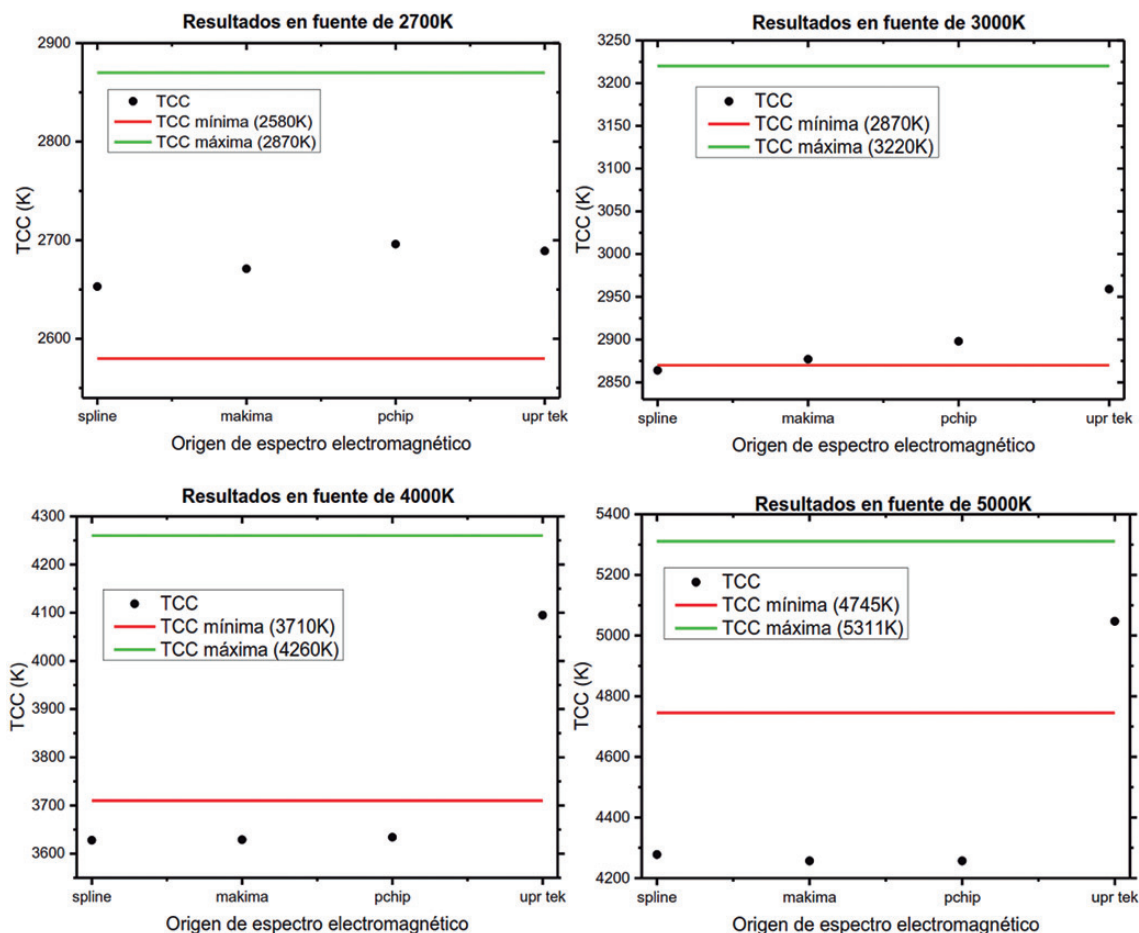


Figura 3. Valores de TCC obtenidos con distintas técnicas y límites permitidos.

Resultados y discusión

En base al sensor AS7341, se pueden reconstruir espectros electromagnéticos empleando distintas técnicas de interpolación, sin embargo, se muestra su efectividad a bajas TCC. En los 2700K no existe mayor error cuando se emplean las tres técnicas de interpolación analizadas, siendo la pchip, la que se muestra más próxima a la TCC medida por el UPRTEK. Cuando se trata de valores bajos de TCC todas las técnicas se encuentran dentro del intervalo permisible de variación.

En los 3000K, únicamente la técnica de spline se encuentra fuera del intervalo y como en el caso

previo, la interpolación pchip es la que se acerca más al valor medido.

Para los 4000K y 5000K, ninguna las técnicas son efectivas para la evaluación de la TCC, todos los resultados se encuentran fuera del rango permitido. Con las técnicas de interpolación del presente trabajo se “obliga” a que cada función dividida en el intervalo de cada canal, pase por su valor medido. Esto presenta el inconveniente que al tener lecturas 415nm y 445nm, los valores entre ellos no son considerados, ocasionando pérdida considerable al reconstruir el espectro. Este efecto tiene menor influencia en TCC más cálidas ya que existe una menor emisión en este intervalo, por el contra-

rio, con fuentes con TCC más frías la descarga es mayor en el rango de 415nm a 445nm y por lo tanto se pierde información en la recomposición espectral, por este motivo en TCC de 4000K y 5000K no es eficiente las técnicas analizadas. Es precisamente en el intervalo definido sobre los 415nm y bajo los 445nm en donde existe por lo general, un pico de emisión en los LED, esta pérdida de información influye en los cálculos de coordenadas cromáticas y TCC.

