

# **Universidad Nacional de Ingeniería**

## **Facultad de Ciencias**



## **TESIS**

### **Características lumínicas de un LED blanco bajo diferentes condiciones de temperatura**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Físico

Elaborado por

Milner Rene Quispe Montesinos

[0009-0007-9087-2273](#)

Asesor

Dr. Manfred Josef Horn Mutschler

[0000-0003-4808-658X](#)

LIMA - PERÚ

2024

---

Citar/How to cite	Quispe Montesinos [1]
Referencia/Reference	[1] M. Quispe Montesinos, “Características lumínicas de un LED blanco bajo diferentes condiciones de temperatura” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE	

---

---

Citar/How to cite	(Quispe, 2024)
Referencia/Reference	Quispe, M. (2024). <i>Características lumínicas de un LED blanco bajo diferentes condiciones de temperatura</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

### **Dedicatoria**

*A mis queridos padres, Juana Montesinos y Víctor Quispe, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido mi fuente de inspiración. A mis amados hermanos, José Quispe y Carlos Quispe, por su aliento y comprensión en cada paso de este camino. A mis buenos amigos Diana Cahuana, Carmen Ferré y Kevin Vásquez, cuya amistad y aliento han iluminado mis días. Al Profesor Julio Salazar, quien dio los primeros pasos en esta gran aventura y ahora está en la presencia del Altísimo. Este trabajo está dedicado a ustedes, quienes han sido mi sostén y motivación. ¡Gracias por ser mi fuente de fuerza y por creer en mí siempre!*

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a las personas que han contribuido de manera significativa a la realización de este trabajo de investigación:

Al Dr. Manfred Horn, mi asesor de tesis, agradezco su apoyo constante, dedicación y paciencia a lo largo de este desafiante trayecto. Su pasión por la ciencia y su guía basada en una vasta experiencia fueron fundamentales para culminar con éxito este proyecto.

A la Dra. Mónica Gómez, agradezco sus valiosas sugerencias y críticas constructivas que enriquecieron el desarrollo de esta tesis. Su disposición durante los ensayos de sustentación y su papel crucial como intermediaria con el Dr. Francisco Paraguay en la evaluación de muestras en el microscopio electrónico de barrido del CIMAV en Chihuahua, México, son dignos de reconocimiento.

Al Dr. Francisco Paraguay, agradezco su generosa colaboración en la evaluación de muestras en el CIMAV. Aunque no tengo el placer de conocerlo personalmente, su compromiso con la investigación habla por sí mismo.

Mi reconocimiento al Dr. Fernando Oscoco, cuya asesoría en el manejo de equipos en el laboratorio de Fotometría de la UNI fue fundamental para acelerar la evaluación de luminarias durante el procedimiento experimental. Sus valiosas sugerencias basadas en su experiencia en este campo fueron de gran importancia.

Agradezco al Dr. Clemente Luyo y al Dr. Robert Paria por su disposición en el manejo del microscopio electrónico de barrido de la Facultad de Ciencias de la UNI. También agradezco a la Dra. Susana Petrick por facilitar los recursos de los laboratorios de la Facultad para el desarrollo experimental de este trabajo.

A mi gran amigo Alex Cancio, le agradezco su incondicional apoyo durante los primeros pasos de esta investigación.

Finalmente, agradezco al Ing. Michael Vera por permitirme el acceso al material de cómputo, electrónica y a la impresora 3D del laboratorio Smart City del CTIC – UNI. Su colaboración fue crucial en el diseño e implementación del sistema de sujeción basado en la rosca E27 y en el proceso de monitorización de la temperatura por autocalentamiento del LED.

## Resumen

En este trabajo se realizaron pruebas bajo diferentes condiciones de corriente y de temperatura a fin de conocer cómo influyen sobre las propiedades lumínicas de los LEDs blancos, así también, conocer las características de sus espectros. Para ello, se utilizó un sistema experimental implementado por el profesor Julio Salazar en el laboratorio de fotometría de la UNI. Su diseño, permite trabajar con LEDs de alta potencia a temperaturas dentro del rango de 0 °C a 100 °C.

Paralelamente, utilizando una esfera integradora se obtuvo el flujo luminoso de cada LED. Luego, con el espectrómetro de la esfera se obtuvo su espectro radiométrico, siendo útil para el ajuste del espectrofotómetro del sistema experimental. También se realizó la extracción del fósforo fluorescente para conocer los cambios en el espectro de cada LED, viéndose diferentes resultados, postulando que, se emplean semiconductores diferentes entre sí a fin de obtener la temperatura de color que el fabricante desea reproducir.

Se obtuvieron las curvas fotométricas de los LEDs mediante el uso del goniofotómetro del laboratorio de Fotometría de la UNI. El despojo del fósforo fluorescente de los LEDs permitió conocer cómo las curvas fotométricas cambian en forma e intensidad.

Finalmente, se observaron las características microscópicas de los semiconductores utilizando tanto un microscopio digital como un microscopio electrónico de barrido (SEM). Esto permitió reconocer las diferentes áreas del chip LED. Los análisis EDS brindaron información sobre la composición atómica elemental de los semiconductores y del fósforo fluorescente.

Palabras clave – LEDs blancos, temperatura, propiedades lumínicas, SEM.

## **Abstract**

In this work, tests were conducted under different current and temperature conditions to understand their influence on the photometric properties of white LEDs and to explore the characteristics of their spectra. For this purpose, an experimental system implemented by Professor Julio Salazar in the photometry laboratory at UNI was utilized. Its design allows working with high-power LEDs at temperatures ranging from 0 °C to 100 °C.

Simultaneously, using an integrating sphere, the luminous flux of each LED was obtained. Subsequently, the radiometric spectrum of each LED was obtained with the sphere's spectrometer, facilitating the adjustment of the experimental system's spectrophotometer. The extraction of fluorescent phosphor was also performed to identify changes in the spectrum of each LED, revealing diverse outcomes and suggesting the use of different semiconductors to achieve the desired color temperature set by the manufacturer.

Photometric curves of the LEDs were acquired using the goniophotometer in the UNI Photometry Laboratory. Stripping the fluorescent phosphor from the LEDs provided insights into how the photometric curves change in shape and intensity.

Finally, microscopic characteristics of the semiconductors were observed using both a digital microscope and a scanning electron microscope (SEM). This allowed for the recognition of different areas on the LED chip. EDS analyses provided information about the elemental atomic composition of the semiconductors and the fluorescent phosphor.

**Keywords** – White LEDs, temperature, photometric properties, SEM.

# Tabla de Contenido

<b>Resumen</b>	v
<b>Abstract</b>	vi
<b>Introducción</b>	xx
<b>I. Parte introductoria del trabajo de investigación</b>	1
A. Generalidades . . . . .	1
B. Descripción del problema de investigación . . . . .	2
C. Objetivos de estudio . . . . .	3
1) Objetivo General . . . . .	3
2) Objetivos Específicos . . . . .	3
D. Antecedentes investigativos . . . . .	3
<b>II. Marco teórico y conceptual</b>	5
A. Visión humana . . . . .	5
B. Radiación electromagnética . . . . .	6
1) Espectro continuo y discontinuo . . . . .	8
2) Espectro de emisión de gases . . . . .	9
3) Espectrómetro . . . . .	10
C. Fotometría . . . . .	13
1) Fotometría y radiometría . . . . .	13
2) Magnitudes fotométricas . . . . .	14
3) Instrumentos de medición fotométrica . . . . .	18
D. Colorimetría . . . . .	27
1) Coordenadas y diagramas de cromaticidad . . . . .	27
2) Diagramas de cromaticidad uniforme . . . . .	34
3) Propiedades de cromaticidad . . . . .	36
E. Lámparas eléctricas . . . . .	37
1) Historia de las lámparas eléctricas . . . . .	37
2) Lámpara incandescente . . . . .	41
3) Lámparas de descarga . . . . .	43
F. LED blanco de alta potencia . . . . .	48
1) Historia del LED y del OLED . . . . .	48
2) Reciente crecimiento en el mercado . . . . .	57
3) Física del LED blanco . . . . .	58
<b>III. Desarrollo del trabajo de investigación</b>	71
A. Procedimiento para medidas luminotécnicas . . . . .	71

1) Acondicionamiento de un dispositivo experimental . . . . .	71
2) Armado de un soporte para un LED de alta potencia en base al casquillo E27	75
3) Toma de datos con la esfera integradora Labsphere LMS-400 . . . . .	76
4) Calibración del espectrofotómetro Ocean Optics USB650 . . . . .	78
5) Colección de datos con el DE . . . . .	80
6) Uso de un goniofotómetro para LEDs blancos de alta potencia . . . . .	82
7) Colección semiautomatizada de sondeo de temperatura del LED con el DE y un termopar tipo K . . . . .	83
<b>B. Análisis morfológico y elemental del fósforo fluorescente y del semiconductor que componen a los LEDs blancos de alta potencia . . . . .</b>	<b>85</b>
1) Microscopía digital . . . . .	85
2) Microscopía electrónica de barrido y análisis EDS . . . . .	86
<b>IV. Análisis y discusión de resultados</b>	<b>90</b>
<b>A. Resultados eléctricos, fotométricos y espectrofotométricos . . . . .</b>	<b>90</b>
1) Calibración del espectrofotómetro . . . . .	90
2) Resultados eléctricos de los LEDs con el SE . . . . .	91
3) Resultados fotométricos de los LEDs con el SE . . . . .	92
4) Resultados espectrofotométricos de los LEDs con el SE . . . . .	96
5) Curvas fotométricas de los LEDs blancos de alta potencia . . . . .	105
6) Monitoreo de la temperatura del LED debido al autocalentamiento . . . . .	107
<b>B. Análisis morfológico y elemental de LEDs blancos de alta potencia . . . . .</b>	<b>111</b>
1) Fotografía UV óptico-digital . . . . .	111
2) Análisis morfológico y EDS . . . . .	113
<b>V. Conclusiones</b>	<b>121</b>
<b>VI. Referencias bibliográficas</b>	<b>122</b>
<b>Anexos</b>	<b>131</b>

## Lista de Tablas

TABLA I:	Cantidades radiométricas y fotométricas. . . . .	15
TABLA II:	Luminancia típica para fuentes comunes de luz . . . . .	17
TABLA III:	Iluminancia típica para diferentes condiciones de cielo . . . . .	17
TABLA IV:	Demanda mundial de iluminación por producto del 2006 al 2021 (En millones de dólares) . . . . .	57
TABLA V:	Valores de la banda prohibida del germanio, datos experimentales y teóricos . . . . .	66
TABLA VI:	Descripción de las rutinas de medición de temperatura del LED CREE XP-L U6. . . . .	85
TABLA VII:	Codificación y descripción de los LEDs blancos a analizar. . . . .	89
TABLA VIII:	Características de los picos azules de los LEDs CREE, así como sus CCTs bajo diferentes niveles de corriente eléctrica a 25 °C. . . . .	98
TABLA IX:	LED CREE XP-G3 R5. Características de sus picos azules y cambios en sus CCTs bajo diferentes niveles de temperatura y de corriente. .	100
TABLA X:	LED CREE XP-L U6. Características de sus picos azules y cambios en sus CCTs bajo diferentes niveles de temperatura y de corriente. .	101
TABLA XI:	LED CREE XP-G3 S5. Características de sus picos azules y cambios en sus CCTs bajo diferentes niveles de temperatura y de corriente. .	102
TABLA XII:	Variación de la CCT de los LEDs CREE entre los 100 mA y los 900 mA para 10 °C y 95°C. . . . .	103
TABLA XIII:	Variación de la CCT de los LEDs CREE entre los 10 °C y los 95 °C para 100 mA, 500mA y 900 mA. . . . .	103
TABLA XIV:	Comparativa cuantitativa de los picos azules de LEDs CREE antes y después de la extracción del fósforo fluorescente. . . . .	105
TABLA XV:	Incremento de la temperatura medida del LED respecto a la temperatura de operación de 25 °C y porcentaje de variación respecto a la variación máxima del método continuo. . . . .	109
TABLA XVI:	Incremento de la temperatura medida del LED respecto a la temperatura de operación de 95 °C y porcentaje de variación respecto a la variación máxima del método continuo. . . . .	110
TABLA XVII:	Elementos químicos encontrados en dos áreas distintas del LED 1 y sus correspondientes % Masa y % Atómico. . . . .	114
TABLA XVIII:	Elementos químicos encontrados en dos áreas distintas del LED 2 y sus correspondientes % Masa y % Atómico. . . . .	115
TABLA XIX:	Elementos químicos encontrados en dos áreas distintas del LED 3 y sus correspondientes % Masa y % Atómico. . . . .	117
TABLA XX:	Elementos químicos encontrados en dos áreas distintas del LED 4 y sus correspondientes % Masa y % Atómico. . . . .	118
TABLA XXI:	Elementos químicos encontrados en dos áreas distintas del LED 5 y sus correspondientes % Masa y % Atómico. . . . .	119

## Lista de Figuras

FIGURA I.	Partes del ojo humano . . . . .	5
FIGURA II.	Fotoreceptores y su estructura . . . . .	6
FIGURA III.	Espectro visible inmerso en el espectro electromagnético . . . . .	7
FIGURA IV.	Líneas de Fraunhofer del espectro solar . . . . .	8
FIGURA V.	Espectro solar teórico, fuera de la atmósfera y sobre la superficie terrestre . . . . .	8
FIGURA VI.	Transiciones de energía presentes en el átomo de hidrógeno	9
FIGURA VII.	Estructura interna de un espectrómetro . . . . .	10
FIGURA VIII.	Resoluciónpectral definida por el FWHM . . . . .	12
FIGURA IX.	Funciones de eficiencia luminosa espectral del ojo humano $V(\lambda)$ y $V'(\lambda)$ . . . . .	13
FIGURA X.	Tipos de visión y sus rangos bajo diferentes niveles de luminancia . . . . .	14
FIGURA XI.	Esquema básico del detector de un luxómetro . . . . .	18
FIGURA XII.	Cantidades fotométricas sobre una superficie . . . . .	19
FIGURA XIII.	Disposición geométrica de un elemento de superficie emisora y una superficie receptora . . . . .	19
FIGURA XIV.	Esquema básico de una esfera integradora ideal . . . . .	21
FIGURA XV.	Curvas fotométricas para una lámpara LED de alumbrado público . . . . .	26
FIGURA XVI.	Esquema de un goniofotómetro . . . . .	26
FIGURA XVII.	Arreglos experimentales para la obtención de los CMFs (a) Combinación simple de colores primarios. (b) Reducción de saturación de la fuente de luz monocromática utilizando luz roja	27
FIGURA XVIII.	Color Matching Functions (CMFs) obtenidas en el emparejamiento de fuentes luminosas monocromáticas . . . . .	28
FIGURA XIX.	Diagrama de cromaticidad $rg$ . . . . .	31
FIGURA XX.	CMFs en sistema $XYZ$ CIE 1931 . . . . .	32
FIGURA XXI.	CMFs respectivos a los sistemas $XYZ$ y $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ . . . . .	33
FIGURA XXII.	Diagrama de cromaticidad de los sistemas $XYZ$ (círculos cerrados) y $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ (círculos abiertos) . . . . .	34
FIGURA XXIII.	Elipses de MacAdam en el diagrama de cromaticidad $xy$ , estas están magnificadas diez veces . . . . .	34
FIGURA XXIV.	Elipses de MacAdam en el diagrama de cromaticidad $u'v'$ , estas están magnificadas diez veces . . . . .	35
FIGURA XXV.	Curva de Planck y sus curvas de isometría . . . . .	36
FIGURA XXVI.	Diferentes modelos de lámparas de arco . . . . .	37
FIGURA XXVII.	Bombilla centenaria, encendida desde 1901 en California, EEUU	38
FIGURA XXVIII.	Evolución de la iluminación eléctrica . . . . .	40
FIGURA XXIX.	Estructura de la lámpara incandescente . . . . .	41

FIGURA XXX.	Espectros de radiación lámparas incandescentes de 60 W, 100 W y 150 W . . . . .	43
FIGURA XXXI.	Esquema eléctrico de conexiones básicas en una lámpara de descarga . . . . .	44
FIGURA XXXII.	Esquema del funcionamiento de una lámpara fluorescente y sus diferentes descripciones gráficas . . . . .	46
FIGURA XXXIII.	Rectificador de bigote de gato . . . . .	49
FIGURA XXXIV.	Curva característica <i>I-V</i> del detector de carbono publicado por Losev en 1928 . . . . .	50
FIGURA XXXV.	Métodos de obtención de LEDs blancos: (a) Combinación de LEDs rojo, verde y azul, (b) fósforo fluorescente con LED UV y (c) fósforo fluorescente con LED azul . . . . .	52
FIGURA XXXVI.	Eficacia luminosa a lo largo del siglo XX de las diferentes lumínicas y el desarrollo del LED desde sus comienzos hasta la aparición y refinamiento en la calidad de los LEDs blancos	54
FIGURA XXXVII.	Esquema de capas de la estructura de los OLEDs . . . . .	54
FIGURA XXXVIII.	Hitos en el desarrollo de la tecnología OLED . . . . .	56
FIGURA XXXIX.	Tendencias del mercado de la iluminación en India entre el 2010 y el 2018 . . . . .	58
FIGURA XL.	Banda prohibida, de conducción y de valencia en la juntura pn	59
FIGURA XLI.	Efecto de la polarización directa sobre la banda prohibida, de valencia y de conducción . . . . .	59
FIGURA XLII.	Efecto de la polarización inversa sobre la banda prohibida, de valencia y de conducción . . . . .	60
FIGURA XLIII.	Curva característica del diodo . . . . .	61
FIGURA XLIV.	Diagrama de bandas de energía (a) para el material tipo n y tipo p por separado (b) para la heterojuntura . . . . .	62
FIGURA XLV.	Diagrama de bandas de energía para el AlGaAs-GaAs-AlGaAs (a) Pozo cuántico amplio y (b) pozo cuántico estrecho . . . . .	63
FIGURA XLVI.	Pozos cuánticos múltiples (a) de tipo I y (b) de tipo II . . . . .	64
FIGURA XLVII.	Influencia de la presencia de MQWs en la longitud de onda de la radiación emitida por un LED de GaN . . . . .	64
FIGURA XLVIII.	Influencia de la temperatura sobre (a) la longitud de onda de radiación emitida por un LED y sobre (b). el ancho de banda prohibida del GaN . . . . .	66
FIGURA XLIX.	Proceso de la recombinación radiativa en su representación (a)física y (b) diagrama de bandas . . . . .	67
FIGURA L.	Recombinación de tipo Auger (a) entre dos electrones y un hueco o (b) entre un electrón y dos huecos . . . . .	68
FIGURA LI.	Procesos de captura y de emisión de portadores de carga en una trampa . . . . .	69
FIGURA LII.	Fenómeno de fotoluminiscencia presente en el fósforo fluorescente de un LED blanco . . . . .	69

FIGURA LIII.	Espectros de emisión por parte de los orto silicatos alcalinotérreos bajo una iluminación de longitud de onda de 450 nm . . . . .	70
FIGURA LIV.	Detalles del diseño de la caja oscura. . . . .	72
FIGURA LV.	Forma física de la tapa 1 y sus componentes. . . . .	73
FIGURA LVI.	Esquema longitudinal del DE. . . . .	73
FIGURA LVII.	Esquema del SE. . . . .	74
FIGURA LVIII.	Circuito del sistema electrónico de alimentación y medición. . . . .	75
FIGURA LIX.	Diseño de un soporte para LEDs de alta potencia con rosca E27. (a) Retiro de trozo de cúpula de una lámpara LED y (b) diseño en 3D de un soporte semiesférico en SolidWorks. . . . .	75
FIGURA LX.	Diferentes vistas del ensamblaje del SE27. . . . .	76
FIGURA LXI.	Circuito encargado de la energización y monitorización del LED blanco en la esfera integradora. . . . .	77
FIGURA LXII.	Gases elementales utilizados durante el procedimiento de calibración del espectrofotómetro USB 650. . . . .	78
FIGURA LXIII.	Condiciones para la obtención del espectro de una lámpara de gas. . . . .	79
FIGURA LXIV.	Diagrama de flujo de la colección de datos con el sistema experimental. . . . .	82
FIGURA LXV.	Circuito encargado de la energización y monitorización del LED blanco instalado dentro de la CO del DE adaptado al módulo MAX6675. . . . .	84
FIGURA LXVI.	Estructura y procesamiento básico de la imagen producida por un microscopio digital . . . . .	86
FIGURA LXVII.	Esquema básico del SEM . . . . .	87
FIGURA LXVIII.	Principio físico del análisis EDS de una muestra. (a) Incidencia de un EP y generación de un SE y un ERD, (b) Emisión de rayos X por medio de la estabilización del ion debido a la caída de un electrón del nivel $L_3$ al K . . . . .	88
FIGURA LXIX.	SEM de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. . . . .	88
FIGURA LXX.	Corriente en función del voltaje, bajo diferentes niveles de temperatura y potencia eléctrica en función de la temperatura, bajo diferentes niveles de corriente aplicada a LEDs blancos de alta potencia CREE (a), (d) XP-G3 R5, (b), (e) XP-L U6 y (c), (f) XP-G3 S5. . . . .	91
FIGURA LXXI.	Flujo luminoso en función de la corriente y de la potencia eléctrica bajo diferentes niveles de temperatura aplicados a los LEDs blancos de alta potencia CREE (a), (d) XP-G3 R5, (b), (e) XP-L U6 y (c), (f) XP-G3 S5. . . . .	93

