

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL ESPECTRO DE EMISIÓN DE LEDs DE USO COMERCIAL

A. Tapia Fraga¹, J. Alvarado de la Peña¹, C. I. Medel Ruiz¹, C. Soubervielle Montalvo², V. H. Méndez García², L. Zamora Peredo¹

¹) Universidad Politécnica de San Luis Potosí, Iturbide 140, Centro Histórico, 78000, San Luis Potosí, S. L. P., México

²) Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Álvaro Obregón 64, San Luis Potosí, S. L. P, México

Tel. (444) 8 12 63 67, ext. 228 y Fax. (444) 8 12 65 19
e-mail: luis.zamora@upslp.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta la caracterización óptica de lámparas comerciales de iluminación residencial basadas en diodos emisores de luz (LEDs) en donde se analiza la influencia que tiene la temperatura en el espectro de emisión. Se muestra la evolución en la intensidad y se estudia el comportamiento que tienen los espectros de emisión en función de la temperatura desde 303.15 K hasta 343.15 K para cuatro lámparas con diferentes espectros de emisión (longitud de onda central λ_c : 466 nm, 591 nm, 631 nm y 461–614 nm). Con este trabajo se pretende contribuir al desarrollo de la metrología de LEDs que cada vez es más necesaria debido a la inminente aplicación de estos dispositivos en sistemas de iluminación.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la invención de Thomas Alva Edison hasta la actualidad se han diseñado una gran variedad de lámparas con la finalidad de optimizar el proceso de generación de luz. Parámetros como: el tiempo de vida, generación de calor, costo, índice de reproducción cromática y principalmente la eficiencia luminosa han sido estudiados exhaustivamente por laboratorios de empresas especializadas, con el objetivo de encontrar un modelo en el cual se optimicen dichos parámetros.

En la actualidad, el tipo de lámparas con mayor aplicación en iluminación residencial son las lámparas fluorescentes, ya que son de las fuentes de luz con mayor eficiencia luminosa (~100 lm/W) que, como lo muestra la **tabla 1**, son superiores a las incandescentes (<40 lm/W) [1]. Las lámparas con mayor eficiencia son las de descarga, pero su campo de mayor aplicación está en la iluminación industrial (debido a su costo).

Por otra parte, desde los principios de los 90's en que Nakamura [2] logró diseñar un LED (del inglés: *light emitting diode*) que emitiera en la región del azul, se ha intentado sustituir las lámparas convencionales por ensambles de LEDs utilizando los colores primarios azul, verde y rojo para obtener luz blanca y, así, poder optimizar aún más los

procesos de generación de luz visible. Dentro de las ventajas más importantes que ofrecen los dispositivos basados en LEDs están:

- No generación de luz ultravioleta ni infrarroja
- Menores pérdidas de energía por calor
- Alto índice de reproducción cromática
- Mucho mayor tiempo de vida
- Eficiencia luminosa potencialmente mayor a las lámparas convencionales [3]

Desde el descubrimiento de NICHIA [4], en el que un LED azul se recubre con una película de fósforo y se obtiene luz blanca por efecto de fosforescencia, ha tomado mucha mayor importancia la iluminación de estado sólido (como se le conoce a la iluminación con LEDs). En países como Estados Unidos se han realizados estudios sobre los posibles ahorros de energía que se obtendrían con el impulso de este tipo de iluminación [3]. Por eso es que, dada la inminente iluminación de estado sólido, se hace cada vez más necesaria la metrología de este tipo de dispositivos.

En este trabajo se presenta el estudio de una serie de lámparas comerciales basadas en LEDs, en donde se muestran los efectos que tiene la temperatura en la intensidad luminosa y el espectro electromagnético de lámparas comerciales basadas en LEDs con λ_c en 466 nm, 591 nm, 631 nm y 461–614 nm.

Tipo de lámpara	Eficiencia (lm/W)
Incandescente	10 – 40
Fluorescente	~ 100
De Descarga	110 – 130
LEDs	~ 60

Tabla 1. Eficiencia luminosa de las principales lámparas utilizadas en iluminación residencial [3].