El tener un canal entre los 415nm y 445nm permitiría una mejor aproximación al espectro de fuentes con TCC frías, para mediciones específicas en TCC cálidas, se puede emplear el sensor AS7341, pero se debería realizar mayores estudios para verificar la respuesta ante reflexiones o absorciones. Al ser adecuada la reconstrucción del espectro electromagnético de fuentes con TCC de 2700K, se abre la posibilidad de calcular magnitudes fotométricas como iluminancia con el sensor AS7341, con la ventaja de efectuar la convolución el espectro de la fuente con la $V(\lambda)$ teórica, eliminando el error en las mediciones por desajuste espectral, aunque previamente se debe estudiar la linealidad del sensor con los valores leídos de potencia radiante.

Conclusiones

El sensor AS7341 es adecuado para evaluar fuentes de luz con TCC de 2700 con cualquiera de las técnicas de interpolación estudiadas, mientras que para los 3000K es preferible emplear pchip para la reconstrucción del espectro electromagnético, aunque makima es también aceptable. Por el contrario, no son aceptables los resultados para 4000K y 5000K con cualquiera de las técnicas.

Un sensor con los ocho canales dispuestos en las

longitudes de onda expuestas, pierde información en el intervalo de los azules, por lo cual no es posible aplicar la reconstrucción del espectro para fuentes con TCC frías.

Referencias

- [1] Navigant Consulting Inc., N. S. 500 1801 K Street, 20006 Washington DC, Inc. with XENERGY, and M. Burlington, “U.S. Lighting Market Characterization Volume I: National Lighting Inventory and Energy Consumption Estimate,” Washington DC, 2002. Accessed: Feb. 25, 2023. [Online]. Available: www.ntis.gov
- [2] N. T. Tran, F. G. Shi, and J. P. You, “Effect of Phosphor Particle Size on Luminous Efficacy of Phosphor-Converted White LED,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 22, pp. 5145–5150, Nov. 2009, doi: 10.1109/JLT.2009.2028087.
- [3] J. Zwinkels et al., “Mise en pratique for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the International System of Units (SI),” *Metrologia*, vol. 53, no. 3, pp. G1–G1, 2016, doi: 10.1088/0026-1394/53/3/g1.
- [4] C.I. de L’ECLAIRAGE, “THE BASIS OF PHYSICAL PHOTOMETRY”, 1983.
- [5] CIE Technical Committee 2-40, “ISO/CIE 19476:2014; Characterization of the performance of illuminance meters and luminance meters”, 2014. Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-cie:19476:ed-1:v1:en>
- [6] U. Krüger and P. Blattner, Spectral mismatch correction factor estimation for white led spectra based on the photometers f1’ value. 2013.
- [7] E. Rosas and A. Estrada-Hernández, “Effect of photometric detector spectral response quality on white LED spectral mismatch correction factors,” *Applied Optics*, Vol. 55, Issue 19, pp. 5267-5272, vol. 55, no. 19, pp. 5267–5272, Jul. 2016, doi: 10.1364/AO.55.005267.
- [8] H. de Man, “System-on-chip design: impact on education and research,” *IEEE Design and Test of Computers*, vol. 16, no. 3, pp. 11–19, Jul. 1999, doi: 10.1109/54.785820.
- [9] “Giga-Scale Integration System-On-A-Chip Design: Challenges and Noteworthy Solutions”, doi: 10.35940/ijrte.F7225.038620.
- [10] K. M. Lau et al., “Cost-effective and eco-friendly LED system-on-a-chip (SoC),” in 2013 10th China International Forum on Solid State Lighting (ChinaSSL), 2013, pp. 235–238. doi: 10.1109/SSLCHINA.2013.7177356.
- [11] International Commission on Illumination, “Colorimetry CIE 015:2018,” 2018.
- [12] Consultive Committee for Photometry and Radiometry, “Mise en pratique for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the SI”, 2021.
- [13] J. Schanda, “Colorimetry: Understanding the CIE System,” *Colorimetry: Understanding the CIE System*, pp. 1–459, Mar. 2007, doi: 10.1002/9780470175637.
- [14] M. Krystek, “An algorithm to calculate correlated colour temperature,” *Color Res Appl*, vol. 10, no. 1, pp. 38–40, Mar. 1985, doi: 10.1002/COL.5080100109.
- [15] S. McKinley and M. Levine, “Cubic Spline Interpolation,” *College of the Redwoods*, vol. 45, no. 1, pp. 1049–1060, 1998.
- [16] C. de Boor, *A Practical Guide to Splines - Revised Edition*, vol. 115. Springer, 2001.
- [17] H. Akima, “A New Method of Interpolation

and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures,” Journal of the ACM (JACM), vol. 17, no. 4, pp. 589–602, Oct. 1970, doi: 10.1145/321607.321609.

- [18] Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos, “NOM-031-ENER-2019, EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA LUMINARIOS CON LED PARA ILUMINACIÓN DE VIALIDADES Y ÁREAS EXTERIORES PÚBLICAS. ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA”, 2019. Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: https://www.Dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5612611

Recibido: 01 de marzo de 2023

Aceptado: 01 de abril de 2023