FIGURA LXXII.	Flujo luminoso y eficacia luminosa en función de la temperatura, bajo diferentes niveles de corriente para LEDs blancos de alta potencia CREE (a), (d) XP-G3 R5, (b), (e) XP-L U6 y (c), (f) XP-G3 S5. . . . .	94
FIGURA LXXIII.	Eficacia luminosa en función de la corriente y de la potencia eléctrica bajo diferentes niveles de temperatura aplicados a los LEDs blancos de alta potencia CREE (a), (d) XP-G3 R5, (b), (e) XP-L U6 y (c), (f) XP-G3 S5. . . . .	95
FIGURA LXXIV.	Variación de los espectros bajo diferentes condiciones de corriente a 25 °C de los LEDs blancos CREE (a) XP-G3 R5, (b) XP-L U6, (c) XP-G3 S5 y sus respectivos cambios en longitud de onda de sus picos azules y en sus CCTs, siendo sus CCTs nominales de (d) 2700 K, (e) 3000 K y (f) 6000 K. . . . .	97
FIGURA LXXV.	Variación de los espectros del LED CREE bajo diferentes condiciones de temperatura y de corriente eléctrica (a) XP-G3 R5 a 100 mA, (b) XP-G3 R5 a 500 mA, (c) XP-G3 R5 a 900mA, (d) XP-L U6 a 100 mA, (e) XP-L U6 a 500 mA, (f) XP-L U6 a 900mA, (g) XP-G3 S5 a 100 mA, (h) XP-G3 S5 a 500 mA y (i) XP-G3 S5 a 900mA. . . . .	99
FIGURA LXXVI.	Cambios de la CCT experimental y de la longitud de onda del pico azul del LED CREE XP-G3 R5 bajo diferentes condiciones de temperatura y de corriente. . . . .	100
FIGURA LXXVII.	Cambios de la CCT experimental y de la longitud de onda del pico azul del LED CREE XP-L U6 bajo diferentes condiciones de temperatura y de corriente. . . . .	101
FIGURA LXXVIII.	Cambios de la CCT experimental y de la longitud de onda del pico azul del LED CREE XP-G3 S5 bajo diferentes condiciones de temperatura y de corriente. . . . .	102
FIGURA LXXIX.	Espectros de los LEDs CREE XP-G3 R5 y XP-G3 S5 (a) sin fósforo. (b)Comparativa antes y después de la extracción del fósforo fluorescente entre 350nm y 850 nm, (c) entre 400 nm y 500 nm, y (c) entre 400 nm y 500 nm con la densidad de flujo normalizada. . . . .	104
FIGURA LXXX.	Curvas fotométricas para el LED CREE XP-G3 R5: (a) con fósforo en plano C0-C180, (b) con y sin fósforo en plano C0-C180, (c) con fósforo en plano C90-C270, (d) con y sin fósforo en plano C90-C270. . . . .	105
FIGURA LXXXI.	Curvas fotométricas para el LED CREE XP-G3 S5: (a) con fósforo en plano C0-C180, (b) con y sin fósforo en plano C0-C180, (c) con fósforo en plano C90-C270, (d) con y sin fósforo en plano C90-C270. . . . .	106
FIGURA LXXXII.	Curvas fotométricas de los LEDs CREE XP-G3 R5 y XP-G3 S5 sin fósforo en los planos: (a) C0-C180 y (b) C90-C270. . . . .	107

FIGURA LXXXIII.	Monitoreo de la temperatura del disipador del LED CREE XP-L U6. (a)Rutinas de medición de la temperatura a 25 °C, (b) ampliación de las medidas de temperatura bajo corrientes de 100 mA, 600 mA y 1000 mA a 25 °C, aplicando las rutinas 2U5D y (c) 2U18D. (d) Rutinas de medición de la temperatura a 95 °C, (e) ampliación de las medidas de temperatura bajo corrientes de 100 mA, 600 mA y 1000 mA a 95 °C, aplicando las rutinas 2U5D y (f) 2U18D. . . . .	108
FIGURA LXXXIV.	Ajuste lineal por mínimos cuadrados de la temperatura local promedio en función de la corriente, bajo las TO de (a) 25 °C y (b) 95 °C. . . . .	111
FIGURA LXXXV.	Fotografías bajo iluminación UV en tamaño aumentado (a, b y c) de un LED blanco cálido y (d, e y f) de un LED blanco frio. Ambos sin marca. . . . .	112
FIGURA LXXXVI.	(a) LED blanco despojado de su cubierta de fósforo fluorescente, (b) LED azul de alta potencia en funcionamiento y (c) estructura de un chip LED. . . . .	113
FIGURA LXXXVII.	Imágenes SEM y resultados del análisis EDS del fósforo fluorescente del LED 1 en dos zonas aleatorias denominadas como (a) área a y (b) área b. . . . .	114
FIGURA LXXXVIII.	Imágenes SEM y resultados del análisis EDS del fósforo fluorescente del LED 2 en dos zonas aleatorias denominadas como (a) área a y (b) área b. . . . .	115
FIGURA LXXXIX.	Imágenes SEM y resultados del análisis EDS del semiconducto del LED 3 en dos zonas aleatorias denominadas como (a) área a y (b) área b. . . . .	116
FIGURA XC.	Imágenes SEM y resultados del análisis EDS del semiconducto del LED 4 en dos zonas aleatorias denominadas como (a) área a y (b) área b. . . . .	117
FIGURA XCI.	Imágenes SEM y resultados del análisis EDS del semiconducto y de un borne del LED 5 en dos zonas aleatorias denominadas como (a) área a y (b) área b. . . . .	119
FIGURA XCII.	Imágenes SEM y resultados del análisis EDS del fósforo fluorescente y de uno de los bornes del LED 6. . . . .	120

## Lista de símbolos y acrónimos

### **Símbolos:**

[M]	: Estímulo de color generalizado.
[R], [G], [B]	: Estímulos de color rojo, verde y azul.
$^{\circ}C$	: Grados Celsius.
$^{\circ}K$	: Grados Kelvin.
$\alpha, \beta$	: Parámetros asociados a $\Theta D$ , según la ecuación de Varshni.
$\eta_v$	: Eficacia luminosa [ $lm \cdot W^{-1}$ ].
$\theta_i$	: Ángulo de incidencia.
$\theta_n$	: Ángulo de difracción en el orden n-ésimo.
$\Theta_D$	: Temperatura de Debye.
$\lambda$	: Longitud de onda.
$\mu m$	: Micrómetro [ $10^{-6}m$ ].
$\nu$	: Frecuencia [ $Hz$ ].
$\rho$	: Reflectancia.
$\Phi_a$	: Flujo luminoso de una lámpara auxiliar [ $lm$ ].
$\Phi_e$	: Flujo radiante [ $W$ ].
$\Phi_r$	: Flujo luminoso recibido por un elemento de área [ $lm$ ].
$\Phi_r$	: Flujo luminoso de una lámpara de referencia [ $lm$ ].
$\Phi_s$	: Flujo luminoso emitido por un elemento de área [ $lm$ ].
$\Phi_t$	: Flujo luminoso de una lámpara de prueba [ $lm$ ].
$\Phi_v$	: Flujo luminoso [ $lm$ ].
$\Omega$	: Ángulo sólido [ $sr_{-1}$ ].
$A$	: <i>Amperio</i> , unidad de corriente eléctrica.
$atm$	: <i>Atmósfera</i> , unidad de presión.
$c$	: Velocidad de la luz en el vacío, $299792458\ m \cdot s^{-1}$ .
$cd$	: <i>Candela</i> , unidad de intensidad luminosa.
$d$	: Densidad de rendija [ $m^{-1}$ ].

$D_{ar}$	: Señal del detector ante una lámpara auxiliar con una lámpara de referencia dentro de una esfera integradora.
$D_{at}$	: Señal del detector ante una lámpara auxiliar con una lámpara de prueba dentro de una esfera integradora.
$D_r$	: Señal del detector ante una lámpara de referencia.
$D_t$	: Señal del detector ante una lámpara de prueba.
$E$	: Energía [ $J, eV$ ].
$E(\lambda)$	: Sensibilidad del espectrómetro [ $cuentas \cdot W^{-1} \cdot s^{-1}$ ].
$E_0$	: Nivel de Fermi [ $eV$ ].
$E_{ar}$	: Iluminancia de una lámpara auxiliar con una lámpara de referencia dentro de una esfera integradora [ $lx$ ].
$E_{at}$	: Iluminancia de una lámpara auxiliar con una lámpara de prueba dentro de una esfera integradora [ $lx$ ].
$E_e$	: Irradiancia [ $W \cdot m^{-2}$ ].
$E_g(T)$	: Energía del ancho de banda prohibida en función de la temperatura [ $eV$ ].
$E_i, E_f$	: Energía inicial y final correspondientes entre dos niveles electrónicos [ $eV$ ].
$E_r$	: Iluminancia de una lámpara de referencia [ $lx$ ].
$E_t$	: Iluminancia de una lámpara de prueba [ $lx$ ].
$eV$	: Electronvoltio, $1,60218 \times 10^{-19} J$ .
$E_v$	: Iluminancia [ $lm \cdot m^{-2}, lx$ ].
$f_{s-r}, f_{1-2}, f$	: Factor de intercambio.
$h$	: Constante de Planck, $6,62606896 \times 10^{-34} J \cdot s$ .
$Hz$	: <i>Hertz</i> , unidad de frecuencia.
$I$	: Intensidad de corriente eléctrica [ $A$ ].
$I(\lambda)$	: Intensidad espectral [ $cuentas$ ].
$I_e$	: Intensidad radiante [ $W \cdot sr^{-1}$ ].
$I_v$	: Intensidad luminosa [ $lm \cdot sr^{-1}, cd$ ].
$K$	: Constante de una esfera integradora.

$k_B$	: Constante de Boltzmann, $1,3806504 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ .
$K_m$	: Eficacia luminosa máxima para la visión fotópica, $683 lm \cdot W^{-1}$ .
$K'm$	: Eficacia luminosa máxima para la visión escotópica, $1700 lm \cdot W^{-1}$ .
$kV$	: Kilovoltio.
$L_e$	: Radiancia [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ].
$lm$	: <i>Lumen</i> , unidad del flujo luminoso.
$L_v$	: Luminancia [ $cd \cdot m^{-2}$ ].
$lx$	: <i>Lux</i> , unidad de iluminancia.
$m$	: <i>metro</i> , unidad de longitud.
$mA$	: Miliamperio.
$n$	: Orden de difracción.
$n_i, n_f$	: Niveles inicial y final de un salto electrónico.
$nm$	: nanómetro [ $10^{-9} m$ ].
$P(\lambda)$	: Nivel de radiación incidente [ $W$ ].
$Q_e$	: Cantidad radiométrica.
$Q_{e,\lambda}$	: Distribución espectral de la Cantidad radiométrica $Q_e$ [ $W \cdot nm^{-1}$ ].
$Q_v, Q'_v$	: Cantidades fotométricas para la visión fotópica y escotópica.
$R$	: Constante de Rydberg, $1,097 \times 10^7 m^{-1}$ .
$R, G, B$	: Valores triestímulos correspondientes al rojo, verde y azul.
$sr$	: <i>Estereorradián</i> , unidad del ángulo sólido.
$T_{exp}$	: Tiempo de integración [ $s$ ].
$V$	: <i>Voltaje</i> y <i>voltio</i> , Magnitud de la tensión eléctrica y su respectiva unidad.
$V(\lambda), V'(\lambda)$	: Eficiencia luminosa del ojo humano para la visión fotópica y escotópica.
$W$	: <i>Watt</i> , unidad de potencia.

## Acrónimos

- 2U5D : 2 Up y 5 Down, referente a 2 s de energización y 5 s de desenergización.
- 2U18D : 2 Up y 18 Down, referente a 2 s de energización y 18 s de desenergización.
- CCD : Charged-Coupled Devices (Dispositivos acoplados con carga).
- CCT : Corralated Color Temperature (Temperatura de color correlacionada).
- CIE : Commission Internationale de L'Éclairage (Comisión internacional de iluminación).
- CMFs : Color Matching Functions (Funciones de emparejamiento de color) [ $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ , y  $\bar{b}(\lambda)$ ].
- CMOS : Complementary Metal-Oxide Semiconductor (Semiconductor complementario de óxido de metal).
- CRI : Color Rendering Index (Índice de reproducción cromática).
- DE : Dispositivo Experimental.
- EDS : Energy-Dispersive Spectroscopy (Espectroscopía de energía dispersiva).
- EEM : Espectro Electromagnético.
- EP : Electrón Primario.
- EPI : Electro-Phonon Interaction (Interacción electrón-fonón).
- ERD : Electrón Retrodispersado.
- ES : Electrón Secundario.
- FWHM : Full Width at Half Maximum (Ancho de pulso a mediana intensidad).
- LED : Light Emitting Diode (Diodo emisor de luz).
- LFC : Lámpara Fluorescente Compacta.
- MOCVD: Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (Deposición química de vapor metal orgánico).
- MQW : Multiple Quantum Well (Pozo cuántico múltiple).
- NPGE : Número de Periodos Globales de Energización.
- OLED : Organic Light Emitting Diode (Diodo orgánico emisor de luz).
- PGE : Periodo Global de Energización.

- PLE : Periodo Local de Energización.
- REM : Radiación Electromagnética.
- REMT : Rutina de Energización y Medición de Temperatura.
- SCE : Sistema de Calentamiento-Enfriamiento.
- SE : Sistema Experimental.
- SEM : Scanning Electron Microscopy (Microscopio electrónico de barrido).
- TLE : Thermal Lattice Expansion (Expansión térmica de red cristalina).
- TO : Temperatura de Operación.

## **Introducción**

Los diodos emisores de luz, más conocidos como LEDs por sus siglas en inglés, están gozando de una notable fama en el mercado de las luminarias. Sobre todo, aquellos que emiten luz blanca ya que están reemplazando a las lámparas fluorescentes y por supuesto a las lámparas incandescentes. Esto debido a su bajo consumo energético y a su alta eficiencia lumínosa frente a las proporcionadas por parte de las tecnologías ya mencionadas. Por ende, en este trabajo de tesis se hace una serie de análisis a LEDs de alta potencia, pero haciendo énfasis en sus propiedades lumínicas frente a diferentes temperaturas de operación.

## I. Parte introductoria del trabajo de investigación

### A. Generalidades

El empleo de un equipo experimental basado en una caja oscura con una platina de aluminio provisto de un juego de celdas Peltier puede proporcionar las condiciones ópticas y térmicas adecuadas para el estudio de las propiedades lumínicas de los LEDs blancos de alta potencia en función de la temperatura. Este sistema proporcionaría la temperatura de operación en la que el LED en cuestión estaría operando, sobre todo, en los primeros segundos de funcionamiento, para luego incrementarse la temperatura de la unión pn de la heterojuntura debido al autocalentamiento que va a depender directamente de la intensidad de corriente que circula a través del LED. Es importante tener en cuenta que con el estudio por realizarse no se podrá conocer la temperatura de la unión semiconductor, pero si se podría conocer el performance luminotécnico del LED en relación a la temperatura del medio en el cual este dispositivo se desempeña.

El desarrollo de esta investigación está registrado en este documento, compuesto por seis capítulos que serán mencionados y descritos a continuación:

- Capítulo I: “Introducción al Trabajo de Investigación”. En este capítulo, se presentan las generalidades, la formulación de hipótesis y la descripción del problema de investigación. Esto lleva a la delimitación de los objetivos de estudio y la revisión de antecedentes.
- Capítulo II: “Marco Teórico y Conceptual”. Aquí se exploran los conocimientos previos relacionados con el trabajo, desde la biología de la visión humana hasta la física de la radiación electromagnética. Se abordan los fundamentos de la fotometría, los instrumentos de medición, la colorimetría y una breve historia de las lámparas eléctricas, con un enfoque en las lámparas incandescentes y de descarga. Se concluye con el estudio de los LEDs blancos de alta potencia desde perspectivas históricas, económicas y físicas.
- Capítulo III: “Desarrollo del Trabajo de Investigación”. Este capítulo se centra en el trabajo experimental, describiendo métodos y técnicas durante el diseño, implementación y manipulación de instrumentos y dispositivos en el Laboratorio de Fotometría de la Universidad Nacional de Ingeniería. También se detalla la preparación de mues-

tras (LEDs) para análisis en un microscopio electrónico de barrido (SEM).

- Capítulo IV: “Análisis y Discusión de Resultados”. Aquí, los datos obtenidos convergen en resultados que describen diversos comportamientos de las propiedades luminotécnicas de los LEDs blancos de alta potencia bajo diferentes condiciones de temperatura y corriente eléctrica. Se incluyen estudios fotométricos, radiométricos, morfológicos y atómico-elementales de los chips LED después de la extracción del fósforo fluorescente.
- Capítulo V: “Conclusiones”. Este capítulo presenta de manera breve y concisa los puntos claves derivados del análisis y discusión de los resultados en relación con los objetivos planteados inicialmente.
- Capítulo VI: “Referencias Bibliográficas”. Aquí se enumeran todas las fuentes académicas y técnicas consultadas, facilitando una mayor comprensión de los temas tratados en la investigación.
- Además, se incluye un apartado de “Anexos”, que aborda temas complementarios y muestra dos publicaciones científicas relacionadas con el tema de la investigación.

## ***B. Descripción del problema de investigación***

La iluminación basada en LEDs (diodos emisores de luz) se ha convertido en una tecnología esencial en una amplia gama de aplicaciones, desde iluminación general [1] hasta pantallas electrónicas y de señalización. La elección y configuración adecuada de los LEDs es fundamental para garantizar un rendimiento óptimo en términos de eficacia luminosa y temperatura correlacionada de color (CCT) [2] en diversas condiciones de funcionamiento. Sin embargo, un factor crítico que afecta significativamente el rendimiento de los LEDs es la temperatura de operación.

La temperatura puede variar considerablemente en entornos de aplicación, ya sea debido a factores ambientales, disipación de calor o demanda de alta potencia. Los estudios existentes han demostrado que la temperatura puede influir en la eficacia luminosa de los LEDs y causar cambios en el color emitido [3]. Sin embargo, la comprensión detallada de estas relaciones y sus implicaciones prácticas sigue siendo un campo en evolución.

El presente estudio tiene como objetivo abordar esta problemática, explorando las propiedades fotométricas de los LEDs en función de la temperatura. Específicamente, se

busca responder a las siguientes interrogantes:

¿Cómo se vería afectado el brillo de una lámpara LED ante diferentes condiciones de temperatura?

¿Qué relación existe entre las propiedades eléctricas de un LED y sus propiedades lumínicas?

¿Qué impacto tendría el autocalentamiento sobre su rendimiento?

Este estudio pretende contribuir al conocimiento existente sobre las propiedades fotométricas de los LEDs en función de la temperatura, proporcionando información valiosa para diseños en el campo de la iluminación, ingeniería y manufactura de LEDs blancos de alta potencia. La comprensión de estos fenómenos permitirá optimizar el rendimiento y la confiabilidad de los LEDs en diversas aplicaciones, lo que a su vez podría tener un impacto significativo en la eficiencia energética y la calidad de la iluminación para la comunidad.

### **C. Objetivos de estudio**

#### **1) Objetivo General**

Determinar experimentalmente el comportamiento de las propiedades fotométricas y eléctricas de un LED blanco en función de la temperatura y estudiar las características morfológicas y estructurales de un LED blanco.

#### **2) Objetivos Específicos**

- Acondicionar un equipo diseñado y construido en el laboratorio de fotometría de la FC de la UNI, para el estudio fotométrico de LEDs en función de la temperatura.
- Determinar curvas fotométricas de un LED.
- Determinar la composición química del material de la unión pn de un LED.
- Determinar el espectro de un LED blanco al cuál se ha eliminado el fósforo.

### **D. Antecedentes investigativos**

El trabajo de investigación que se muestra en estas páginas surgió como la necesidad de responder cuestiones ligadas a la manera en que la temperatura, al actuar como factor primordial, condiciona el comportamiento de las cantidades luminotécnicas de un LED blanco. Para ello se realizaron procedimientos experimentales que estuvieron basados en

la utilización de instrumentos de medición fotométrica y en la aplicación de métodos de medición implementados con anterioridad. Por ello, se citan muy brevemente a los trabajos de investigación que fueron los precursores de esta tesis.

En 2007 en el Laboratorio de Fotometría de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, el Ingeniero Myke Ruiz Prado realizó el diseño y la implementación de un goniofotómetro como parte de su tesis para optar por el título de Ingeniero Físico. Originalmente, este instrumento tenía como objetivo evaluar lámparas fluorescentes de tipo LFC [4]. Posteriormente, en 2016, este trabajo sirvió de inspiración para la implementación de un nuevo goniofotómetro como parte del desarrollo de la tesis de maestría del Dr. Fernando Oscco Choque [5], que a la vez también tuvo como objeto de interés la implementación de una esfera integradora experimental que fue empleada para la caracterización fotométrica de lámparas LED.

En el mismo laboratorio, en 2019, el Ingeniero Robert Chala Estrada realizó el montaje de un espectrofotómetro con una esfera integradora PCE-LED1 para la caracterización de lámparas LED de alta potencia, siendo este el objetivo principal de su tesis para optar el título de Ingeniero Físico [6].

Entre 2017 y 2018 se comenzó con el estudio de las propiedades fotométricas de un LED blanco en función de la temperatura por medio del diseño y de la implementación de un equipo experimental, basado en una caja oscura. Este estudio comenzó por iniciativa de quien en vida fue el profesor Julio Cesar Salazar Rodríguez, siendo este uno de los cimientos más importantes para el presente trabajo.

Finalmente, en 2016, S. J. Oh and J. Cho realizaron un trabajo referente al aumento de la temperatura de la unión pn debido al autocalentamiento del LED [7], el cual sirvió como un aporte muy relevante para la realización de la energización intermitente para reducir el autocalentamiento del diodo.

## II. Marco teórico y conceptual

### A. Visión humana

El ojo humano tiene una forma esferoide de aproximadamente unos 25 mm de diámetro con un volumen de 6,5 mL [8]. Entre las principales partes que componen su compleja estructura se tiene: la córnea, esclera, pupila, iris, cristalino (lente), humor vitreo, canal hialoideo, retina, nervio óptico, etc (FIGURA I).

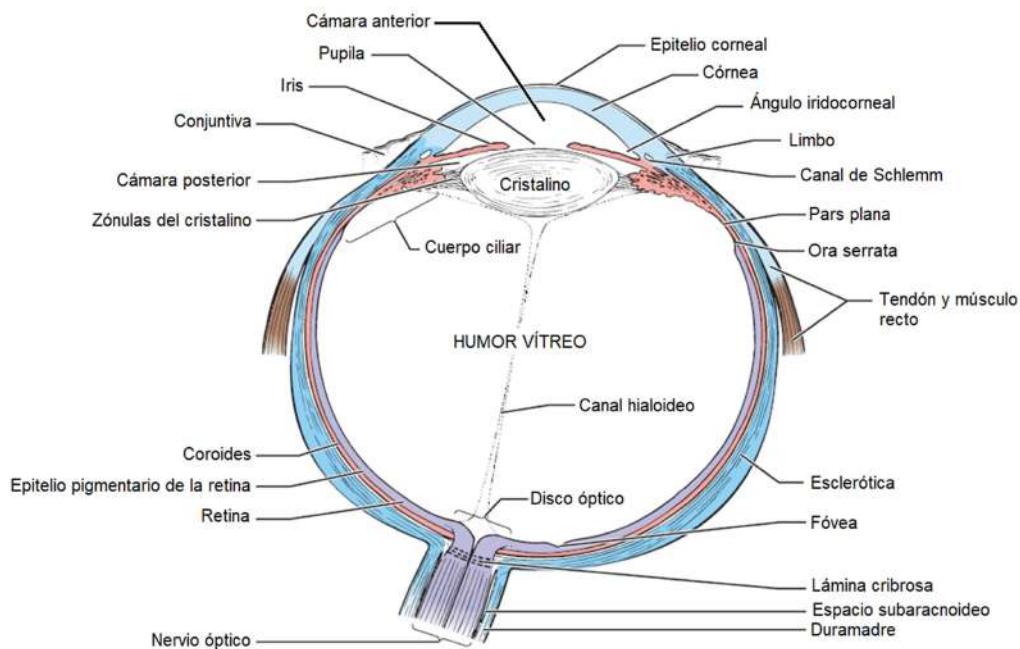


FIGURA I. Partes del ojo humano [8]

La retina es la estructura que es de mayor importancia para los fines de estudio de este trabajo de investigación ya que contienen a los fotorreceptores conocidos como conos y bastones de los cuales se disponen aproximadamente de unos seis millones y cien millones respectivamente [9].