2. SISTEMA DE MEDICIÓN

En este trabajo se estudiaron cuatro lámparas comerciales basadas en LEDs de la marca Lumex. Las lámparas son conectadas directamente a la línea de corriente alterna (~120 V), para lo cual en su interior cuentan con un circuito de rectificación y regulación de la tensión eléctrica que permite el encendido de un ensamble de 12 LEDs.

Para las mediciones de los espectros electromagnéticos de las lámparas su luz se hizo pasar a través de un monocromador con la finalidad de descomponerla en sus diferentes longitudes de onda (λ) y se midió su intensidad con un fotodiodo patrón de silicio, ver **figura 1**. Para elevar la temperatura del arreglo de LEDs se utilizaron 2 lámparas de halógeno de 25 W de potencia dirigidas simétricamente hacia los LEDs. Para determinar la temperatura de los LEDs se utilizaron tres termistores: 2 colocados en la superficie de los LEDs en puntos opuestos de la lámpara y uno en contacto con la base donde se montan los LEDs y el circuito de rectificación y control de la tensión eléctrica. Para garantizar la uniformidad y estabilidad térmica durante el proceso de medición se registraron las temperaturas de los termistores mediante una tarjeta de adquisición de datos y se encontró que después de una hora aproximadamente se estabiliza el sistema, como lo muestra la **figura 2**.

Cabe mencionar que aun cuando la temperatura del laboratorio era de 298.15 K, en operación, la temperatura de la superficie de los LEDs alcanzaba 303.15 K (termistores T1 y T2) y la base donde se montan los LEDs y el circuito de rectificación llega hasta 311.15 K (termistor T3). Por lo cual las temperaturas señaladas en los espectros electromagnéticos indican la temperatura de la superficie de los LEDs.

3. RESULTADOS

La **figura 3** muestra los espectros de la lámpara con λ_c en 466 nm a las cuatro temperaturas señaladas. Se puede apreciar que la intensidad máxima disminuye notablemente conforme la temperatura se incrementa. Con la ayuda de un software especializado (Origin®) se calculó la intensidad máxima (I_{max}), la intensidad total (I_T , área bajo la curva) y la longitud de onda con intensidad máxima (λ_{max}). En la **figura 4** se presenta la derivada de los espectros, en donde se puede apreciar claramente a través de la intersección de las curvas con $Y=0$ en torno a 468 nm, el corrimiento de λ_{max} hacia longitudes de onda mayores debido al incremento de la temperatura.

La **tabla 2** muestra la variación con la temperatura de I_{max} respecto a la intensidad medida a 303.15 K. En ella se puede observar que la intensidad máxima se reduce hasta un 29% cuando la temperatura alcanza 348.15 K. Para el caso de I_T se observa una disminución menor (21 %) a 348.15 K.

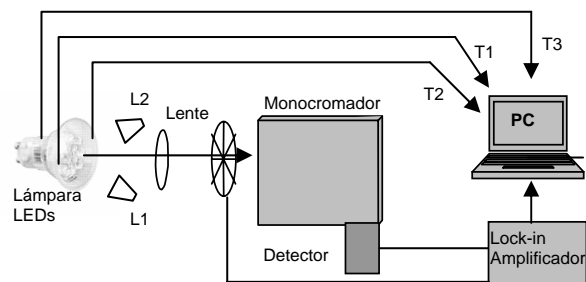


Fig. 1. Arreglo experimental: L1 y L2 son lámparas para calentamiento, T1, T2 y T3 son termistores.

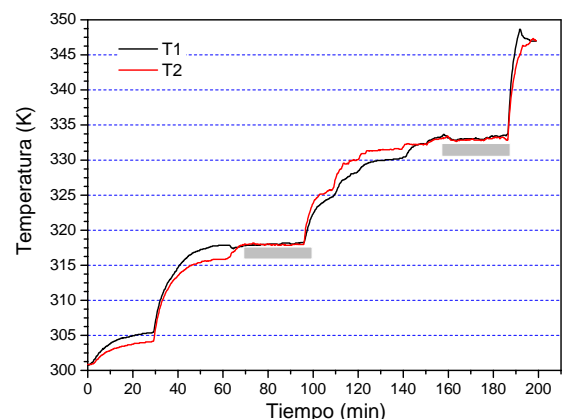


Fig. 2. Monitoreo de la temperatura de la superficie de los LEDs en función del tiempo, obtenidas con dos termistores.

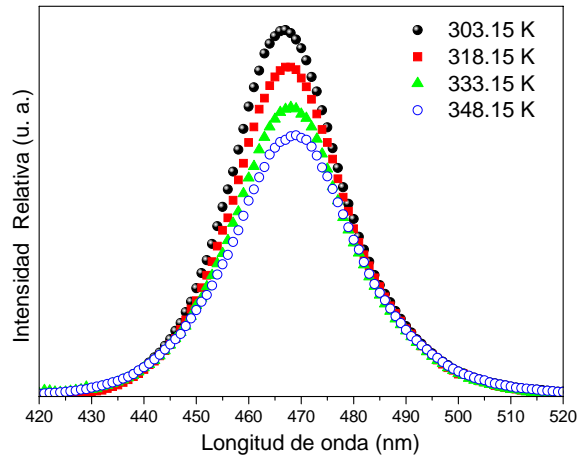


Fig. 3. Espectro electromagnético de la lámpara con λ_C en 466 nm para temperaturas de 303.15 K, 318.15 K, 333.15 K y 348.15 K.

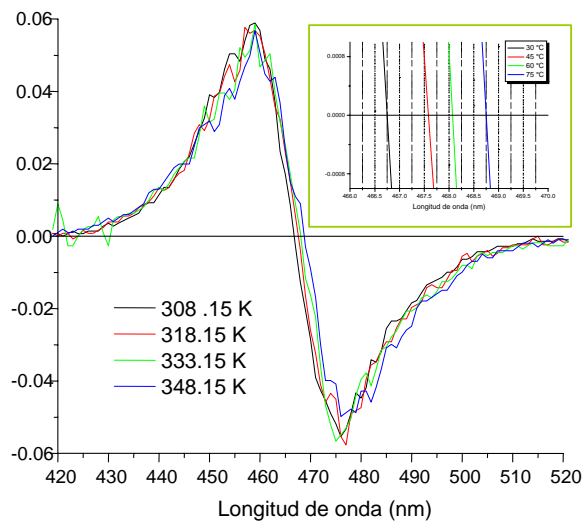


Fig. 4. Derivada de los espectros electromagnéticos de la lámpara con λ_C en 466 nm. El recuadro muestra un acercamiento para evidenciar el corrimiento.

Temp. (K)	I_{\max}	I_T	λ_{\max} (nm)
303.15	I	A	466.7
318.15	0.90 I	0.90 A	467.6
333.15	0.79 I	0.82 A	468.1
348.15	0.71 I	0.79 A	468.7

Tabla 2. Comparación de I_{\max} , I_T y λ_{\max} para 303.15 K, 318.15 K, 333.15 K y 348.15 K, con respecto de la intensidad a 303.15 K.

El mismo estudio se realizó para la lámpara con λ_C en 591 nm y, como lo muestra la **figura 5**, se encontró mayor dependencia con la temperatura tanto de I_{\max} como de la posición del máximo de intensidad en comparación con lo observado para la lámpara con λ_C en 466 nm.

La **tabla 3** muestra la relación de I_{\max} e I_T para las cuatro temperaturas, en donde se puede observar que la intensidad máxima decrece hasta un 58%, cuando la temperatura es de 348.15 K. Para el caso, la intensidad integrada decrece hasta 53%. Además, se encontró que el corrimiento del espectro (λ_{\max}) fue de hasta 6 nm con respecto al espectro de 303.15 K, lo cual puede ser explicable considerando el material semiconductor con el que fue fabricada la unión p-n responsable de la emisión de luz, algo que se revisará mas adelante.

Para el caso de la lámpara roja se da una situación similar a las anteriores lámparas, en este caso la atenuación de la intensidad luminosa es del orden del 36% para I_{\max} , y del 28% para I_T , como lo muestran la **figura 7** y la **tabla 4**. El corrimiento en este intervalo de temperatura es similar que al de la lámpara ámbar (6 nm).