Los bastones (FIGURA II) son fotorreceptores encargados de la visión escotópica con la que se pueden apreciar solo una escala de grises bajo condiciones de poca luz [3].

Los conos (FIGURA II) se clasifican en tres tipos: los M-conos, S-conos y L-conos que se estimulan bajo radiación visible de longitudes de onda media (verde), corta (azul) y larga (rojo), respectivamente. Sus proporciones respectivas son del 30%, 10% y 60%. Estos son encargados de la visión fotópica que se suele dar a condiciones de iluminación bastante buenas como la luz del día o de una habitación bien iluminada [9], [10].

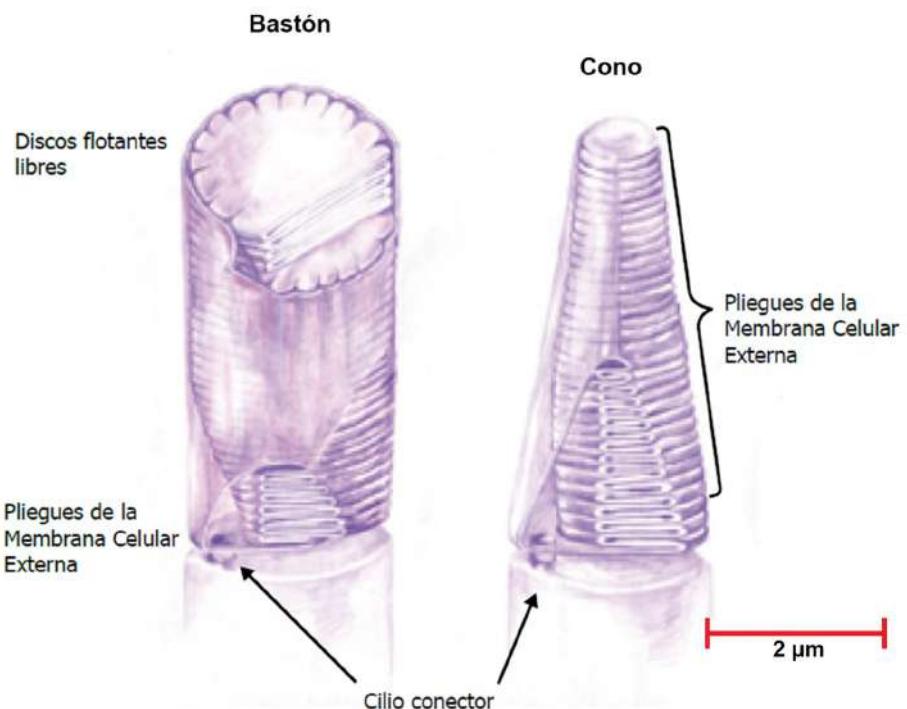


FIGURA II. Fotoreceptores y su estructura [9]

Finalmente, está la visión mesóptica [10] que es la amalgama de las dos formas de visión (Escotóptica y fotóptica), la cual se da en condiciones de luz de mediana intensidad como la que se puede apreciar durante el alba o el crepúsculo.

### **B. Radiación electromagnética**

La radiación electromagnética (REM) proveniente de una fuente natural o artificial es clasificada por su frecuencia o por su longitud de onda, así como se muestra en la FIGURA III.

Mucha de la tecnología que se ha ido desarrollando, ha ido dependiendo cada vez más de las diferentes formas que presenta la REM. Una zona del espectro electromagnético (EEM) que merece ser destacada para fines de este trabajo de investigación es el espectro visible, es decir, aquel percibido por el ojo humano, ya que la fotometría trata su estudio de manera estricta solo sobre esta región, la cual solamente abarca un estrecho intervalo, desde los 360 nm hasta los 830 nm [11]. Viéndose desde una perspectiva más empírica, se trata de la sensación visual del color violeta hasta el color rojo [12].

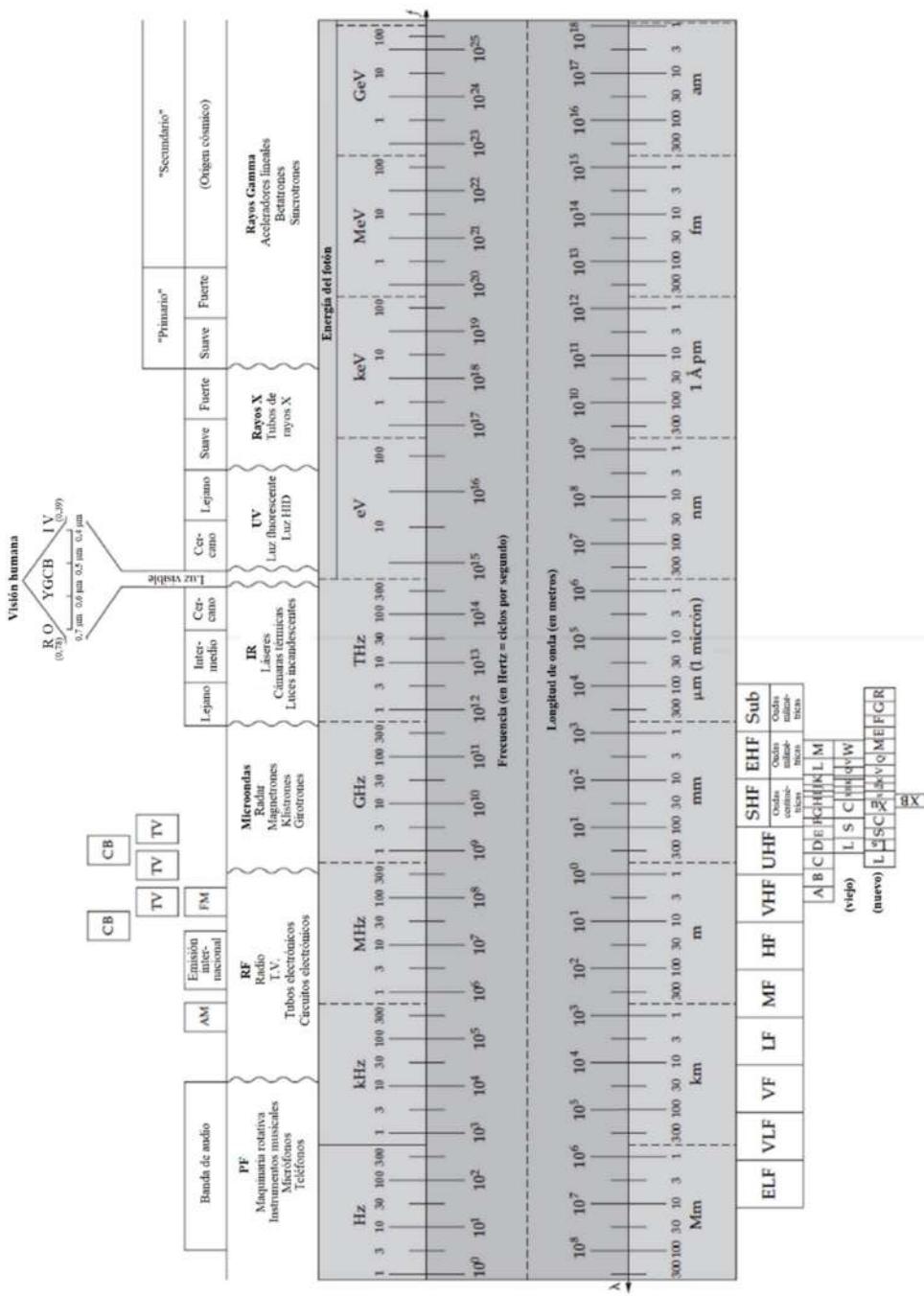


FIGURA III. Espectro visible inmerso en el espectro electromagnético [12]

### 1) Espectro continuo y discontinuo

En el siglo XVII Isaac Newton dejó pasar un haz de luz solar a través de un prisma de vidrio describiendo así la dispersión de los colores que componen la luz blanca. Un par de siglos más tarde Joseph Fraunhofer reprodujo el experimento hecho por Newton, pero logrando visualizar una serie de líneas negras a lo largo del espectro solar [13], así como se observa en la FIGURA IV.

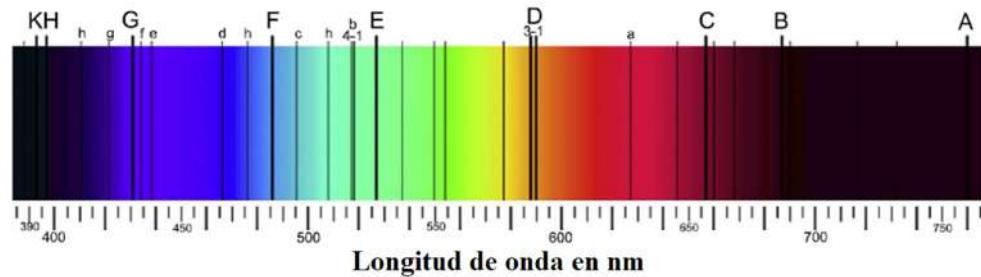


FIGURA IV. Lineas de Fraunhofer del espectro solar [13]

Siendo este un ejemplo de espectro discontinuo, ya que la radiación proveniente del Sol es absorbida en algunas regiones de su espectro por los gases que componen la atmósfera solar. En la FIGURA V se observa la diferencia de los espectros solares, tanto fuera de la atmósfera terrestre como en la superficie de la Tierra [14].

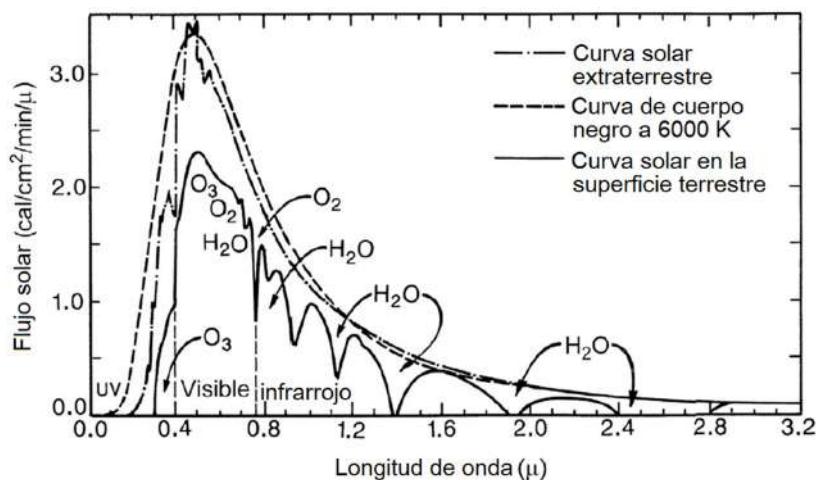


FIGURA V. Espectro solar teórico, fuera de la atmósfera y sobre la superficie terrestre [14]

Mientras que un ejemplo de espectro continuo es aquel que también se muestra en la FIGURA V para un cuerpo negro a 6000 K.

## 2) Espectro de emisión de gases

El átomo de hidrógeno ha sido estudiado ampliamente debido a su simpleza, brindando así también la oportunidad de hacer un análisis a groso modo del espectro de emisión de este elemento y dando así una idea generalizada del mecanismo detrás del espectro de emisión y/o absorción de otros elementos.

La nube de electrones que rodea al núcleo del átomo se encuentra subdividido, energéticamente hablando, en diferentes niveles de energía asociados al número cuántico  $n$ , donde  $n=1$  es el nivel de menor energía, viéndose también que la diferencia energética entre dos niveles diferentes está asociada de manera directa a la frecuencia de la radiación emitida o absorbida de acuerdo a la Ecuación 1 [13], [15].

$$E = E_i - E_f = -13,6\text{eV} \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \quad (1)$$

Donde  $E = h\nu$ , y como la longitud de onda se expresa en términos de la frecuencia dado por  $\lambda = c/\nu$ , así que:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \quad (2)$$

Donde  $R = 1,097 \times 10^7 \text{m}^{-1}$  es la constante de Rydberg y la Ecuación 2 es conocida como la fórmula de Rydberg.

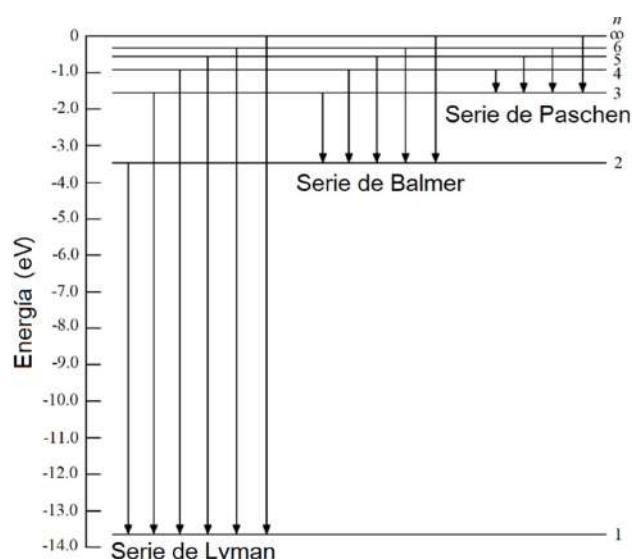


FIGURA VI. Transiciones de energía presentes en el átomo de hidrógeno [15]

Los saltos energéticos dirigidos al nivel  $n = 1$  caen a la región ultravioleta y son conocidos como las series de Lyman, mientras que aquellos que van dirigidos al nivel  $n = 2$  son los que caen en el rango visible y se denominan como las series de Balmer. Finalmente, los que van dirigidos al nivel  $n = 3$  son los que caen en la región infrarroja y son denominados como las series de Paschen [15]. Todas estas series están esquematizadas en la FIGURA VI.

### 3) Espectrómetro

El espectrómetro es un dispositivo que separa a la luz policromática en las diferentes longitudes de onda que la componen y mide las intensidades que corresponden a cada una de estas longitudes de onda. Suele ser utilizado para la determinación de propiedades ópticas de las sustancias, así también como para el análisis químico de fuentes de luz proveniente de cuerpos celestes [13] y por supuesto para el análisispectral de fuentes de lámparas incandescentes, fluorescentes, etc.

#### a) Estructura básica de un espectrómetro

La estructura básica que compone este dispositivo se puede observar en la FIGURA VII y consta de una apertura de entrada, rejilla de difracción, un detector, colimadores ópticos y un filtro de difracción [16].

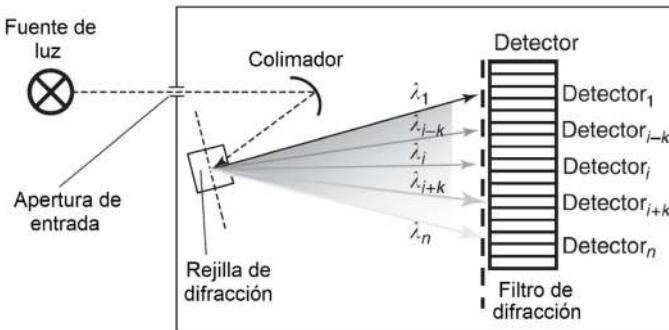


FIGURA VII. Estructura interna de un espectrómetro [16]

○ **Apertura de entrada:** Punto de acceso que tiene la luz al interior del espectrómetro, siendo su tamaño decisivo para determinar el brillo y la resoluciónpectral. A mayor apertura, mayor ingreso de luz, lo que permite detectar incluso fuentes débiles de luz, pero reduciendo la calidad de la resoluciónpectral del sistema debido a la saturación de radiación. Por otro lado, al tener una apertura pequeña, la resoluciónpectral mejora, pero se reduce la intensidad de la señal.

○ **Rejilla de difracción:** Elemento que descompone a la luz en las longitudes de

onda que la conforman. La Ecuación 3 describe a los parámetros relacionados al fenómeno de difracción que implica a la rejilla.

En algunos casos la rejilla puede rotar o en otros casos existen varias rejillas con diferentes densidades de rendija que se intercambian entre si con la finalidad de proporcionar diferentes longitudes de onda al detector.

$$d(\operatorname{sen}\theta_m - \operatorname{sen}\theta_i) = m\lambda \quad (3)$$

Donde:

$d$  : distancia entre las rendijas [m].

$\theta_m$  : ángulo de difracción en el orden  $m$ -ésimo.

$\theta_i$  : ángulo de incidencia.

$m$  : orden de difracción.

$\lambda$  : longitud de onda [nm].

○ **Detector:** Dispositivo basado en la tecnología CCD (charged-coupled devices) que está conformado por numerosas regiones sensibles a la luz (píxeles) que actúan en proporción a la cantidad de fotones que inciden sobre ellas en forma de pulsos eléctricos que luego son digitalizados [17]. Estos dispositivos suelen estar constantemente enfriados con la finalidad de minorizar las señales de ruido. Esta pieza es fundamental para el espectrómetro ya que se encarga de colectar la intensidad de la luz en función de la longitud de onda [16].

○ **Colimadores ópticos:** Elementos que se encargan de conducir uniformemente la luz proveniente de la rendija de entrada y/o de la rejilla de difracción entre los otros diferentes elementos que conforman al espectrómetro. Se suele optar por el uso de espejos curvos en lugar de lentes ya que estos últimos pueden generar aberración cromática [16].

○ **Filtro de difracción:** Elemento que permite bloquear difracciones de orden superior que pueden superponerse a la difracción de primer orden, lo cual evita que llegue al detector alguna fuente de luz parásita, ya que este no puede discriminar entre los diferentes ordenes de difracción [16, 18].

### b) Características de un espectrómetro

Básicamente un espectrómetro cuenta con ciertas características que definen su desempeño como son su resoluciónpectral, la luz difusa y su sensibilidad [19], las cuales son de importancia para comprender mejor el funcionamiento de esta herramienta de trabajo.

○ **Resoluciónpectral:** Así como se ha mencionado anteriormente, está directamente relacionada con el grado de apertura de la rendija de entrada [16], de tal modo que, a mayor entrada de luz, la resoluciónpectral se ve empobrecida y viceversa. Esta característica del espectrómetro se evalúa basándose en el ancho de un pulso al 50% de la intensidad pico, también conocida como FWHM (Full Width at Half Maximum) [19], por lo que sus unidades se expresan en nm. En la FIGURA VIII se explica esto último de manera gráfica.

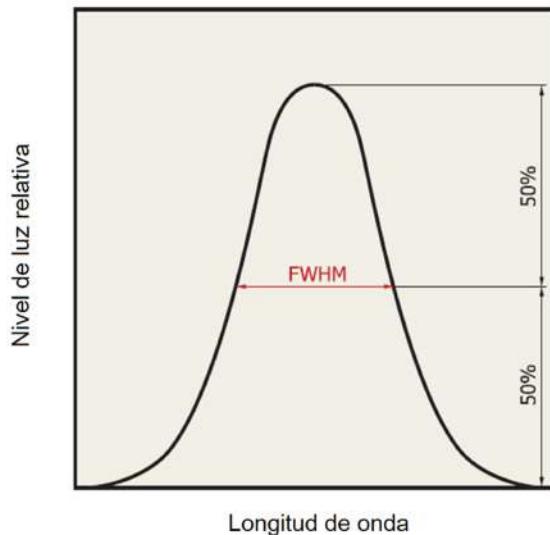


FIGURA VIII. Resolución espectral definida por el FWHM [19]

○ **Luz difusa:** En general se trata de cualquier tipo de radiación electromagnética no deseada y que suele ser problemática para el buen desempeño del espectrómetro. Para el caso concreto del rango visible, la luz difusa se produce como consecuencia de varios factores tales como: la filtración de luz ajena a la que se da por medio de la rendija de entrada debido a hendiduras presentes en la cubierta del equipo, también por imperfecciones en la rejilla de difracción, difracción de la luz de orden superior, reflexiones no contempladas por medio de alguno de los colimadores de luz, por la dispersión de la luz en partículas de polvo que se puedan encontrar dentro del instrumento, etc [19], [20].

○ **Sensibilidad del espe**c

$$E(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P(\lambda) \cdot T_{exp}} \quad (4)$$

Donde:

$E(\lambda)$  : sensibilidad del espe

$I(\lambda)$  : intensidad mostrada por el espe

$P(\lambda)$  : nivel de radiación incidente [W].

$T_{exp}$  : tiempo de integración [s].

### C. Fotometría

#### 1) Fotometría y radiometría

La radiometría describe y mide la radiación a lo largo de todo el espectro electromagnético [21]. Por otro lado, la fotometría enfoca su campo de estudio a la luz visible; entendiéndose esta última como la radiación electromagnética comprendida entre los 360 nm y los 830 nm, intervalo en el cual el ojo humano muestra una respuesta sensorial.

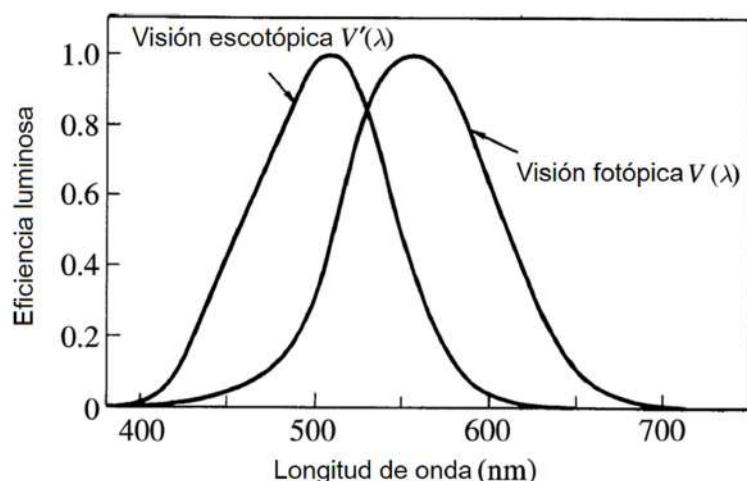


FIGURA IX. Funciones de eficiencia luminosa espectral del ojo humano  $V(\lambda)$  y  $V'(\lambda)$  [22]

Adicionalmente la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) define también la fotometría como la medida de las magnitudes relativas a la radiación que son evaluadas en base a una función de eficiencia luminosa espectral  $V(\lambda)$ ,  $V'(\lambda)$  [11], [23] pertenecientes a la visión fotópica y escotópica respectivamente (FIGURA IX). Estas funciones fueron establecidas por la CIE en los años 1924 y 1951 respectivamente, basándose en siete estudios que involucraron a 251 personas [22].