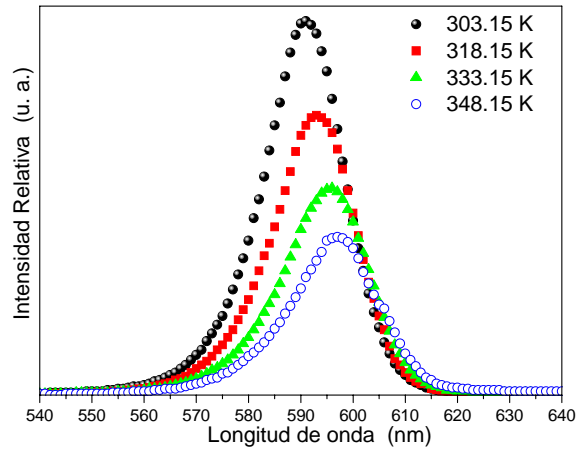


Fig. 5. Espectro electromagnético de la lámpara con λ_c en 591 nm para temperaturas de 303.15 K, 318.15 K, 333.15 K y 348.15 K.

Temp. (K)	I_{\max}	I_T	λ_{\max} (nm)
303.15	I	A	591
318.15	0.75 I	0.73A	593
333.15	0.55 I	0.59A	596
348.15	0.42 I	0.47A	597

Tabla 3. Comparación de I_{\max} , I_T y λ_{\max} para las cuatro temperaturas con respecto de la intensidad a 303.15 K.

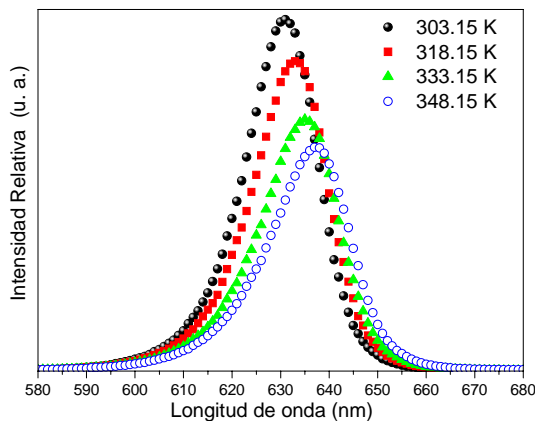


Fig. 7. Espectro electromagnético de la lámpara con λ_c en 631 nm para temperaturas de 303.15 K, 318.15 K, 333.15 K y 348.15 K.

Temp. (K)	I_{\max}	I_T	λ_{\max} (nm)
303.15	I	A	631
318.15	0.88 I	0.92 A	633
333.15	0.72 I	0.78 A	635
348.15	0.64I	0.72 A	637

Tabla 4. Comparación de I_{\max} , I_T y λ_{\max} de las cuatro temperaturas de estudio para la lámpara roja.

Finalmente, la **figura 8** muestra los espectros electromagnéticos de una lámpara de luz blanca, en donde se puede observar un pico (θ) intenso al rededor de 460 nm asociado al material de InGaN (responsable de la emisión en el azul) y una señal (ϕ) ensanchada que abarca la región desde 500 nm hasta 700 nm, la cual es producto de la película de fósforo que recubre el chip semiconductor. Para este caso, se registra una leve atenuación en la intensidad del espectro en su totalidad. Además, existe un pequeño corrimiento en longitud de onda sólo del pico localizado en torno a 560 nm (similar a la lámpara con λ_c en 466 nm). La luz producida por la fosforescencia sólo presenta la atenuación en su intensidad, ya que las propiedades del fósforo no son afectadas significativamente por la temperatura como para registrar un corrimiento.

La **tabla 5** muestra la comparación de la intensidad total, de I_{\max} para los picos y el corrimiento en función de la temperatura. Se observa que la intensidad máxima del pico θ decrece el 19% cuando la temperatura es de 348.15 K, mientras que el pico ϕ decrece hasta el 26%. Por su parte, la intensidad total disminuye el 21% con respecto de la intensidad a 303.15 K. Ahí se observa que el pico θ registra un corrimiento de 3 nm mientras que el pico ϕ se mantiene en 614 nm.

La atenuación que la temperatura origina en la intensidad luminosa en este tipo de lámparas puede ser asociada al incremento de la temperatura de la red en los semiconductores que forman la unión PN, haciendo más probable los procesos de recombinación no-radiativa donde se involucran fonones. La expresión matemática que describe la intensidad en función de la temperatura es la siguiente:

$$I = I_{T0} \exp(a\Delta T) \quad (1)$$

donde, I_{T_0} es la intensidad a la temperatura de referencia T_0 , $\Delta T = T - T_0$ y a es un parámetro de ajuste dependiente del material de los LEDs.

La **figura 9** muestra el comportamiento de I_{\max} en función de la temperatura, en donde se ajusta los puntos experimentales con la **ecuación 1** para determinar el valor de a . Se observa que la intensidad de la lámpara ámbar es la más afectada por la temperatura.

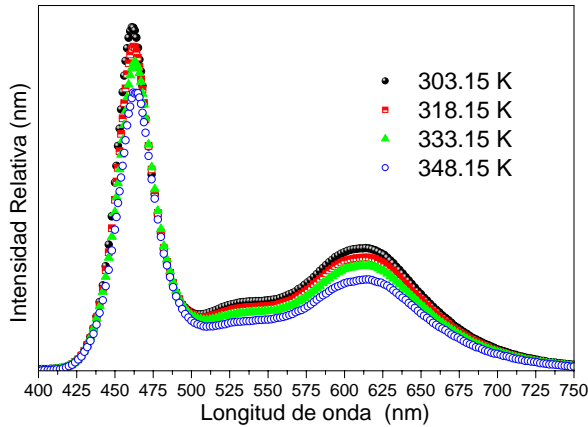


Fig. 8. Espectro electromagnético de la lámpara con λ_c en 461-614 nm para temperaturas de 303.15 K, 318.15 K, 333.15 K y 348.15 K.

Temp.	I_T	I_{\max}	λ_{\max} (nm)
303.15 K	A	I_θ	461
		I_ϕ	614
318.15 K	0.94 A	$0.94 I_\theta$	462
		$0.92 I_\phi$	614
333.15 K	0.89 A	$0.90 I_\theta$	463
		$0.85 I_\phi$	614
348.15 K	0.79 A	$0.81 I_\theta$	464
		$0.74 I_\phi$	614

Tabla 5. Comparación de I_{\max} , I_T y λ_{\max} de la lámpara blanca a 303.15 K, 318.15 K, 333.15 K y 348.15 K.

Por otro lado, el comportamiento de la longitud de onda de emisión de los LEDs con la temperatura está fuertemente gobernado por la dependencia con la temperatura del ancho de la banda prohibida (*bandgap*) de los materiales semiconductores que constituyen la heteroestructura del LED. Si bien existen varios modelos que proponen la evolución del *bandgap* de materiales binarios con la

temperatura, la forma funcional más aceptada es la ecuación empírica de Varshni [5],

$$E_g(T) = E_g(T=0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (2)$$

donde α y β son parámetros ajustables, conocidos como los coeficientes de Varshni.

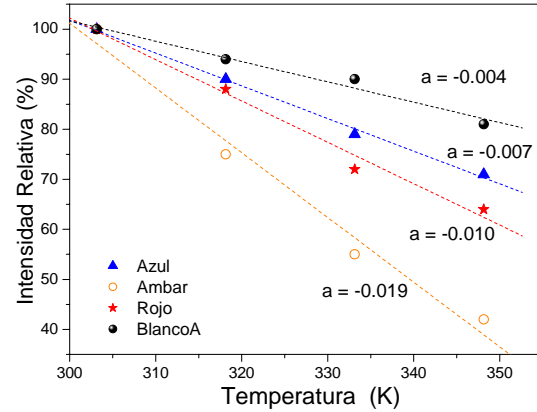


Fig. 9. Comportamiento de I_{\max} con la temperatura de las lámparas estudiadas en este trabajo.