El ojo humano es capaz de adaptarse a niveles de iluminación dentro de un enorme rango de luminancia que van desde  $10^{-6} \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  hasta  $10^6 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  (FIGURA X), para ello hace uso de los conos y bastones ya mencionados anteriormente. Estos son responsables principalmente de la visión fotópica y escotópica, pero habiendo un tipo intermedio de visión llamado visión mesótónica [24], en la cual están involucrados ambos tipos de receptores.

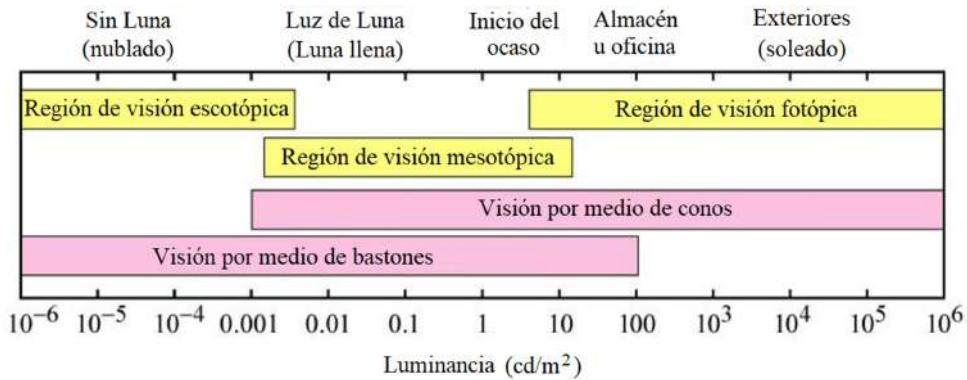


FIGURA X. Tipos de visión y sus rangos bajo diferentes niveles de luminancia [25]

## 2) Magnitudes fotométricas

Se entiende que la fotometría abarca un campo de estudio particular de la radiometría por lo que las magnitudes fotométricas son análogas a las que se encuentran en radiometría, por lo que se hace una mención de las magnitudes radiométricas y de sus magnitudes comparables en fotometría (TABLA I) para después exponer estas últimas con mayor detalle.

TABLA I

Cantidades radiométricas y fotométricas [21], [23].

	<b>Magnitud</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>
Cantidades radiométricas	Flujo radiante	$\Phi_e$	$W$
	Intensidad radiante	$I_e$	$W \cdot sr^{-1}$
	Radiancia	$L_e$	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$
	Irradiancia	$E_e$	$W \cdot m^{-2}$
Cantidades fotométricas	Flujo luminoso	$\Phi_\nu$	$lm$
	Intensidad luminosa	$I_\nu$	$lm \cdot sr^{-1} (cd)$
	Luminancia	$L_\nu$	$cd \cdot m^{-2}$
	Iluminancia	$E_\nu$	$lm \cdot m^{-2} (lx)$

④ **Candela (cd)**: Unidad de la intensidad luminosa, considerada por el SI como una de las siete magnitudes fundamentales. Originalmente, fue representada como el brillo de un mechero patrón. Posteriormente, en 1979 fue redefinida en la décimo sexta Conferencia de Pesos y Medidas como la intensidad luminosa de una fuente de radiación monocromática con una frecuencia de  $540 \times 10^{12} Hz$  ( $\lambda \approx 555 nm$ ) en una dirección dada, cuya intensidad radiante sea de  $1/683 W \cdot sr^{-1}$  [11], [21], [23].

En general una cantidad fotométrica se puede expresar en términos de la cantidad radiométrica homóloga, así como se muestra en la Ecuación 5 [5], [11], [23]:

$$Q_\nu = K_m \int_0^\infty \frac{dQ_e(\lambda)}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

Donde:

$K_m$  : eficacia luminosa espectral máxima ( $lm \cdot W^{-1}$ ).

$V(\lambda)$  : eficiencia luminosa espectral (adimensional).

$\frac{dQ_e}{d\lambda}$  : distribución espectral de la cantidad radiométrica  $Q_e$ , la cual puede expresarse como  $Q_{e,\lambda} (W \cdot nm^{-1})$ .

Con lo que la Ecuación 5 puede expresarse como se muestra en la Ecuación 6 [5], [11]:

$$Q_\nu = K_m \int_0^\infty Q_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Las ecuaciones 5 y 6 están asociadas a la visión fotópica. Mientras que, la Ecuación 7 sería aquella asociada a la visión escotópica:

$$Q'_{\nu} = K'_m \int_0^{\infty} Q_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Donde  $K'_m$  es el máximo de la eficacia luminosa espectral para la visión escotópica,  $V'(\lambda)$  es la eficiencia luminosa espectral para la visión escotópica [11]. Siendo  $K_m = 683 \text{ lm} \cdot W^{-1}$  y  $K'_m = 1700 \text{ lm} \cdot W^{-1}$ .

○ **Intensidad luminosa** ( $I_{\nu}$ ): Magnitud fundamental cuya unidad es la candela ( $cd$ ), la cual se define como la relación entre el flujo luminoso de una fuente y el ángulo sólido por el que se propaga la radiación en una dirección dada (Ecuación 8). Por lo que la candela se expresa como  $cd = \text{lm} \cdot sr^{-1}$  [11].

$$I_{\nu} = \frac{d\Phi_{\nu}}{d\Omega} \quad (8)$$

○ **Flujo luminoso** ( $\Phi_{\nu}$ ): Magnitud fotométrica que mide la potencia lumínica, cuya unidad es el lumen ( $lm$ ), siendo equivalente al flujo radiante expresado en watts ( $W$ ). Donde 683  $lm$  de flujo luminoso equivalen a 1  $W$  de flujo radiante procedente de una fuente lumínica con una longitud de onda de 555  $nm$  (luz verde). Siendo entonces, 1  $lm$  equivalente a 1/683  $W$ . La Ecuación 9 expresa el flujo luminoso en términos del flujo radiante para la visión fotópica [21], [23].

$$\Phi_{\nu} = K_m \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

○ **Luminancia** ( $L_{\nu}$ ): Relación que existe entre la intensidad luminosa emitida y el área de la fuente radiante ( $cd \cdot m^{-2} = lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ), siendo una cantidad fotométrica que está estrechamente asociada con la sensación visual de brillo [21]. Matemáticamente se define como se muestra en la Ecuación 10 [11]:

$$L_{\nu} = \frac{d^2\Phi_{\nu}}{dA \cos\theta d\Omega} \quad (10)$$

Donde:

$d\Phi_\nu$  : flujo luminoso de un haz que se propaga en una dirección dada contenida por un ángulo sólido  $d\Omega$ .

$dA$  : elemento de área que conforma la fuente luminosa.

$\theta$  : ángulo formado por la dirección de propagación del haz y la normal al elemento de área  $dA$ .

En la TABLA II se muestran algunos valores de luminancia de fuentes cotidianas.

TABLA II

Luminancia típica para fuentes comunes de luz [21]

Fuente	Luminancia ( $cd \cdot m^{-2}$ )
Sol	$1,6 \times 10^9$
Lámpara de tungsteno	$2,0 \times 10^6$ a $2,0 \times 10^7$
Vela	$2,0 \times 10^6$
Tubo fluorescente	$1,0 \times 10^4$
Cielo diurno claro	$1,0 \times 10^4$
Luna	$2,6 \times 10^3$
Cielo diurno nublado	$1,0 \times 10^3$
Cielo nocturno claro sin Luna	$1,0 \times 10^{-3}$

○ **Iluminancia** ( $E_\nu$ ): Razón entre el flujo luminoso de un haz incidente sobre una superficie y el área de dicha superficie ( $lm \cdot m^{-2} = lux = lx$ ). Esta cantidad fotométrica se expresa mediante la Ecuación 11 [11], mientras que en la TABLA III se muestran algunos valores de iluminancia típicos:

$$E_\nu = \frac{d\Phi_\nu}{dA} \quad (11)$$

TABLA III

Iluminancia típica para diferentes condiciones de cielo [21]

Fuente	Iluminancia ( $lx$ )
Luz solar directa	$1,0 \times 10^5$
Luz diurna clara	$1,0 \times 10^4$
Luz diurna nublada	$2,0 \times 10^3$
Luna llena	$1,0 \times 10^{-1}$
Cielo nocturno claro sin Luna	$1,0 \times 10^{-3}$

### 3) Instrumentos de medición fotométrica

En diversos campos de la industria el uso de los instrumentos de medición fotométrica está presente de manera directa o indirecta, ya que la iluminación es una pieza clave en la mayoría de las actividades humanas. Entre algunos de estos instrumentos se tienen al luxómetro o fotómetro, a la esfera integradora y al goniofotómetro.

#### a) Luxómetro

El luxómetro es un dispositivo que mide la iluminancia de una fuente de luz, siendo este conformado inicialmente por un cobertor translúcido que distribuye la luz incidente de manera uniforme sobre su superficie. Seguidamente, se tienen un pequeño sistema conformado por un filtro y un sensor que transforman la señal lumínica en señales eléctricas de tal manera que la respuesta por parte del instrumento sea proporcional a la función  $V(\lambda)$ . Por lo que el luxómetro tiene, entonces, una sensibilidad lumínica similar a la del ojo humano estándar.

Muchos luxómetros traen como parte de su cubierta una protuberancia en forma de anillo que rodea al cobertor translúcido (FIGURA XI) con la finalidad de corregir la respuesta al ángulo de incidencia (FIGURA XII), ya que según la ley del coseno de Lambert (Ecuación 12), la iluminancia sobre una superficie  $A_0$  es proporcional a la iluminancia sobre su área proyectada ( $A_0 \cos\theta$ ). Por tanto, a  $90^\circ$  de incidencia, la iluminancia debería ser nula [23], [26], [27].

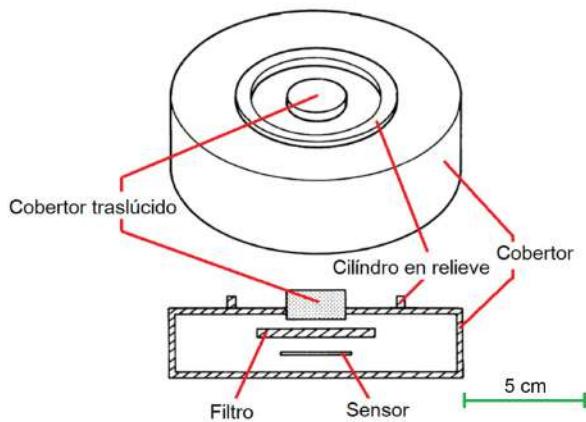


FIGURA XI. Esquema básico del detector de un luxómetro [26]

De la FIGURA XII se tiene que  $A = A_0 \cos\theta$ , además que:

$$\Phi_\nu = \Phi_{\nu 0} \Leftrightarrow E_\nu A = E_{\nu 0} A_0$$

$$E_{\nu 0} = E_{\nu} \cos \theta \quad (12)$$

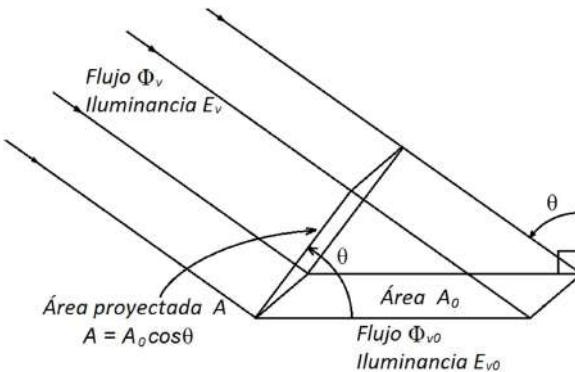


FIGURA XII. Cantidades fotométricas sobre una superficie [23]

### b) Esfera integradora

Este instrumento, también llamado esfera de Ulbricht (por R. Ulbricht, 1849 – 1923), es una esfera hueca, que permite medir en forma simple el flujo luminoso de una fuente de luz en términos de la iluminancia de su cara interior. La principal característica es la alta reflectancia difusa que posee su superficie interna, ya que esta funciona en base a las numerosas reflexiones de la luz, por lo que esta superficie debe ser lo más próxima a una superficie lambertiana (de luminancia constante) y ser lo más homogénea posible [5], [23].

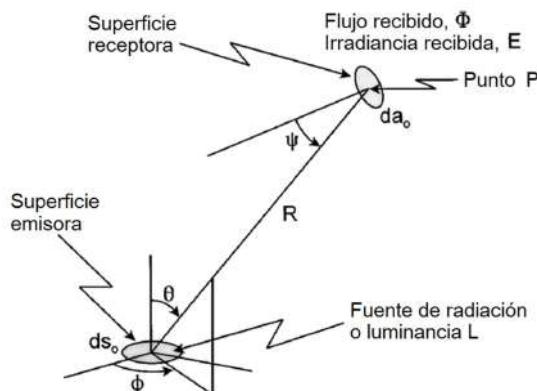


FIGURA XIII. Disposición geométrica de un elemento de superficie emisora y una superficie receptora [23]

Sean dos elementos de superficie, donde uno de ellos es una fuente de luz  $dS_0$ , mientras que el segundo elemento de superficie  $da_0$  recibe la radiación proveniente del primero, así como se muestra en la FIGURA XIII.

A partir de ello, podemos decir que el elemento de ángulo sólido  $d\Omega$  está relacionado con  $da_0$  de la siguiente manera:

$$d\Omega = \frac{da}{R^2} = \frac{da_0 \cos\psi}{R^2} \quad (13)$$

De las ecuaciones 10 y 13 se tiene que:

$$d^2\Phi_\nu = L_\nu \frac{dS_0 \cos\theta da_0 \cos\psi}{R^2}$$

$$\Phi_\nu = \int_{S_0} \int_{A_0} L_\nu \frac{dS_0 \cos\theta da_0 \cos\psi}{R^2} \quad (14)$$

Basado en lo expuesto se define al factor de intercambio  $f$  [23], [28], que relaciona el flujo recibido por un elemento de área y el flujo emitido por otro elemento de área. Para ello se disponen de las ecuaciones 14 y 10, esta última integrada:

$$f_{s-r} = \frac{\Phi_r}{\Phi_s} = \frac{\int_{S_0} \int_{A_0} L_\nu \frac{dS_0 \cos\theta da_0 \cos\psi}{R^2}}{\int_{S_0} \int_{2\pi} L_\nu \cos\theta d\Omega dS_0} \quad (15)$$

Donde:

$\Phi_s$  : flujo luminoso emitido por un elemento de área.

$\Phi_r$  : flujo luminoso recibido por un elemento de área.

$f_{s-r}$  : factor de intercambio.

Como se está asumiendo que la superficie es lambertiana y que las superficies  $A_0$  y  $S_0$  son pequeñas en relación a  $R^2$ , entonces la luminancia es constante, por tanto, de la Ecuación 15 se tiene:

$$f_{s-r} = \frac{\int_{S_0} \int_{A_0} \frac{dS_0 \cos\theta da_0 \cos\psi}{R^2}}{\pi S_0} \quad (16)$$

Al aplicar la Ecuación 16 a la esfera integradora y teniendo en cuenta la FIGURA XIV, se hace un cambio de notación según los elementos que conforman a la esfera, obteniéndose así la Ecuación 17.

$$f_{1-2} = \frac{\int_{A_1} \int_{A_2} \frac{dA_1 \cos\theta_1 dA_2 \cos\theta_2}{S^2}}{\pi A_1} \quad (17)$$

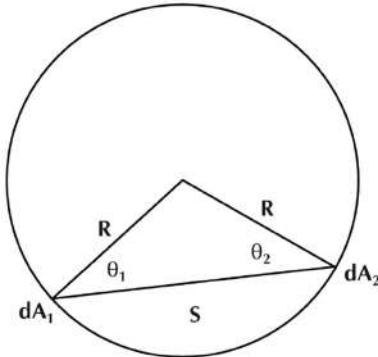


FIGURA XIV. Esquema básico de una esfera integradora ideal [28]

Como  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$  y  $S = 2R\cos\theta$  e integrando sobre  $A_1$ , se tiene:

$$f_{1-2} = \frac{\int_{A_2} \frac{dA_2}{4R^2}}{\pi} = \frac{A_2}{4\pi R^2} = \frac{A_2}{A_T} \quad (18)$$

De la Ecuación 18 se llega a la conclusión que el factor de intercambio solo depende de parámetros geométricos de la esfera, lo cual será de mucha ayuda a continuación.

Para explicar el principio de funcionamiento de la esfera integradora se toma como referencia una esfera perfecta de radio  $R$  (FIGURA XIV), para lo cual se asume que el área total de la superficie interna ( $A_T$ ) está partida en una serie de pequeñas áreas  $a_i$ , tal que  $i = \{0, \dots, n\}$ , con reflectancias  $\rho_i$ , con factores de intercambio  $f_i$  que como ya se ha discutido, se refiere a la relación entre un elemento de área  $a_i$  y el área interna total de la esfera  $A_T$  [29]. Entonces, sea la reflectancia promedio:

$$\bar{\rho} = \sum_{i=0}^n \rho_i f_i \quad (19)$$

Sobre cada área  $a_i$  incide el flujo luminoso  $\Phi_0$  de la fuente, reflejándose  $\rho_i \Phi_0$ , luego  $f_i \rho_i \Phi_0$  incide sobre cada  $a_i$ , o sea que, el primer flujo incidente indirecto es:

$$\Phi_1 = \sum_{i=0}^n \rho_i f_i \Phi_0$$

Entonces de la Ecuación 19 se tiene que:

$$\Phi_1 = \bar{\rho} \Phi_0 \quad (20)$$

Luego  $\rho_i \bar{\rho} \Phi_0$  es reflejado por cada  $a_i$ , entonces  $f_i \rho_i \bar{\rho} \Phi_0$  incide sobre cada  $a_i$ , por lo que el segundo flujo incidente indirecto es:

$$\begin{aligned}\Phi_2 &= \sum_{i=0}^n \rho_i f_i \bar{\rho} \Phi_0 \\ \Phi_2 &= \bar{\rho}^2 \Phi_0\end{aligned}\tag{21}$$

Luego  $\rho_i \bar{\rho}^2 \Phi_0$  es reflejado por cada  $a_i$ , entonces  $f_i \rho_i \bar{\rho}^2 \Phi_0$  incide sobre cada  $a_i$ , por lo que el tercer flujo incidente indirecto es:

$$\begin{aligned}\Phi_3 &= \sum_{i=0}^n \rho_i f_i \bar{\rho}^2 \Phi_0 \\ \Phi_3 &= \bar{\rho}^3 \Phi_0\end{aligned}\tag{22}$$

Por lo que se infiere que un  $n$ -simo flujo incidente indirecto sería de la forma:

$$\Phi_n = \bar{\rho}^n \Phi_0\tag{23}$$

De las ecuaciones 20, 21, 22 y 23 se obtiene el flujo indirecto total:

$$\begin{aligned}\Phi_T &= \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\rho}^n \Phi_0 \\ \Phi_T &= \bar{\rho} \Phi_0 + \bar{\rho}^2 \Phi_0 + \bar{\rho}^3 \Phi_0 + \dots \\ \Phi_T &= \bar{\rho} \Phi_0 (1 + \bar{\rho} + \bar{\rho}^2 + \dots) \\ \Phi_T &= \Phi_0 \frac{\bar{\rho}}{1 - \bar{\rho}}\end{aligned}$$

Dividiendo ambos miembros entre el área total  $A_T$ :

$$\begin{aligned}\frac{\Phi_T}{A_T} &= \frac{\Phi_0}{A_T} \frac{\bar{\rho}}{1 - \bar{\rho}} \\ E_T &= \frac{\Phi_0}{A_T} \frac{\bar{\rho}}{1 - \bar{\rho}}\end{aligned}\tag{24}$$

Si toda la superficie interna presenta una reflectancia uniforme  $\rho$  entonces  $\bar{\rho} = \rho$  por

lo que la Ecuación 24 se expresa como:

$$E_T = \frac{\Phi_0}{A_T} \frac{\rho}{1-\rho} \quad (25)$$

De la Ecuación 25 al expresar la relación entre la iluminancia indirecta total ( $E_T$ ) y el flujo luminoso ( $\Phi_0$ ) de la fuente, se obtiene una constante que solo depende del área de la superficie interna ( $A_T$ ) de la esfera y de su reflectancia ( $\rho$ ) y a esta se le conoce como la constante de la esfera ( $K$ ) que se muestra en la Ecuación 26.

$$K = \frac{E_T}{\Phi_0} = \frac{1}{A_T} \frac{\rho}{1-\rho} \quad (26)$$

Para una esfera integradora ideal se cumple todo lo que se ha estado discutiendo hasta el momento, por lo que la constante  $K$  es invariante ante cualquier lámpara ideal que esté dentro de ella, para ello se requiere de una lámpara de referencia cuyo flujo luminoso se conozca; entonces de la Ecuación 26 se tiene que:

$$\begin{aligned} K &= \frac{E_r}{\Phi_r} = \frac{E_t}{\Phi_t} \\ \Phi_t &= \frac{E_t}{E_r} \Phi_r \end{aligned} \quad (27)$$

Donde:

$\Phi_t$  : flujo luminoso de la lámpara de prueba.

$\Phi_r$  : flujo luminoso de la lámpara de referencia.

$E_t$  : iluminancia difusa de la lámpara de prueba.

$E_r$  : iluminancia difusa de la lámpara de referencia.

Sin embargo, la geometría de una esfera integradora real está compuesta por zonas cuya reflectancia no es la misma sobre toda su superficie interna. Además que, la absorción de radiación por parte de las lámparas de prueba y de referencia son diferentes entre sí. Razón por la cual, la constante de la esfera ( $K$ ) también cambia al colocar una lámpara diferente. Este problema se corrige añadiendo una lámpara auxiliar, obteniendo una relación

entre los flujos luminosos de la lámpara de prueba y de la lámpara de referencia, tomando como pivote al flujo luminoso de la lámpara auxiliar.

Aplicando la Ecuación 27, se tienen los siguientes arreglos [5], [28]:

- Lámpara auxiliar – lámpara de prueba (Ecuación 28).
- Lámpara auxiliar – lámpara de referencia (Ecuación 29).

$$\Phi_t = \frac{E_t}{E_{at}} \Phi_a \quad (28)$$

$$\Phi_a = \frac{E_{ar}}{E_r} \Phi_r \quad (29)$$

Finalmente, de las ecuaciones 28 y 29 se obtiene:

$$\Phi_t = \frac{E_t}{E_r} \frac{E_{ar}}{E_{at}} \Phi_r \quad (30)$$

Donde:

$\Phi_a$  : flujo luminoso de la lámpara auxiliar.

$E_{at}$  : iluminancia difusa de la lámpara auxiliar con la lámpara de test dentro de la esfera integradora.

$E_{ar}$  : iluminancia difusa de la lámpara auxiliar con la lámpara de referencia dentro de la esfera integradora.

En la Ecuación 30 se ve la relación que guardan el flujo luminoso de una lámpara de prueba con el flujo luminoso de la lámpara de referencia (valor conocido), permitiendo esto medir el flujo luminoso de una lámpara, midiendo iluminancias indirectas (difusas), es decir, aquellas que son captadas luego de múltiples reflexiones por una región de la esfera integradora que no recibe la radiación directa de cualquiera de las fuentes luminosas, sean estas la lámpara patrón, la lámpara auxiliar o la lámpara cuyo flujo se quiere medir.

Los fabricantes suelen sugerir una Ecuación similar, pero mostrando las señales de los detectores en lugar de las iluminancias, así como se ve en la Ecuación 31 [28]:

$$\Phi_t = \frac{D_t}{D_r} \frac{D_{ar}}{D_{at}} \Phi_r \quad (31)$$

Donde:

$D_t$  : señal del detector de la lámpara de prueba.

$D_r$  : señal del detector de la lámpara de referencia.

$D_{at}$  : señal del detector de la lámpara auxiliar con la lámpara de test dentro de la esfera integradora.

$D_{ar}$  : señal del detector de la lámpara auxiliar con la lámpara de referencia dentro de la esfera integradora.

Las medidas espectrales de una lámpara en la esfera integradora se rigen bajo la Ecuación 32, solo que al haber un espectroradiómetro como sensor; las unidades de medida se expresan en  $W \cdot nm^{-1}$  y los factores involucrados se expresan en función de longitudes de onda [28].

$$\Phi_t(\lambda) = \frac{D_t(\lambda)}{D_r(\lambda)} \frac{D_{ar}(\lambda)}{D_{at}(\lambda)} \Phi_r(\lambda) \quad (32)$$

### c) Goniofotómetro

El goniofotómetro permite obtener la curva fotométrica de una luminaria, siendo esta la distribución espacial de la intensidad luminosa. Como ejemplo se tienen los resultados tras el uso de un goniofotómetro para el análisis de lámparas LED destinadas al uso del alumbrado público en algunas localidades de Polonia [30]. Se utilizan dos tipos de luxómetros con errores en la corrección espectral ( $f_1'$ ) [31] de 3,16% y de 5,62%, cuyos datos fueron ploteados, obteniendo los planos  $C0 - C180$  y  $C90 - C270$  (FIGURA XV).

Este instrumento consiste en un sistema mecánico en el que un fotómetro y/o la luminaria se mueven uno respecto al otro de tal modo que se hace un barrido sobre una superficie esférica imaginaria con la lámpara ubicada en el centro. Existen tres tipos de goniofotómetro, el primero consiste en un fotómetro que se mantiene estático, mientras que, a una distancia fija está la luminaria que va rotando en torno a dos ejes perpendiculares entre

sí. El segundo tipo consiste en una luminaria fija con el fotómetro rotando en torno a ella con dos grados de libertad. Finalmente, el tercer tipo consta de una luminaria que va rotando sobre si misma en torno a un eje, mientras que el fotómetro rota en torno a la luminaria, sobre un eje perpendicular a ella [32].

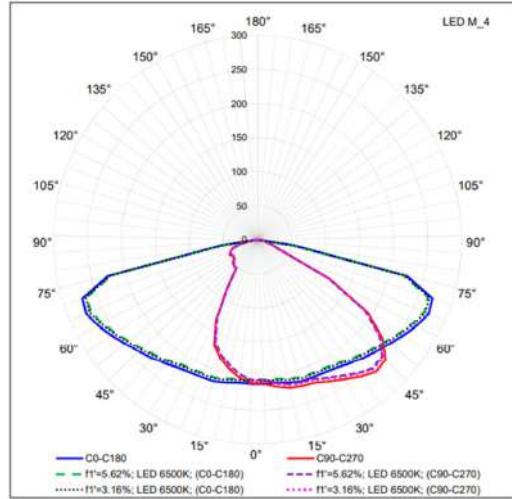


FIGURA XV. Curvas fotométricas para una lámpara LED de alumbrado público [30]

Los ángulos de rotación que conforman los dos grados de libertad son el polar  $\theta$  y azimutal  $\varphi$  los cuales son mostrados en la FIGURA XVI.

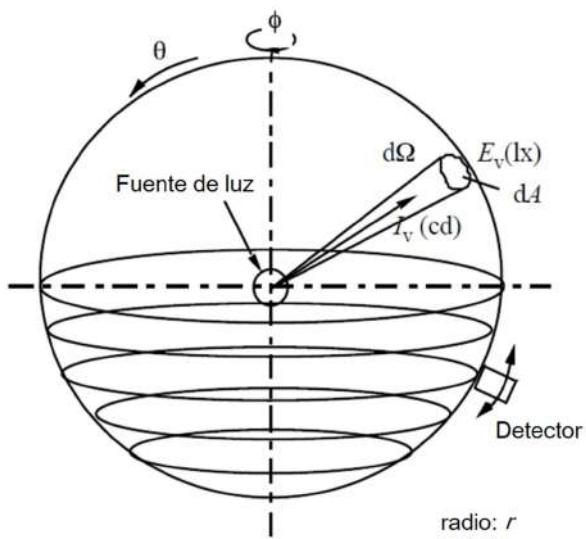


FIGURA XVI. Esquema de un goniofotómetro [5]

Por otro lado, la distancia mínima entre el fotómetro y la fuente de luz depende de varios factores como: las dimensiones de la luminaria y la respuesta correcta del fotómetro en términos de la dirección [33]. Se tienen algunas recomendaciones de entidades competentes, por ejemplo, que la distancia debe ser mayor a cinco veces las dimensiones de la

fuente (Illuminating Engineering Society of North America - IESNA) o que la distancia debe ser mayor a quince veces las dimensiones de la fuente (CIE) [5].

Mediante el uso del goniofotómetro es posible determinar el flujo luminoso de una luminaria. Observando la FIGURA XVI se puede establecer la expresión matemática (Ecación 33) que permite el cálculo del flujo luminoso partiendo de la iluminancia obtenida por el detector [5], [33].

$$\Phi_{\nu} = \int E_{\nu} dA = r^2 \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} E_{\nu}(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (33)$$

#### D. Colorimetría

Es la ciencia que estudia la medida del color, tratando de prescindir de subjetividades por medio de un sistema numérico. Tanto Young como Helmholtz y Maxwell comenzaron los estudios de esta ciencia a inicios del siglo XIX, para luego ser formalizada en 1931 por la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) [34].

##### 1) Coordenadas y diagramas de cromaticidad

A finales de la década de 1920 J. Guild y W.D. Wright realizaron un experimento que consistió en el emparejamiento del color de una fuente de luz monocromática con la combinación de tres fuentes de luz (roja, verde y azul) de intensidad variable (FIGURA XVII). En un inicio este experimento fue realizado tomando en cuenta un ángulo de visión de un observador entre los  $1^\circ$  y  $4^\circ$ , al cual, luego en 1931 se le llamó observador estándar de  $2^\circ$ . Posteriormente en 1964 se volvió a realizar el mismo experimento, pero tomando en cuenta un ángulo de visión de un observador mayor a los  $4^\circ$  al que pasó a llamarse observador estándar de  $10^\circ$ .

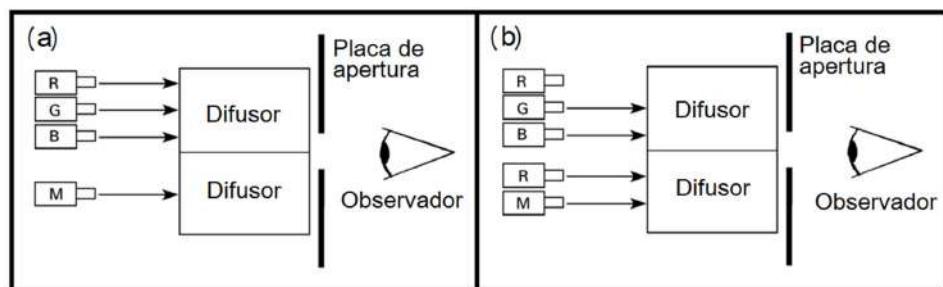


FIGURA XVII. Arreglos experimentales para la obtención de los CMFs (a) Combinación simple de colores primarios. (b) Reducción de saturación de la fuente de luz monocromática utilizando luz roja [34]

### a) Sistema de color RGB CIE 1931

Basándose en el experimento realizado por J. Guild y W.D. Wright, se obtuvieron las funciones de emparejamiento de color (Color Matching Functions - CMFs),  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  y  $\bar{b}(\lambda)$  correspondientes a los estímulos de color rojo [R], verde [G] y azul [B]; los cuales corresponden a las longitudes de onda de  $\lambda_R = 700,0 \text{ nm}$ ,  $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$  y  $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$ . El símbolo [ ] corresponde a un estímulo de color en concreto [22], [34], las CMFs pueden ser apreciadas en la FIGURA XVIII.

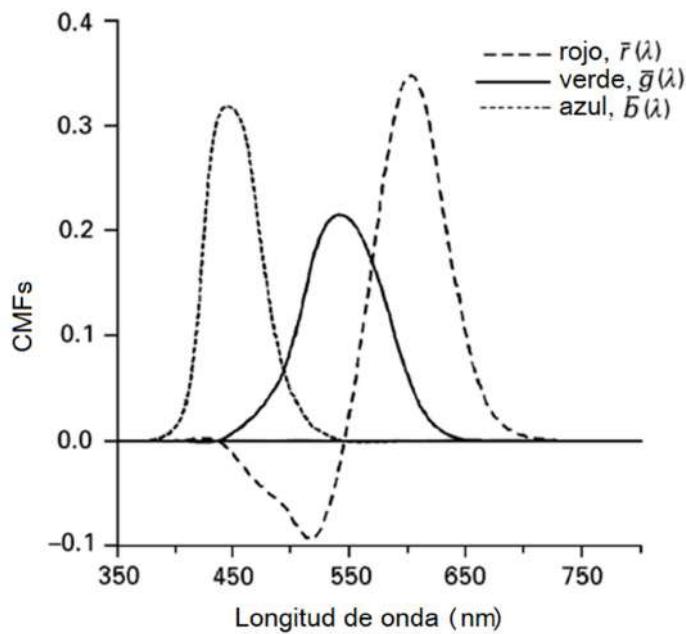


FIGURA XVIII. Color Matching Functions (CMFs) obtenidas en el emparejamiento de fuentes luminosas monocromáticas [34]

La FIGURA XVII(a) muestra la configuración respectiva en la que  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  y  $\bar{b}(\lambda)$  son positivas, mientras que la FIGURA XVII(b) se muestra la configuración en la que  $\bar{r}(\lambda)$  es “negativa”, este arreglo es necesario para poder realizar el emparejamiento al reducir la saturación de la luz monocromática. Ya que hay longitudes de onda que no pueden obtenerse por una combinación simple de colores primarios [34].

La proporción entre las cantidades en unidades fotométricas de los estímulos [R], [G] y [B] son de 1,0000, 4,5907 y 0,0601 respectivamente; que corresponden al estímulo de luz blanca del espectro de equienergía [22].

Según lo visto hasta ahora, se puede expresar el emparejamiento de estímulos por

medio de una Ecuación colorimétrica mostrada en la Ecuación 34:

$$[M] = \bar{r}(\lambda)[R] + \bar{g}(\lambda)[G] + \bar{b}(\lambda)[B] \quad (34)$$

La igualdad simboliza el emparejamiento de colores y las sumas representan a la adición de cada estímulo componente.

Por otro lado, haciendo un análisis de la siguiente situación. Si se tiene una luz monocromática  $[M_{\lambda_1}]$  correspondiente a una longitud de onda  $\lambda_1$  y a una potencia radiante  $f_1$  (en  $W$ ) y otra luz monocromática  $[M_{\lambda_2}]$  con una longitud de onda  $\lambda_2$  y una potencia radiante  $f_2$  [22], entonces se tiene que:

$$\begin{aligned} f_1[M_{\lambda_1}] &= f_1(\bar{r}_{\lambda_1}[R] + \bar{g}_{\lambda_1}[G] + \bar{b}_{\lambda_1}[B]) \\ f_2[M_{\lambda_2}] &= f_2(\bar{r}_{\lambda_2}[R] + \bar{g}_{\lambda_2}[G] + \bar{b}_{\lambda_2}[B]) \end{aligned} \quad (35)$$

Para obtener un color  $[M]$  se recurre a la adición de los estímulos obtenidos en la Ecuación 35, por lo que se tiene:

$$\begin{aligned} [M] &= f_1[M_{\lambda_1}] + f_2[M_{\lambda_2}] \\ [M] &= f_1(\bar{r}_{\lambda_1}[R] + \bar{g}_{\lambda_1}[G] + \bar{b}_{\lambda_1}[B]) + f_2(\bar{r}_{\lambda_2}[R] + \bar{g}_{\lambda_2}[G] + \bar{b}_{\lambda_2}[B]) \\ [M] &= (f_1\bar{r}_{\lambda_1} + f_2\bar{r}_{\lambda_2})[R] + (f_1\bar{g}_{\lambda_1} + f_2\bar{g}_{\lambda_2})[G] + (f_1\bar{b}_{\lambda_1} + f_2\bar{b}_{\lambda_2})[B] \end{aligned}$$

Generalizando para  $[M_{\lambda_n}]$  luces monocromáticas:

$$\begin{aligned} [M] &= (f_1\bar{r}_{\lambda_1} + \cdots + f_n\bar{r}_{\lambda_n})[R] \\ &\quad + (f_1\bar{g}_{\lambda_1} + \cdots + f_n\bar{g}_{\lambda_n})[G] \\ &\quad + (f_1\bar{b}_{\lambda_1} + \cdots + f_n\bar{b}_{\lambda_n})[B] \end{aligned}$$

$$[M] = \sum_{i=1}^n f_i\bar{r}_{\lambda_i}[R] + \sum_{i=1}^n f_i\bar{g}_{\lambda_i}[G] + \sum_{i=1}^n f_i\bar{b}_{\lambda_i}[B] \quad (36)$$

De la Ecuación 36 se obtienen los valores triestímulo  $R$ ,  $G$  y  $B$ :

$$\begin{aligned}
R &= \sum_{i=1}^n f_i \bar{r}_{\lambda_i} \\
G &= \sum_{i=1}^n f_i \bar{g}_{\lambda_i} \\
B &= \sum_{i=1}^n f_i \bar{b}_{\lambda_i}
\end{aligned} \tag{37}$$

Con lo que, teniendo una fuente de luz con una distribución espectral  $P(\lambda)$  con unidades  $W \cdot nm^{-1}$ , entonces es posible tener los valores triestímulo  $R$ ,  $G$  y  $B$  solamente sustituyendo  $P(\lambda) \Delta\lambda$  por  $f_i$  [22] en la Ecuación 37:

$$\begin{aligned}
R &= \sum_{i=1}^n P(\lambda) \bar{r}_{\lambda_i} \Delta\lambda \\
G &= \sum_{i=1}^n P(\lambda) \bar{g}_{\lambda_i} \Delta\lambda \\
B &= \sum_{i=1}^n P(\lambda) \bar{b}_{\lambda_i} \Delta\lambda
\end{aligned} \tag{38}$$

Mientras que, para una distribución continua se tendría:

$$\begin{aligned}
R &= \int_{vis} P(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \\
G &= \int_{vis} P(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \\
B &= \int_{vis} P(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda
\end{aligned} \tag{39}$$

Entonces, ahora se puede expresar al estímulo de luz monocromática  $[M]$  del experimento de emparejamiento de color como una Ecuación monocromática de la siguiente forma:

$$[M] = R[R] + G[G] + B[B] \tag{40}$$

Mientras que para el caso en que  $\bar{r}$  es negativa, la Ecuación monocromática tendrá la forma:

$$[M] + R[R] = G[G] + B[B]$$

De donde se tiene que:

$$[M] = -R[R] + G[G] + B[B] \quad (41)$$

Analizando a las Ecuaciones 40 y 41 como si formaran parte de un espacio vectorial, se tendría un espacio de color en tres dimensiones en las que el “vector”  $[M]$  sería el resultado de una “suma vectorial” de las componentes  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$ , además al tener un plano de la forma  $R + G + B = 1$ , el cual al intersecarse con  $[M]$  se genera el punto  $(r, g, b)$  [22], por lo que se cumpliría la siguiente relación:

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{(R+G+B)} \\ g &= \frac{G}{(R+G+B)} \\ b &= \frac{B}{(R+G+B)} \end{aligned} \quad (42)$$

De la Ecuación 42 se deduce que  $r + g + b = 1$ , de lo cual se puede prescindir de  $b$  para poder representar a  $[M]$  en un plano de color  $rg$ .

Al unir todos los puntos generados por  $[M]$  a lo largo de todo el espectro visible sobre el plano  $rg$  se obtiene una curva llamada curva espectral y la recta que une sus extremos es llamada límite purpura (FIGURA XIX). Dentro de esta figura cerrada se hallan todos los colores reales que pueden existir en base al espectro visible, entre ellos está el blanco del espectro de equiennergía que se ubica en el punto  $W_E^{(1/3; 1/3)}$  en el plano  $rg$  [22].

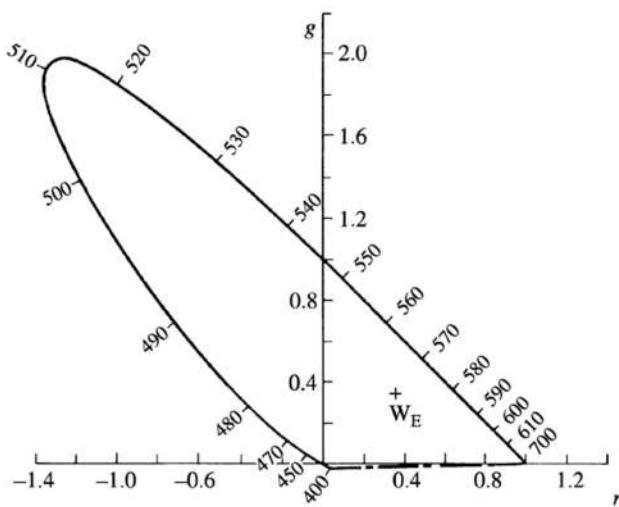


FIGURA XIX. Diagrama de cromaticidad  $rg$  [22]

La observación más notoria respecto a este sistema de especificación de color es, que parte de la distribución de los colores están sobre ejes negativos del plano. Por lo que se cambió del sistema *RGB* a uno de tipo *XYZ* en el que todo el diagrama de cromaticidad esté únicamente sobre ejes positivos.

**b) Sistema de color *XYZ CIE 1931* y  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$**

El sistema *RGB* dificultaba los cálculos, por ello, en base a la propuesta de D. B. Judd se pasó de los CMFs  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  y  $\bar{b}(\lambda)$  a los  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$  (FIGURA XX) de tal manera que  $\bar{y}(\lambda)$  coincide con la función espectral de eficiencia luminosa  $V(\lambda)$ , lo cual permite directamente que el valor triestímulo  $Y$  exprese una cantidad fotométrica [22].

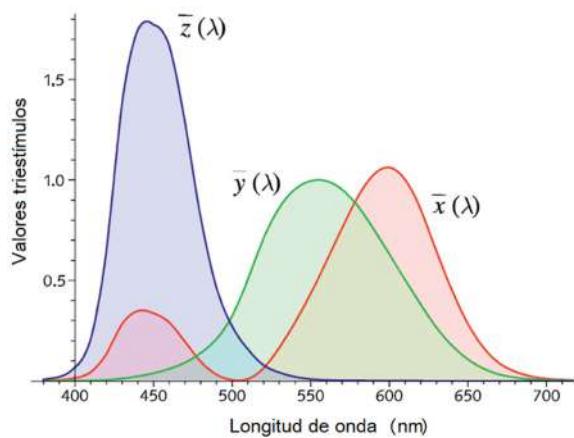


FIGURA XX. CMFs en sistema *XYZ CIE 1931* [22]

El sistema de conversión de los valores triestímulos  $R$ ,  $G$  y  $B$  hacia los  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  y viceversa, se muestran en las Ecuaciones 43 y 44 respectivamente:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,7689 & 1,7517 & 1,1302 \\ 1,0000 & 4,5907 & 0,0601 \\ 0,0000 & 0,0565 & 5,5943 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (43)$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,7689 & 1,7517 & 1,1302 \\ 1,0000 & 4,5907 & 0,0601 \\ 0,0000 & 0,0565 & 5,5943 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (44)$$

Las Ecuaciones 43 y 44 también son aplicables a las CMFs de los sistemas estudiados hasta ahora (*RGB* y *XYZ*) [22]. Haciendo una similitud con la Ecuación 39, se tiene:

$$\begin{aligned} X &= k \int_{vis} \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{vis} \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{vis} \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (45)$$

Donde  $k$  es constante, además que  $\Phi(\lambda) = R(\lambda)P(\lambda)$  o  $\Phi(\lambda) = T(\lambda)P(\lambda)$ , donde  $P(\lambda)$  es la distribución espectral de una fuente luminosa,  $R(\lambda)$  es la reflectancia espectral de un cuerpo y  $T(\lambda)$  es la transmitancia espectral de un cuerpo.

Luego, así como se mencionó en 1964, se volvió a realizar el experimento de emparejamiento de color, pero tomando un ángulo de apertura mayor a los  $4^\circ$ , estableciéndose así el sistema de color  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$  al que le corresponde las CMFs  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$  y  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ . En la FIGURA XXI se muestran las CMFs para el sistema *XYZ* y para el sistema  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$  [22], [34].

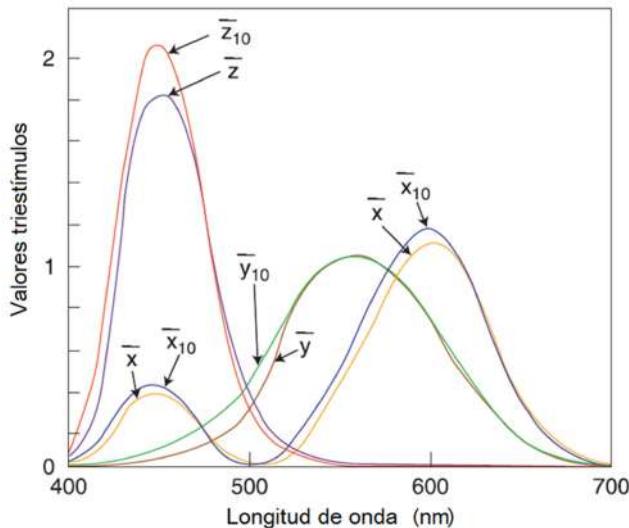


FIGURA XXI. CMFs respectivos a los sistemas *XYZ* y  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$  [34]

Los diagramas de cromaticidad para ambos sistemas son bastante parecidos, así como se muestran en la FIGURA XXII.