Tanto $E_g(T=0 \text{ K})$ como los coeficientes de Varshni han sido reportados para un gran número de materiales binarios semiconductores compuestos, tales como el GaAs, GaP, GaIn, InN, etc. No obstante, las heterouniones de los LEDs comúnmente están formadas por materiales ternarios. En tal caso, la dependencia del *bandgap* con la temperatura puede obtenerse a partir de la relación entre los binarios que conforman la aleación asumiendo una forma cuadrática simple

$$E_g(A_{1-x}B_x) = (1-x)E_g(A) + xE_g(B) - x(1-x)C, \quad (3)$$

donde el denominado parámetro de curvatura C relaciona la desviación de una interpolación lineal entre los dos binarios A y B. Por lo tanto, al graficar la posición del máximo de los espectros de emisión de los LEDs (en energía) en función de la temperatura, ajustamos la **ecuación 3** para obtener una estimación de la concentración atómica relativa de cada uno de los binarios en la aleación, además del parámetro de curvatura. Los ajustes se muestran en la **figura 10**, para los LEDs con λ_c en 466 nm, 591 nm y 631 nm. En la **tabla 5** se realiza una comparación entre los valores nominales de las aleaciones ternarias y los valores obtenidos a través de los ajustes. Observemos que la concentración, x , determinada por los ajustes son muy cercanas a los valores nominales dados por los fabricantes. Asimismo, el parámetro de curvatura, C , se

encuentra dentro de lo propuesto por Vurgaftman et. al. [6].

λ_c (nm)	Material	x (nominal)	x (ajuste)	C (ajuste)
466	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	0.16	0.163	3.68
591	$\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}\text{N}$	0.85	0.848	0.27
631	$\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}\text{N}$	0.65	0.700	0.22

Tabla 5. Parámetros obtenidos para los ternarios que conforman las diferentes heteroestructuras de los LEDs.

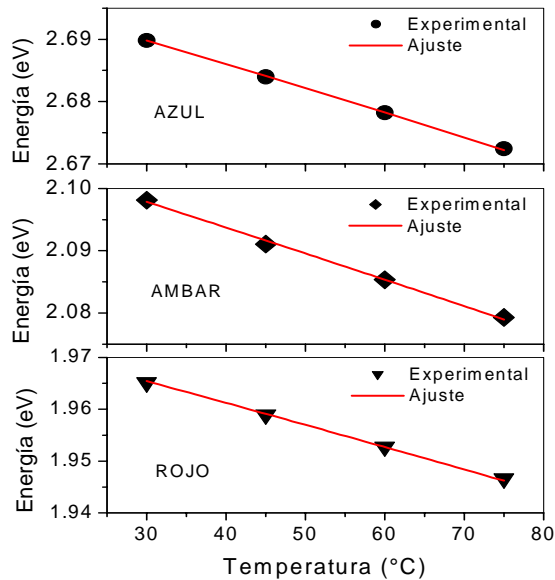


Fig. 10. Dependencia con la temperatura de la posición energética del máximo de emisión de las lámparas. La línea continua es un ajuste realizado a través de la **ecuación 3**.

4. CONCLUSIONES

Se ha estudiado la emisión de varias lámparas basadas en LEDs al variar la temperatura de su entorno. Los efectos más importantes son un corrimiento a mayor longitud de onda del pico máximo de emisión, así como una caída en la intensidad luminosa. El corrimiento a mayor longitud de onda (menor energía) fue explicado y modelado a través del comportamiento con la temperatura de los bandgaps de los materiales ternarios que conforman las heteroestructuras de los LEDs.

REFERENCIAS

- [1] Keith Scott, "From Concept to Reality to the Future", Educational Presentation for the IESNA, Great Lakes Regional Area, E. U. A., June 2004.
- [2] Nakamura S., et al., "InGaN-based multi-quantum-well-structure laser diodes", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.35 (1996) L74-L76.
- [3] Navigant consulting Inc., "Energy savings potential of solid state lighting in general illumination applications" prepared for Department of Energy, Washington DC, E. U. A., 2006.
- [4] Nichia, "Optoelectronics Product Guide", Nürnberg, Alemania, 1999.
- [5] Varshni Y. P., "Temperature dependence of the energy gap in semiconductors" Physica **34**, (1967) 149-154.
- [6] Vurgaftman, Meyer, y Ram-Mohan J. Appl. Phys., Vol. **89**, (2001) 5815.