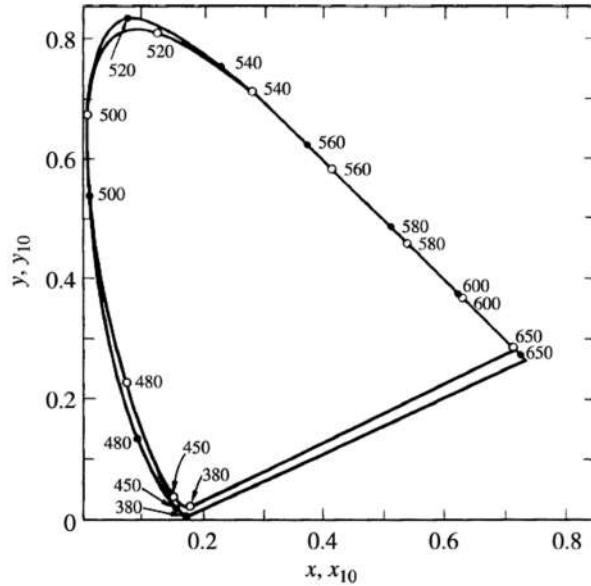


FIGURA XXII. Diagrama de cromaticidad de los sistemas  $XYZ$  (círculos cerrados) y  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$  (círculos abiertos) [22]

## 2) Diagramas de cromaticidad uniforme

Los diagramas de cromaticidad pertenecientes a los sistemas  $XYZ$  y  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$  en diferentes zonas de sus superficies, donde dos colores presentan la misma pequeña diferencia de luminancia percibida, presentando distancias no uniformes unas con otras. Por lo que D. L. MacAdam desarrolló experimentos más detallados con lo que se obtuvieron las elipses de MacAdam que muestran la no uniformidad de los diagramas de cromaticidad del sistema  $XYZ$  [22] los cuales pueden verse en la FIGURA XXIII.

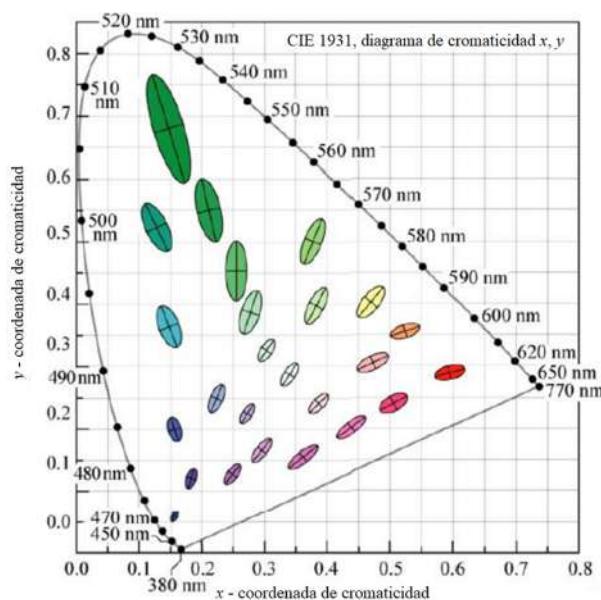


FIGURA XXIII. Elipses de MacAdam en el diagrama de cromaticidad  $xy$ , estas están magnificadas diez veces [25]

La CIE, basándose en la propuesta de MacAdam, adoptó el diagrama de cromaticidad  $uv$ . Posteriormente se propuso multiplicar a la coordenada  $v$  por el factor de 1,5 para mejorar aún más la uniformidad del color, con lo que se estableció el diagrama de cromaticidad  $u'v'$ , cuyas elipses de MacAdam presentan una distribución más uniforme (FIGURA XXIV). Sus sistemas de transformación respecto al sistema  $XYZ$  se muestran en las Ecuaciones 46 y 47 [22]:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4x}{(-2x + 12y + 3)} \\ v' &= \frac{9y}{(-2x + 12y + 3)} \end{aligned} \quad (46)$$

O también:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4X}{(X + 15Y + 3Z)} \\ v' &= \frac{9Y}{(X + 15Y + 3Z)} \end{aligned} \quad (47)$$

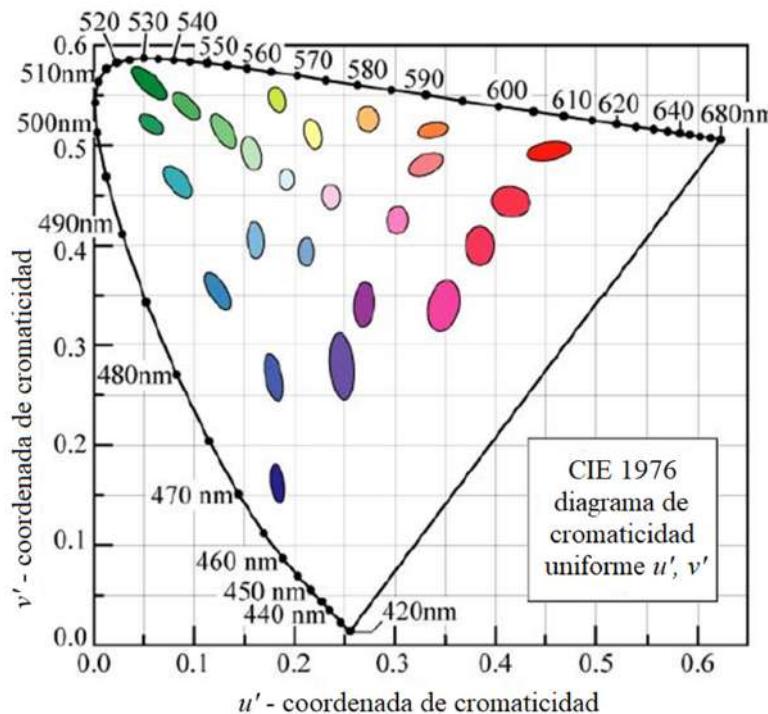


FIGURA XXIV. Elipses de MacAdam en el diagrama de cromaticidad  $u'v'$ , estas están magnificadas diez veces [25]

### 3) Propiedades de cromaticidad

Entre las propiedades de cromaticidad, se hace mención de las más resaltantes acorde a los fines de este trabajo.

#### a) Temperatura de color

La temperatura de color se define como la temperatura de un radiador Planckiano (cuerpo negro) cuya radiación tiene la misma cromaticidad que aquella de un estímulo dado [2].

#### b) Temperatura de color correlacionada ( $T_{cp}$ )

La temperatura de color correlacionada (CCT) se utiliza cuando la cromaticidad de una fuente de luz se encuentra muy próxima a una curva de Planck (FIGURA XXV), la que fue definida por la CIE en su diagrama de cromaticidad CIE 1960 ( $uv$ ). La unidad a la que se mide la CCT es el Kelvin ( $K$ ). Posteriormente McCamy propuso un método de cálculo polinomial del CCT basado en el sistema CIE 1931 ( $xy$ ) [2], [22] así como se muestra en las Ecuaciones 48 y 49:

$$T_{cp} = -449n^3 + 3525n^2 - 6823,3n + 5520,33 \quad (48)$$

Donde:

$$n = (x - 0,3320)/(y - 0,1858) \quad (49)$$

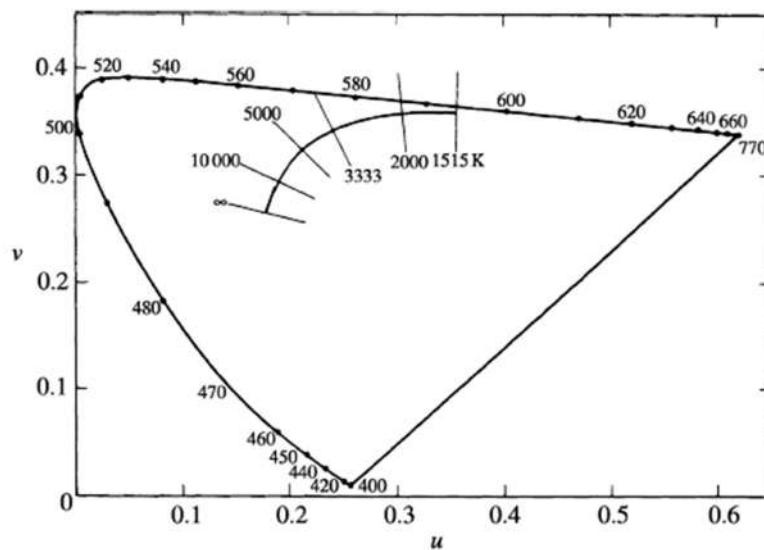


FIGURA XXV. Curva de Planck y sus curvas de isometría [22]

En la FIGURA XXV se observan unas líneas de isometría sobre la curva de Planck, las cuales indican los intervalos de error donde se puede ubicar un punto de color dentro del diagrama de cromaticidad de tal modo que se le pueda calcular una CCT [2].

## E. Lámparas eléctricas

### 1) Historia de las lámparas eléctricas

Desde milenios el ser humano ha dependido de sistemas de iluminación artificiales que le permitían realizar actividades en lugares y momentos en los que la luz natural estaba ausente. Una evidencia muy antigua del uso de este tipo de sistemas, data de aproximadamente hace 10000 años, ya que en 1991 se encontró a un hombre del periodo neolítico que estuvo preservado en un glaciar de los Alpes que traía consigo todo un juego de implementos que le permitía producir fuego, como rocas de pirita, materiales secos de origen vegetal, entre otros. En la antigua Roma se hacía uso de brea, la cual era untada en las antorchas para su posterior combustión. Así como hay también evidencia del uso de aceites como combustible en Mesopotamia hace más de 4500 años. De manera sucesiva y a través de los siglos se fueron creando formas más sofisticadas de producir luz a base de lámparas de gas, kerosene, esterina, etc [35].

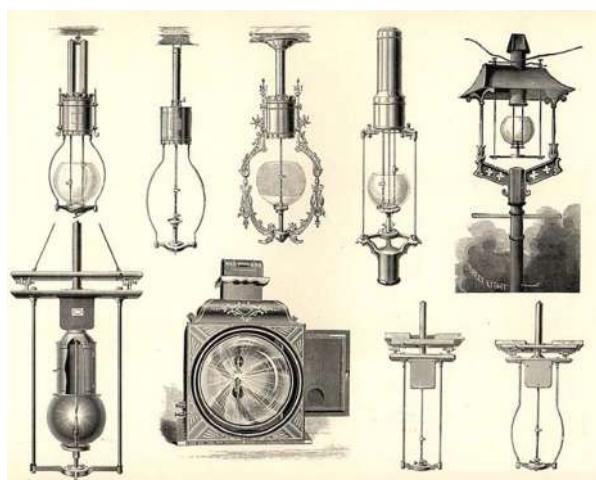


FIGURA XXVI. Diferentes modelos de lámparas de arco [36]

No fue sino hasta la primera mitad del siglo XIX, cuando se hizo conocida la lámpara de arco, la cual consistía en dos electrodos de carbón y en un arco eléctrico que se formaba entre ellos; emitiendo un cierto brillo. En sus inicios esta tecnología no era lo suficientemente práctica, debido a que las fuentes eléctricas no eran lo suficientemente potentes. Sin embargo, luego del descubrimiento de la inducción electromagnética en 1831 por parte de Michael

Faraday, se comenzó con la producción de las máquinas de dínamo eléctricas con las que se podía energizar a las lámparas de arco. El inconveniente de alimentarlas con corriente continua, era que generaba un desgaste desigual de los electrodos. Es así que, en 1876 Paul Jablochkoff diseñó una lámpara de arco, la cual consistía en dos electrodos de carbón separados por una delgada capa de yeso con la finalidad de reducir el espacio entre ellos sin que estos entren en contacto, además de energizar a la lámpara con corriente alterna, consiguiendo que los electrodos se consumieran de manera uniforme. Posteriormente, se fueron desarrollando mejoras, siendo muy útiles en espacios muy amplios como estadios, fábricas, entre otros, pero presentando un gran problema para espacios pequeños como habitaciones u oficinas por su brillo excesivo [35]. En la FIGURA XXVI se observan algunas de las lámparas de arco utilizadas en su momento.

Paralelamente al uso del gas como combustible para producir iluminación, la bombilla incandescente ya había estado siendo desarrollada desde el siglo XIX, de tal manera que, Edison en 1879 construyó e hizo pruebas con sus bombillas. Un año después Joseph Swan mejoró el diseño de estas lámparas, sin embargo la eficacia luminosa con la que contaban era de aproximadamente  $1,7 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ . En la década de 1920 se mejoró más aún el diseño de las lámparas incandescentes al utilizar filamentos de tungsteno dentro de una bombilla rellenada con un gas inerte, incrementando el tiempo de vida del filamento, llegando a obtener una eficacia luminosa cercana a los  $15 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$  y manteniéndose alrededor de ese orden hasta nuestros días [35], [37].

En la FIGURA XXVII se aprecia a la bombilla centenaria que se ha mantenido encendida de manera ininterrumpida desde 1901, actualmente se encuentra en la estación de bomberos de Livermore, California, Estados Unidos [38].



FIGURA XXVII. Bombilla centenaria, encendida desde 1901 en California, EEUU [38]

La lámpara de arco fue la precursora de lo que más tarde sería la lámpara de descarga. Una de las primeras aplicaciones de este tipo de lámparas fue introduciendo mercurio dentro de la cámara de una lámpara de arco a baja presión, el cual producía un brillo de color azul verdoso. Estas lámparas se hicieron comerciales en 1890 y contaban con una eficacia luminosa de 15 a 20  $lm \cdot W^{-1}$ , las cuales tenían mayor aplicación en el ámbito de la industria fotográfica [35]. A partir de ello se pensó en la elaboración de lámparas que contaran con un bombillo lleno de gas que puedan producir luz de tal manera que se pueda mejorar la eficacia y el tiempo de vida de las lámparas.

En 1915 George Claude patentó las lámparas de neón ya que años antes se estuvo desarrollando técnicas para la licuefacción del aire y su descomposición para la obtención de elementos más puros, haciendo posible la disponibilidad del gas neón [37]. Luego, en la década de 1920 se probó experimentalmente que el sodio a bajas presiones podía ser utilizado para la elaboración de lámparas de descarga con una alta eficacia, pero al querer fabricar lámparas de sodio a altas presiones, se observó que el vidrio y el cuarzo eran dañados, por lo que esta versión fue descartada. Las lámparas de sodio fueron destinadas principalmente al alumbrado público debido a su brillo amarillento y a su alta eficacia lumínosa de 50 a 80  $lm \cdot W^{-1}$ .

En 1932 las lámparas de mercurio a alta presión con una eficacia de 36  $lm \cdot W^{-1}$  fueron puestas en uso en las calles de Wenbley, Inglaterra. Un par de años después en 1934, General Electric Company hizo pruebas con una de las primeras lámparas fluorescentes que producía un brillo verdoso con 35  $lm \cdot W^{-1}$  de eficacia y gracias a este avance en 1938 la misma compañía sacó al mercado sus lámparas fluorescentes, las cuales contenían fósforos que producían brillos cálidos y fríos. Años más tarde en 1960 General Electric por medio de Gilbert Reiling, uno de sus investigadores, producen unas lámparas experimentales basadas en el uso de sodio y yoduro de talio, por lo que en 1962 se anuncia la aparición de las lámparas de halogenuros metálicos y en 1965 se lanzaron al mercado las lámparas de descarga de sodio a alta presión debido al desarrollo de materiales policristalinos que poseían la capacidad de contener sodio a altas presiones [35], [37].

En la FIGURA XXVIII se observa cómo ha ido evolucionando el desarrollo de las lámparas eléctricas desde el siglo XIX hasta nuestros tiempos.

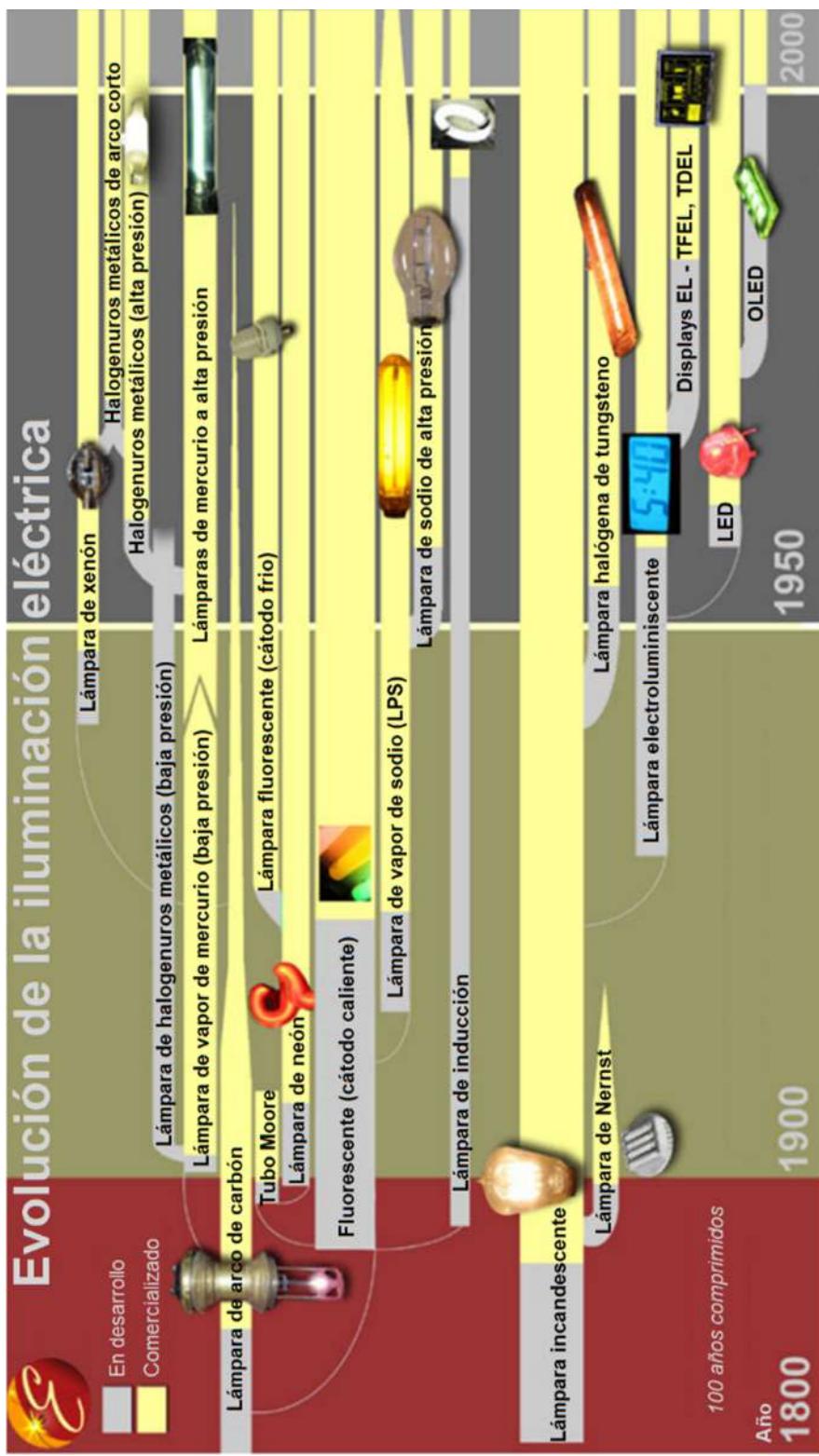


FIGURA XXVIII. Evolución de la iluminación eléctrica [36]

## 2) Lámpara incandescente

La incandescencia se da cuando un cuerpo resistivo sometido a una diferencia de potencial genera la excitación térmica de sus átomos, parte de la energía cinética térmica es liberada por emisión de fotones. Si esta emisión se da dentro del rango visible, entonces se dice que el cuerpo está incandescente. Un material adecuado para el desarrollo de lámparas incandescentes debe ser un metal con una alta temperatura de fusión y con un bajo nivel de presión de vaporización, por lo que el tungsteno es un elemento que cumple con esas características, teniendo 3680 K como punto de fusión. Su eficacia luminosa es de aproximadamente  $33 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$  [39],

De acuerdo a la estructura de la lámpara incandescente mostrada en la FIGURA XXIX, se cuentan con los siguientes elementos:

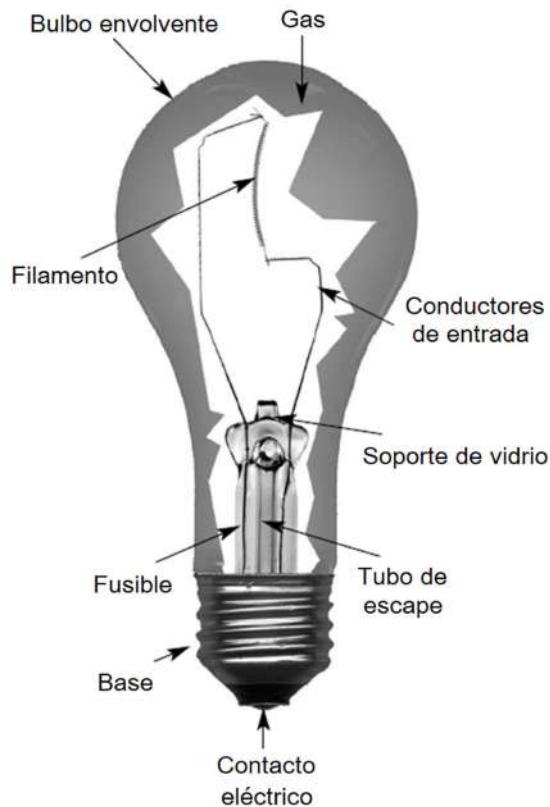


FIGURA XXIX. Estructura de la lámpara incandescente [39]

○ **Bulbo envolvente:** Está hecho de vidrio, sílice y borosilicato para poder soportar temperaturas cercanas a los 400 °C, este cumple con proteger al filamento del oxígeno y del vapor de agua que están presentes en el aire para evitar su oxidación.

○ **Gas:** El argón al ser un gas inerte no reacciona con el filamento de tungsteno y además se le suele añadir un poco de nitrógeno para impedir la formación de arcos eléctri-

cos. Para lámparas que están diseñadas con mayor tiempo de vida se suele usar el kriptón en vez del argón, por lo que su costo es mucho mayor, por otro lado, para las bombillas menores a los 25 W no se le suele añadir algún gas, dejando el interior del bulbo en un estado de vacío.

○ **Filamento de tungsteno:** Tiene su característica forma helicoidal para poder retener de forma más eficiente la energía térmica. Este elemento se va degradando de manera progresiva con el uso, mientras que por corrientes convectivas del gas circundante son llevados los átomos de tungsteno a la superficie que se encuentre por encima del filamento produciendo el ennegrecimiento de aquella superficie.

○ **Conductores de entrada:** Son los que mantienen mecánicamente fijo al filamento y también los que proveen de energía al mismo, estos están diseñados para soportar las altas temperaturas producidas por el tungsteno, además que están diseñados para que coincidan con el coeficiente de expansión del vidrio que los envuelve.

○ **Soporte de vidrio:** Simplemente cumple la función de mantener mecánicamente estables a los conductores de entrada.

○ **Tubo de escape:** Es el conducto por el cual el gas fue introducido dentro de la bombilla antes de su sellamiento.

○ **Fusible:** Protege eléctricamente al filamento en casos eventuales que este pueda fundirse.

○ **Base:** Está hecha de aluminio y latón, siendo uno de los terminales eléctricos del dispositivo. La base está unida mecánicamente al bulbo envolvente presentando su forma de rosca característica para la adecuada sujeción mecánica con el socket al que irá instalada la lámpara.

○ **Contacto eléctrico:** Está unido a uno de los conductores de entrada, este contacto se encuentra aislado de la base y es el otro terminal eléctrico por el cual la lámpara es alimentada.

En la FIGURA XXX se observa las gráficas de la irradiancia espectral en función de la longitud de onda para tres lámparas incandescentes de 60, 100 y 150 W. Se puede apreciar una pequeña franja de todos sus espectros que representan la radiación visible aprovechada, notando así lo ineficiente que es esta tecnología [39] en comparación a las nuevas formas de iluminación como son las lámparas de descarga o las lámparas LED.

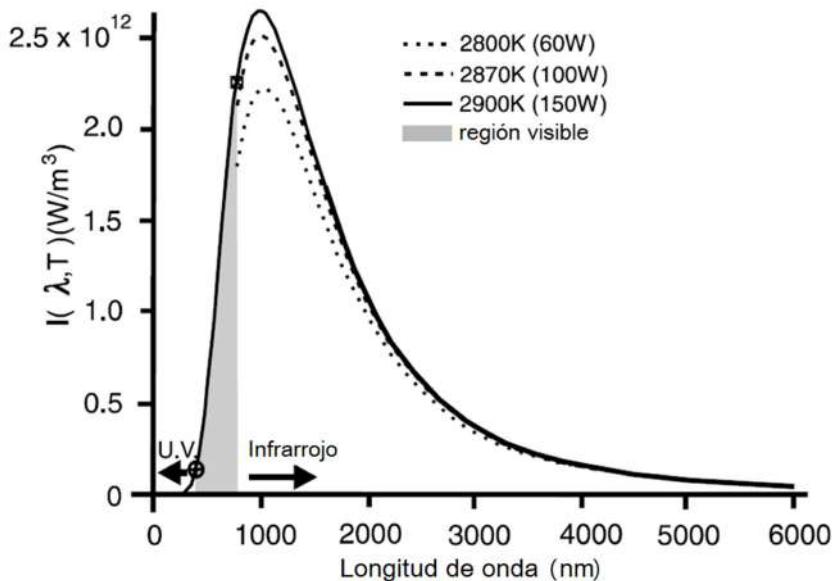


FIGURA XXX. Espectros de radiación lámparas incandescentes de 60 W, 100 W y 150 W [39]

### 3) Lámparas de descarga

Las lámparas de descarga fueron el siguiente paso importante en el mercado de la iluminación, consumiendo menos electricidad que las lámparas incandescentes y aprovechando mejor la energía consumida en forma de radiación visible. Con la finalidad de proteger a estas lámparas durante el arranque y el funcionamiento, se cuenta con un arrancador y un balastro.

#### a) El arrancador y el balastro

En la FIGURA XXXI se observa un circuito que simplifica las conexiones eléctricas básicas para una lámpara de descarga  $F$ , donde  $L_2$  en conjunto con el interruptor  $S$  representan al arrancador, el cual se encarga de energizar los electrodos de forma periódica hasta que estén lo suficientemente precalentados. Esto es gracias a la baja impedancia de  $L_2$ . Luego el interruptor se abre de manera permanente, o sea que, el arrancador no interviene más durante el funcionamiento de la lámpara, por lo que  $L_1$ , que representa al balastro, estabiliza el funcionamiento de la lámpara gracias a su alta impedancia. Sin este dispositivo, la corriente crecería de manera desmedida, lo que podría terminar con la destrucción de la lámpara. Mientras que el capacitor  $C$  trabaja en ambos procesos (arranque y funcionamiento) en los circuitos  $L_1C$  y  $L_2C$  [40], [41].

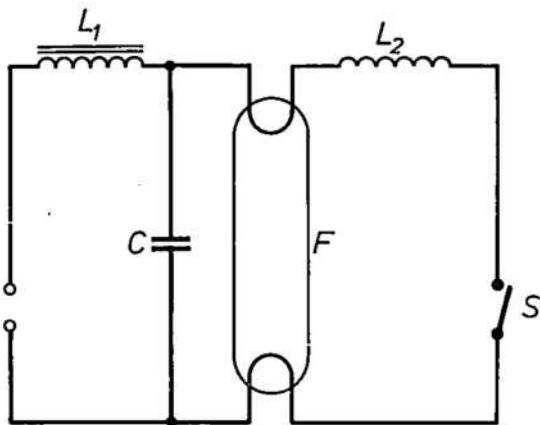


FIGURA XXXI. Esquema eléctrico de conexiones básicas en una lámpara de descarga [40]

### b) Mecanismo y modelos físicos de las lámparas de descarga

Este tipo de lámparas producen luz debido principalmente a las transiciones electrónicas de los átomos, iones y moléculas que componen los gases presentes dentro de estas lámparas, se piensa también que parte de la emisión de radiación visible, UV e IR son por la recombinación de iones y electrones.

Estos dispositivos son energizados con corriente alterna, por lo que cada uno de sus electrodos van intercambiando sus roles de cátodo a ánodo periódicamente [41]. Los electrones que se emiten desde el cátodo se generan por emisión termoiónica. Proceso que consiste en el ascenso de un electrón a través de las distintas capas energéticas del átomo metálico por medio del incremento de la energía térmica, superando la función trabajo del metal hasta que el electrón es liberado [42].

En general existen tres principales tipos de modelos físicos que explican los fenómenos inherentes al funcionamiento de las lámparas de descarga: modelos térmicos, modelos de balance de energía y modelos de la región del electrodo [41].

○ **Modelos térmicos:** Ven a las descargas como una fuente de calor que a menudo se suele tomar en cuenta para el balance de energía ya que ayuda a estimar el flujo de calor hacia los componentes de las lámparas y poder tener una idea de las temperaturas a las cuales podrían encontrarse. Este tipo de modelos son de alta importancia para las lámparas de alta intensidad de descarga a altas presiones (de 1 *atm* a 300 *atm*), ya que sus temperaturas alcanzan con mucha facilidad los 1000 *K* con el propósito de mantener la correcta presión de vapor de los haluros metálicos, evitando sobrecalentamientos locales que puedan comprometer el buen funcionamiento de estas luminarias. Por otro lado, las

lámparas fluorescentes convencionales no son tan susceptibles a este tipo de problemas térmicos, debido a los bajos niveles de potencia que se emplean en su uso.

○ **Modelos de balance de energía:** Cuantifican a cada una de las posibles componentes involucradas en el repartimiento de la energía entrante a lo largo de todo el proceso de funcionamiento de las lámparas de descarga (Ecuación 50). De hecho, la forma en cómo se desarrollan estos modelos van a depender fuertemente de la clase de lámpara de descarga que se vaya a tratar, de tal manera que, se puedan hacer predicciones acerca de las características eléctricas y la eficiencia que conlleva el convertir energía eléctrica en radiación útil.

$$W_{elec} = W_{rad} + W_{dis} + W_{dif} + W_{env} \quad (50)$$

Donde:

$W_{elec}$  : potencia eléctrica de la lámpara.

$W_{rad}$  : potencia destinada a la radiación útil.

$W_{dis}$  : potencia disipada en forma de calor.

$W_{dif}$  : potencia referente a la difusión de gases durante la descarga.

$W_{env}$  : potencia referente a la aceleración de iones en la zona envolvente a los contornos de los electrodos.

○ **Modelos de la región del electrodo:** No son irrelevantes debido a que la pérdida de energía en los alrededores a los electrodos puede ser muy significativa en relación a la potencia eléctrica de las lámparas. Esto conlleva a que la envolvente electropositiva adyacente al cátodo y el balance térmico entre el electrodo y la descarga, son el eje principal de estos modelos.

### c) Lámparas fluorescentes

Las lámparas fluorescentes son lámparas de descarga a baja presión (desde los 100 torr a 1 atm), por lo general funcionan a base de mercurio y de un gas inerte como podría ser el caso del argón [41].

En la FIGURA XXXII se puede observar la estructura de las zonas que componen a

las lámparas fluorescentes cuando han estado trabajando en su estado estable [43].

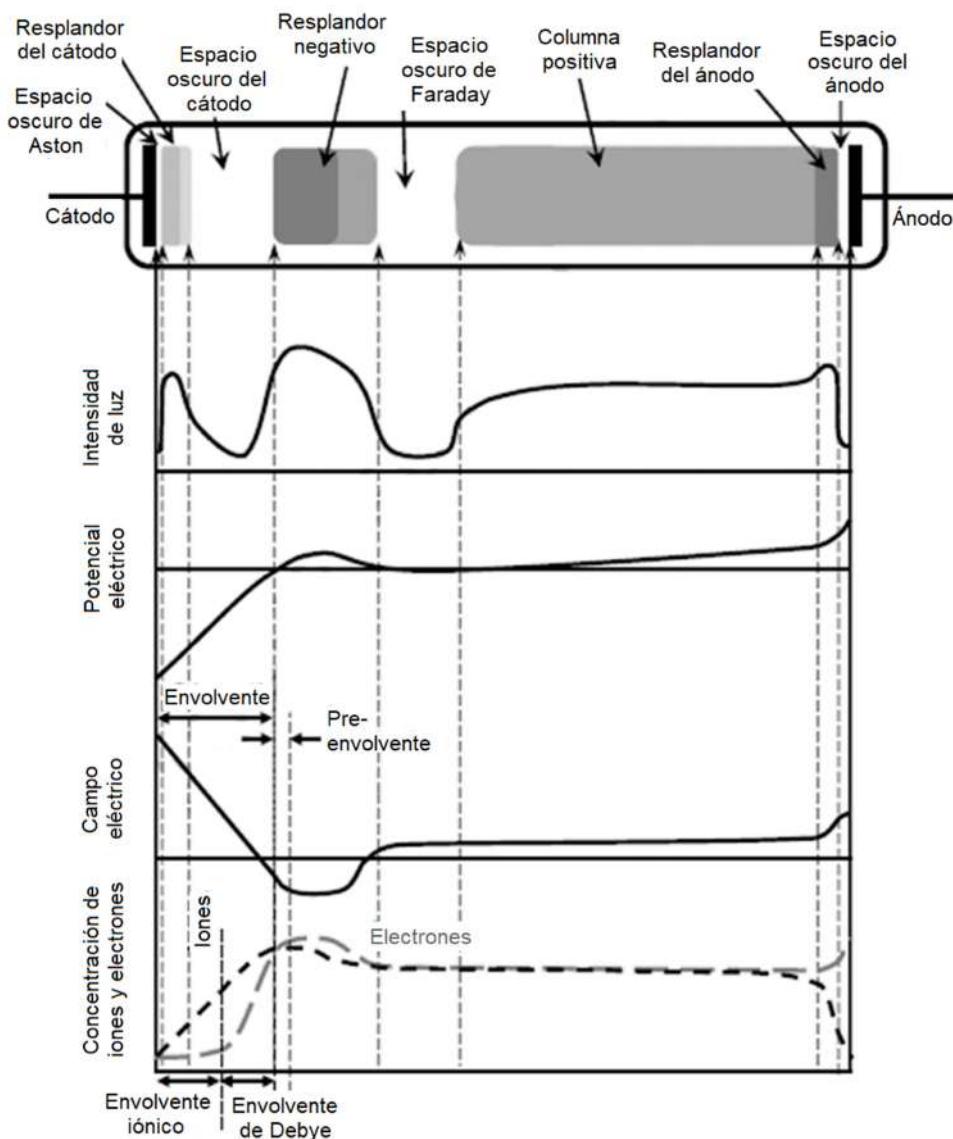


FIGURA XXXII. Esquema del funcionamiento de una lámpara fluorescente y sus diferentes descripciones gráficas [43]

○ **Espacio oscuro de Aston (Aston's dark space):** Es la zona contigua al cátodo, donde el proceso de emisión de electrones se lleva a cabo y donde el gas está parcialmente ionizado, limitando la cantidad de colisiones, razón por la cual esta zona tiene un bajo nivel de iluminación.

○ **Resplandor del cátodo (cathode glow):** Es la zona donde los electrones ganan energía suficiente como para poder excitar a los átomos de del gas inerte por medio de un número mayor de colisiones, por lo que se produce un brillo característico con una longitud de onda propia del gas noble que contengan las lámparas.

○ **Espacio oscuro del cátodo (cathode dark space):** Es una de las zonas más oscuras del tubo fluorescente, pero con un campo eléctrico muy fuerte y con una alta densidad de iones. Esta zona es oscura debido a que la energía de los electrones se incrementa por encima de los  $30\text{ eV}$ , generando que la sección transversal de la descarga disminuya y por ende la luminosidad decaiga. La predominancia de iones en esta zona se debe a la alta velocidad con la que los electrones fluyen.

Estas tres primeras zonas descritas componen a la envolvente electropositiva del cátodo [41], [43].

○ **Resplandor negativo (negative glow):** Su nivel de brillo es gradual, se marca una diferencia muy notable entre el espacio oscuro del cátodo y esta zona, para después mostrar un límite de luminosidad muy difuso con el espacio oscuro de Faraday. En esta zona los electrones van perdiendo energía a medida que van avanzando debido a las interacciones de excitación y de ionización que van generando a su paso. Las colisiones involucradas van produciendo una alta densidad de partículas positivas y negativas, prácticamente igualando sus cargas. Esta es la razón por la cual el campo eléctrico en esta zona no es muy intenso.

○ **Espacio oscuro de Faraday (Faraday dark space):** Es donde la luminosidad y la ionización son bastante bajas, las concentraciones de iones y electrones se mantienen bastante equiparadas, manteniéndose un campo eléctrico relativamente uniforme.

○ **Columna positiva (positive column):** Es la región más extensa y también la más rica en la emisión de radiación UV, esta región también tiene una densidad de carga neta baja así como el campo eléctrico presente, pero siendo este último lo suficientemente extenso como para poder mantener las colisiones de excitación y ionización entre los electrones y los átomos de gas, estableciendo también el contacto eléctrico entre todas las zonas del tubo de descarga a fin de producir la luminosidad observada. Al incrementar la presión dentro del tubo es posible alargar esta región, pero sin afectar significativamente las longitudes de las demás zonas. En general, bajo diferentes condiciones de presión y de otros factores se pueden generar ciertas perturbaciones en la columna positiva que posiblemente produzcan estratos luminosos a lo largo de esta región.

○ **Envolvente electronegativa del ánodo (anode sheath):** Es la región en la que el ánodo atrae fuertemente a los electrones y repele los iones procedentes de la columna positiva, la aceleración que se produce sobre los electrones hacia el ánodo genera la zo-

na conocida como resplandor del ánodo (anode glow) que es apenas un poco más brillante que la columna positiva. En muchas ocasiones se observa también una zona oscura entre el resplandor del ánodo y el ánodo que recibe el nombre de espacio oscuro del ánodo (anode dark space). Según los estudios realizados de esta última zona se piensa que la densidad de electrones en la zona contigua al ánodo es muy reducida y su distribución de energía se torna bastante distorsionada, lo que podría producir el decaimiento de la luminosidad.

Por otra parte, el fósforo fluorescente, compuesto de materiales cristalinos inorgánicos, recubre la superficie interna del tubo de descarga, desempeñando la función de transformar la radiación ultravioleta en radiación visible mediante el fenómeno conocido como cambio de Stokes. Este fenómeno implica la reemisión de fotones de menor energía que los fotones incidentes. La radiación ultravioleta excita la estructura cristalina del fósforo, generando fonones que, posteriormente, liberan energía en forma de calor y fotones de menor energía en el rango visible. No obstante, estas sustancias son susceptibles a la degradación debido a diversos factores, tales como la fotólisis, el sputtering de material proveniente del cátodo durante el encendido, reacciones químicas con el mercurio o las impurezas, entre otros [41].

#### **F. LED blanco de alta potencia**

En este apartado se tratan tres puntos que brindan un mejor panorama acerca de los LEDs en general. El primero se enfoca en la historia del LED y del OLED, siendo esta la continuación del apartado anterior. El segundo explora de manera muy breve cómo la tecnología LED ha ido progresando en el mercado de la iluminación. Finalmente, en el tercero se da una mirada con cierto grado de detalle de la física detrás de este dispositivo.

##### **1) Historia del LED y del OLED**

La aparición de los LEDs y como fue su evolución hasta lo que es en nuestros días, es lo que se trata de contar en las siguientes líneas. De igual manera, se da un pequeño vistazo al desarrollo de los OLEDs desde una óptica histórica y aplicativa.

###### **a) Ciminetos y desarrollo de los LEDs**

El diodo emisor de luz (LED) se compone de materiales semiconductores. Por lo tanto, resulta inevitable hablar de la historia de este dispositivo sin abordar los primeros pasos en el desarrollo de los semiconductores. De manera gradual, se avanza hacia los

compuestos que dieron forma a los primeros LEDs y finalmente se explora la estructura de los LEDs contemporáneos.

Para entender este recorrido, es necesario remontarse a los inicios del siglo XX. En 1907, el ingeniero eléctrico británico Henry Joseph Round publicó sus observaciones acerca de un dispositivo experimental denominado “rectificador de bigote de gato” (FIGURA XXXIII). Este dispositivo estaba fabricado con carborundo (SiC). Entre sus observaciones, destacó la emisión de pequeñas ráfagas de luz amarilla en el punto de contacto entre la punta fina de un metal y el SiC, cuando se aplicaba una diferencia de potencial de 10 V.

Con el tiempo, se comenzaron a reportar fenómenos rectificadores similares entre metales con puntas finas y elementos no metálicos, como el germanio (Ge), silicio (Si), SiC, entre otros. Estos descubrimientos sentaron las bases para el desarrollo posterior de los LEDs [44], [45].

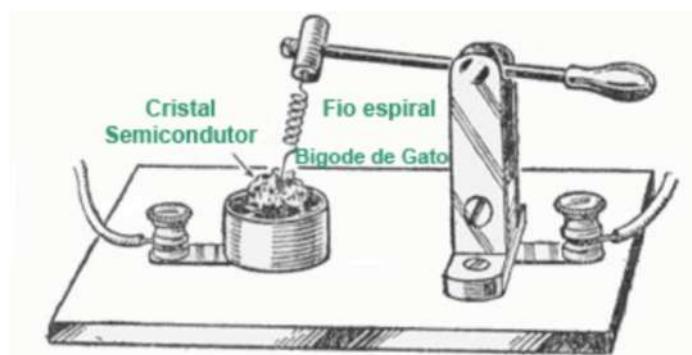


FIGURA XXXIII. Rectificador de bigote de gato [46]

Entre los años 1923 y 1940, Oleg Vladimirovich Losev se sumergió en un análisis exhaustivo de la curva característica del primitivo diodo de carborundo. Al igual que Henry Joseph, Losev utilizó el rectificador de bigote de gato como herramienta de investigación, lo que le permitió también observar el fenómeno de la electroluminiscencia en dicho diodo. En la FIGURA XXXIV se presenta una de las gráficas creadas por Losev, en la cual detalla la relación corriente-voltaje ( $I-V$ ) del diodo de carborundo en conexión con un alambre de acero (bigote de gato), indicando de manera explícita el punto en el cual se origina la electroluminiscencia.

En el año 1940, Losev identificó que la fuente de luz provenía de una región específica del SiC, a la que denominó “zona activa”. Posteriormente, identificó que esta región correspondía a la zona de tipo  $n$  en el SiC. Aunque cometió un error al atribuir el origen de este fenómeno luminiscente al bremsstrahlung (un término alemán que hace referencia a la

emisión de un fotón debido a la pérdida de energía de un electrón cuando es influenciado por el campo eléctrico y magnético de un átomo o ion) [44], [45], [47]. Los estudios de Losev, aunque con aciertos y desaciertos, demostraron un adelanto notable en la comprensión de los conceptos embrionarios de los semiconductores, adelantándose a su época.

No obstante, es importante destacar que, en esa época, los estudios realizados con el rectificador de bigote de gato se consideraban principalmente como curiosidades científicas, ya que la teoría subyacente de la física del estado sólido involucrado en el funcionamiento de un LED aún no era conocida [44].

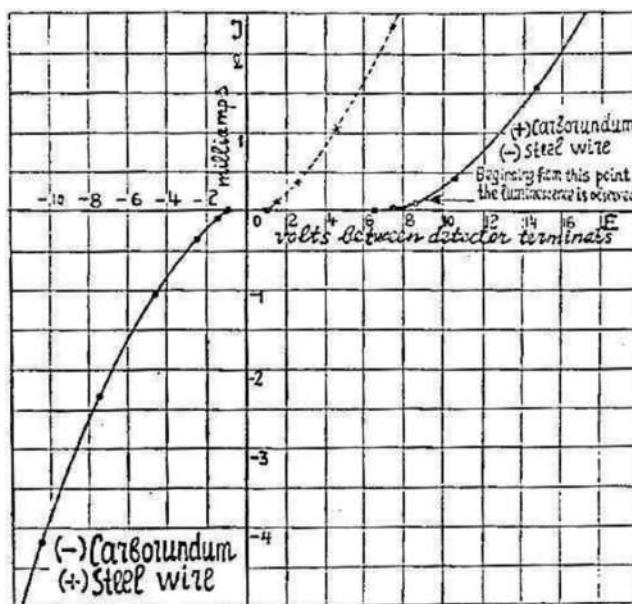


FIGURA XXXIV. Curva característica  $I-V$  del detector de carbóndium publicado por Losev en 1928 [45]

El 23 de febrero de 1940, Russell Ohl realizaba investigaciones en los laboratorios Bell Telephone de Holmdel, New Jersey, sobre rectificadores de cristal de contacto puntual basados en silicio. En este contexto, Ohl notó algo intrigante: al hacer contacto en diferentes puntos de un cristal de silicio que él mismo había preparado, encontró que las características eléctricas no eran uniformes. La clave estaba en pequeñas grietas que separaban distintas regiones del cristal. Algunas de estas áreas estaban dominadas por cargas negativas (electrones) y fueron denominadas “tipo  $n$ ”, mientras que en otras predominaban cargas no negativas (huecos), etiquetadas como “tipo  $p$ ”. Entre ellas, Ohl identificó una región que llamó “la capa de barrera”.

Durante la década anterior, entre 1933 y 1939, se estuvo desarrollando la teoría cuántica que regía la estructura de los sólidos, lo que más adelante resultaría esencial para la explicación de la teoría de bandas en semiconductores y metales, y para la comprensión

de la unión *pn*.

Tras la conclusión de la Segunda Guerra Mundial en 1945, los laboratorios Bell se propusieron crear un dispositivo que reemplazara los tubos de vacío que predominaban en sus instalaciones. Fue entonces cuando surgió el transistor bipolar de contacto, inventado por John Bardeen y Walter Brattain, lo cual contribuyó aún más a la comprensión de los conceptos intrincados de los semiconductores. En 1948, William Shockley completó y publicó su teoría del análisis de la unión *pn*.

A comienzos de la década de 1950, surgió el interés en explorar compuestos con una banda prohibida más amplia que la del germanio y el silicio (0,7 eV y 1,1 eV respectivamente). Se consideraron semiconductores binarios como GaAs y otros derivados de elementos químicos de las columnas III y V de la tabla periódica. Sin embargo, la comprensión de los semiconductores con bandas prohibidas directas e indirectas y su relevancia futura en el desarrollo de los LEDs estaba aún en sus primeras etapas.

En esta época, el GaP se destacó por emitir luz visible en el rango amarillo verdoso, pero su eficiencia era limitada debido a su naturaleza de semiconductor indirecto. A pesar de esto, se profundizó en el estudio de estos tipos de semiconductores. Se observó que la mayoría de los semiconductores directos conocidos solo emitían radiación infrarroja, como el InAs y el GaAs. Este último fue investigado en los laboratorios Lincoln del MIT en 1962, logrando transmitir señales de televisión a más de 50 km de distancia desde el Mount Wachusetts hasta los techos de los laboratorios [44].

Con el objetivo de ampliar la banda prohibida del GaAs (1,43 eV), General Electric fabricó LEDs mediante la aleación de cristales III-V como  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ , lo que aumentó la banda prohibida a 1,7-1,8 eV y estableció las primeras aleaciones ternarias. El 6 de octubre de 1962, se demostró la emisión del primer láser en el rango rojo del espectro visible (710 nm) a una temperatura de 77 K.

Durante la década de 1950 a 1961, se investigaron y fabricaron dispositivos basados en heterojunturas como Ge-GaAs. El dopaje con nitrógeno mejoró la eficacia luminosa de los primeros LEDs rojos, aproximándola a unos  $2 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ , ya que contribuyó a mejorar las recombinaciones en los semiconductores de banda prohibida indirecta, haciéndolos comportarse como los semiconductores de banda prohibida directa. En la década de 1970, se desarrolló un método de crecimiento epitaxial que permitió agregar concentraciones significativas de nitrógeno a las aleaciones de GaAsP, mejorando el rendimiento de los LEDs

en los rangos ámbar, amarillo y amarillo verdoso.

No obstante, persistían problemas como la baja eficiencia cuántica debido a factores como la presencia de impurezas de oxígeno en la fabricación de los LEDs y otros dispositivos basados en semiconductores. A medida que los años avanzaban, estos métodos fueron perfeccionándose [44].

El desarrollo continuó con la creación de aleaciones cuaternarias como GaAlAsP, InAlGaP e InAlGaN, mejorando la calidad de los LEDs. Además, se implementaron dopajes con Mg y Zn. Los métodos de fabricación de semiconductores también evolucionaron, con el método MOCVD (deposición química de vapor metalorgánico) emergiendo como uno de los más utilizados, permitiendo el desarrollo de LEDs azules y UV basados en InGaN/GaN hacia mediados de la década de 1990 [44], [48].

### **b) Desarrollo de los LEDs blancos**

Luego de la aparición de los LEDs azules y UV, se pensó en la necesidad de la creación de LEDs blancos, para tal finalidad surgieron tres vertientes. La primera consistió en el uso de tres LEDs de colores rojo, verde y azul de fuerte brillo. Los cuales al ser encendidos de forma simultánea producen un brillo blanco bastante aceptable [48], [49]. En la FIGURA XXXV(a) se muestra un esquema de este tipo de arreglos ternarios.

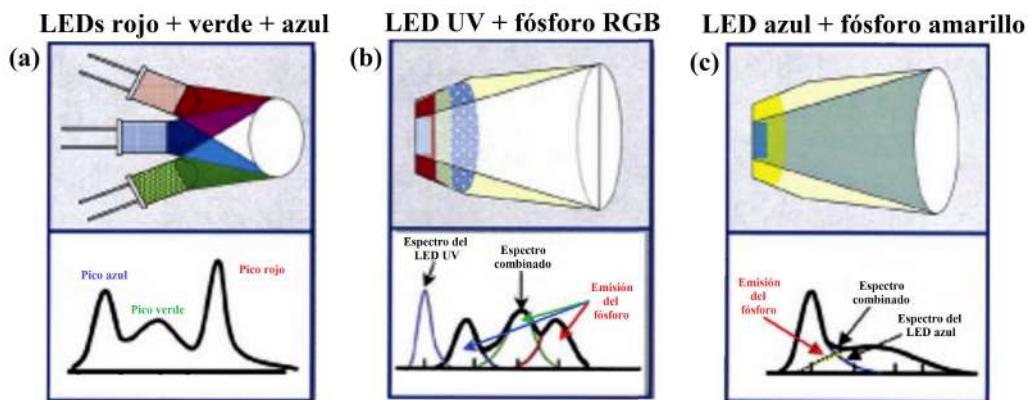


FIGURA XXXV. Métodos de obtención de LEDs blancos: (a) Combinación de LEDs rojo, verde y azul, (b) fósforo fluorescente con LED UV y (c) fósforo fluorescente con LED azul [49]

En la segunda vertiente se propuso el uso de fósforos fluorescentes que conviertan la luz de un LED UV en luz blanca (FIGURA XXXV(b)), de forma similar a las lámparas de descarga fluorescentes. Dicha propuesta fue incluso planteada previamente a la invención del LED azul, pero su realización no fue muy apoyada debido a que se llegó a la conclusión que su eficiencia no sería del todo buena, ya que la conversión de rayos UV a luz visible

implicaba un desplazamiento en la longitud de onda bastante significativo (cambio largo de Stokes) [48].

La tercera vertiente y la más popular hasta hoy es aquella en la que se hace uso de LEDs azules recubiertos de diferentes tipos de fósforos fluorescentes dándose una conversión parcial de la luz azul en radiación de longitudes de onda más largas dentro del espectro visible (cambio parcial de Stokes), que en combinación con la fracción de radiación azul no absorbida se logra la emisión de luz blanca (FIGURA XXXV(c)). Se hicieron exhaustivas investigaciones para el desarrollo del fósforo adecuado para la conversión parcial de la radiación azul entre los años 1996 y 1997, compañías como Nichia Company (Japón), ATMI Company (EE.UU.) y Osram Company (Alemania) en colaboración con la Fraunhofer Society trabajaron por su parte en el desarrollo y en las pruebas del fósforo YAG:Ce (granate de itrio de aluminio enriquecido con Cerio [48], [49].

A medida que la tecnología de la iluminación evolucionaba, se podía observar un claro avance en la eficacia luminosa de los diversos dispositivos que surgían a lo largo de este proceso. Las primeras lámparas, construidas con filamentos de carbono, presentaban una eficacia máxima de  $2 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ . Con la introducción de las lámparas de tungsteno, esta cifra aumentó a un rango de 10 a  $18 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ . Las variantes halógenas, que utilizaban filamentos de tungsteno, lograron alcanzar un rendimiento de 16 a  $24 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ .

La tecnología continuó avanzando, y con la llegada de las lámparas fluorescentes, la eficacia mejoró aún más, abarcando desde los  $50 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$  hasta los  $95 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ . Sin embargo, el hito más significativo se presentó con las lámparas LED, que actualmente superan la marca de los  $300 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$  [44], [48].

Este progreso constante, junto con los detalles más amplios que se abordaron en la historia de los LEDs en la sección anterior, se resumen de manera concisa en la FIGURA XXXVI.

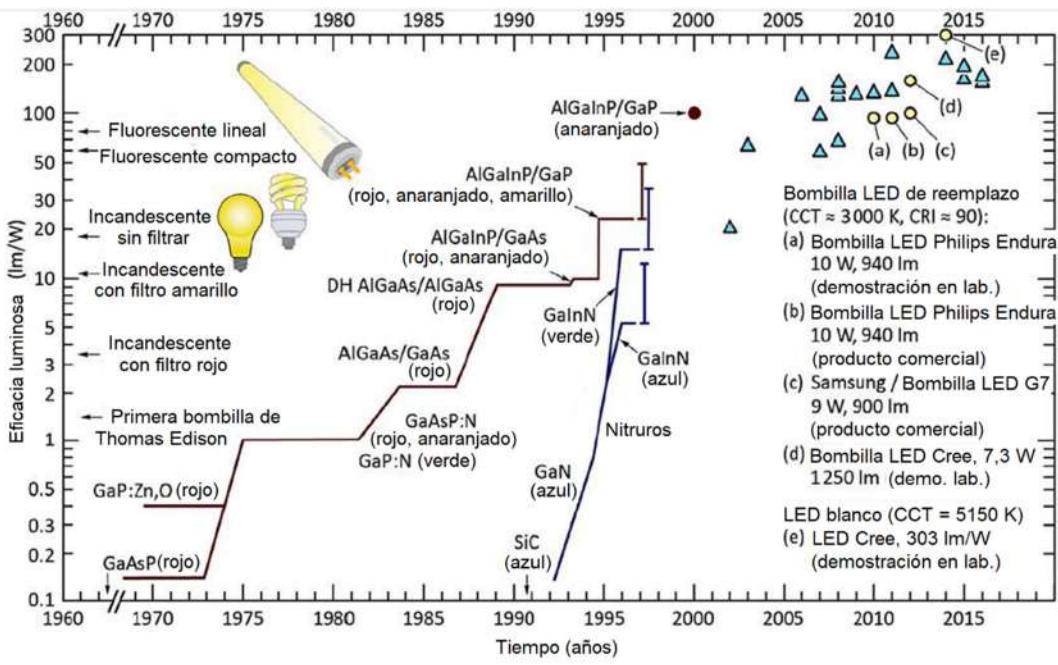


FIGURA XXXVI. Eficacia luminosa a lo largo del siglo XX de las diferentes luminarias y el desarrollo del LED desde sus comienzos hasta la aparición y refinamiento en la calidad de los LEDs blancos [48]

### c) Historia del OLED

Los OLEDs o diodos orgánicos emisores de luz están hechos a partir de estructuras cíclicas de carbono e hidrógeno que, en conjunto con el nitrógeno, oxígenos y demás elementos forman complejas estructuras orgánicas de las cuales son aprovechadas sus propiedades para contribuir en la generación de luz. En la FIGURA XXXVII se muestra la disposición de las diferentes capas que conforman un OLED [50].

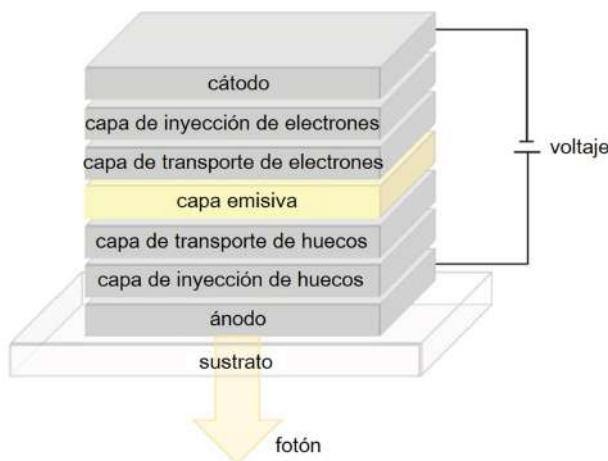


FIGURA XXXVII. Esquema de capas de la estructura de los OLEDs [50]

El estudio para el desarrollo de estos dispositivos comenzó a inicios de la década

de 1960, los cuales estaban basados en las propiedades fluorescentes de un compuesto llamado eosina, que tiene propiedades colorantes y de fluorescencia.

Los primeros ensayos con estas sustancias fluorescentes demostraron lamentablemente que la eficiencia era muy pobre, además que el nivel de tensión de operación era alto. Luego en 1987 Eastman Kodak en colaboración con otros investigadores fabricaron el primer OLED que demandaba niveles bajos de tensión.

Una década más tarde, el primer OLED comercial fue desarrollado por Pioneer para la implementación de pantallas en los sistemas de audio de los automóviles. Luego, gracias a estudios realizados a inicios de la década de 1990, se logró desarrollar polímeros basados en OLEDs, los cuales fueron lanzados al mercado por Philips en 2002. Fue cuando las matrices activas de OLEDs (AMOLEDs) revolucionaron los métodos para el desarrollo de displays, estos poco a poco fueron evolucionando como la materia prima para la implementación de pantallas en dispositivos móviles como es el caso de varios modelos de las marcas: Nokia, Samsung, LG y un largo etcétera. Estas aplicaciones llegaron incluso a incursionar en el desarrollo de monitores de pantalla plana y curva, las cuales ya no necesitan de un sistema de retroiluminación fluorescente o LED como en caso de los monitores LCD, caracterizándose por la pobre definición de los tonos oscuros en las imágenes.

En la FIGURA XXXVIII se muestra la línea de tiempo grosso modo del desarrollo científico y comercial de los OLEDs [50].

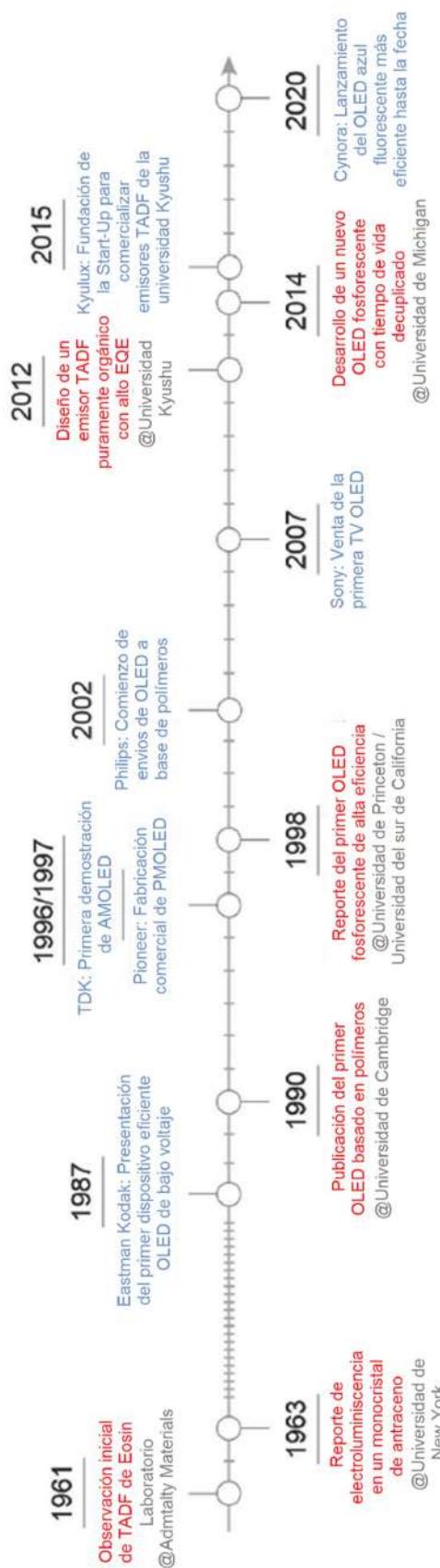


FIGURA XXXVIII. Hitos en el desarrollo de la tecnología OLED [50]

## **2) Reciente crecimiento en el mercado**

Existen muchos factores que juegan roles muy importantes en el surgimiento de un tipo de producto en el mercado, los cuales se ajustan a las necesidades vigentes del colectivo respecto a la satisfacción que cubra ese producto. Mencionando como ejemplo el caso que se ha ido observando en la forma de como solemos comunicarnos, donde el producto sería la forma de comunicación empleada y los factores implicados serían, la distancia entre emisor y receptor, el tiempo entre el envío y la recepción del mensaje, la metodología empleada en la trasmisión del mensaje. Estos factores siempre se han visto condicionados por los recursos tecnológicos correspondientes a la época. Hace un par de siglos atrás era inimaginable el poder comunicarse con otra persona que se encontrara al otro lado del mundo, sin embargo, hoy en día es la norma. De igual manera como se ha visto en la historia de las lámparas eléctricas, la necesidad de fuentes de luz artificiales se rige en base factores como la producción extendida a lo largo del día, el confort luminoso que es necesario en actividades que abarcan desde la lectura de un libro hasta la intervención quirúrgica en una sala de operaciones.

La eficacia luminosa, el tiempo de vida, el índice de reproducción cromática (CRI), temperatura de color correlacionada (CCT), entre otros; son los factores que son esenciales para la necesidad que se busca cubrir y la calidad que se demanda de las luminarias. Pues cada uno de mencionados se han ido puliendo con la aparición de una nueva tecnología de la iluminación y por supuesto que el consumo de energía es otro factor clave que condiciona a la elección actual de un cierto tipo de tecnología. Esto ya se ha visto reflejada en los países de primer mundo a lo largo de los últimos años y las predicciones hechas hace una década por parte de The Feedonia Group (TABLA IV) sobre el surgimiento de los LEDs por encima de las lámparas fluorescentes y ni que hablar sobre las lámparas incandescentes hasta el 2021 [51].

TABLA IV

Demanda mundial de iluminación por producto del 2006 al 2021 (En millones de dólares) [51]

Año	2006	2011	2016	2021
<b>Fluorescentes</b>	10900	20030	23870	15430
<b>Incandescentes</b>	10160	11010	8830	8030
<b>Descarga de alta intensidad y otros</b>	4105	6740	12630	11780
<b>LEDs</b>	1325	6120	32970	47060
<b>Demanda mundial de iluminación</b>	26490	43900	78300	82300

Estas predicciones se aproximan a lo que se ha estado dando posteriormente según estudios realizados en países en vías de desarrollo como es el caso de la India en 2020 donde se observó que la adquisición y el uso de lámparas incandescentes sobresalían notablemente hasta el 2018, año en que la tecnología LED tomó la batuta, así como se puede observar en la FIGURA XXXIX. Se destaca su gran crecimiento, desde solo 5 millones de unidades vendidas en 2014 hasta los 669 millones de unidades en 2018 [52].

Nuestro país no es ajeno a este boom respecto al uso creciente de los LEDs, ya que se ha determinado que las importaciones de lámparas a base de LEDs se incrementaron más del 700 % en el año 2016 respecto del 2011. En ese mismo periodo se ha observado un incremento de más del 1200 % en la importación de la luminaria LED en el sector industrial [53].

En el presente año 2023 de forma empírica es fácil notar este crecimiento de la tecnología de iluminación del estado sólido en las casas expendedoras de este tipo de producto.

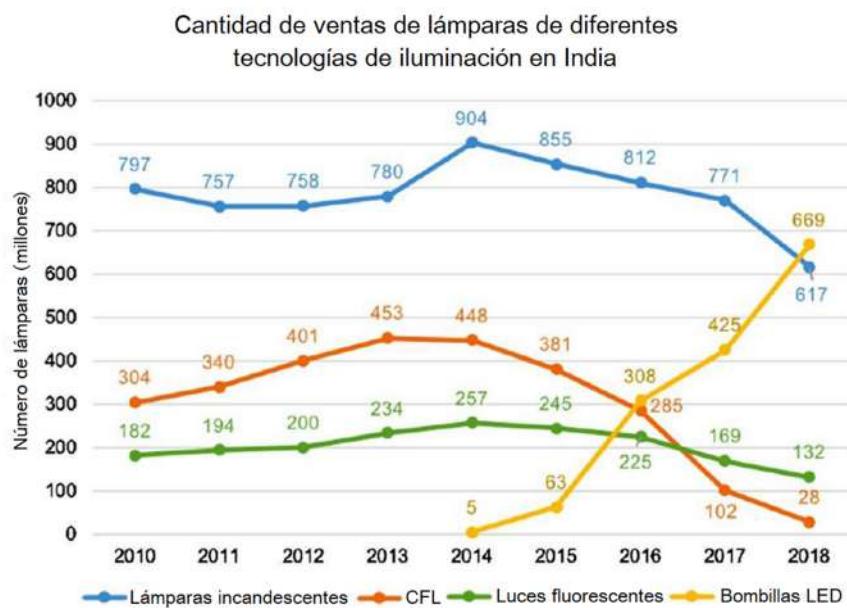


FIGURA XXXIX. Tendencias del mercado de la iluminación en India entre el 2010 y el 2018 [52]

### 3) Física del LED blanco

En esta sección se explora la física de los diodos de manera escueta y concisa, así como también, al fósforo fluorescente como reemisor de radiación visible que compone al LED blanco.

### a) Juntura pn de semiconductores

○ **Homojuntura pn y curva característica del diodo:** El LED es un diodo que cuenta con una estructura compleja de semiconductores en comparación a un simple diodo de silicio o de germanio. Pero con el objetivo práctico de hablar de la juntura pn, se va a dar una breve mirada al diagrama de bandas del diodo simple, al estar sometido a polarización directa e inversa.

El diodo al no estar energizado presenta la unión *pn* así como se muestra en la FIGURA XL, en la que se mantiene un equilibrio dinámico entre los portadores presentes en los dos semiconductores.

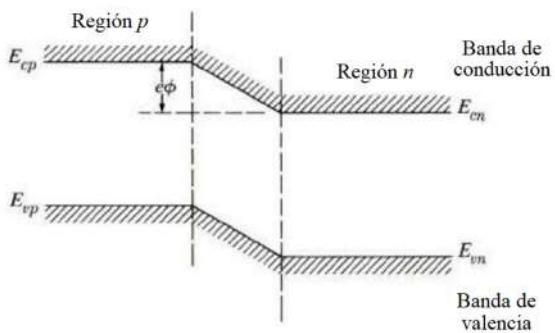


FIGURA XL. Banda prohibida, de conducción y de valencia en la juntura pn [42]

Al aplicar tensión directa ( $V_0$ ) al diodo, se produce el estrechamiento de la zona de agotamiento, implicando que la barrera de potencial se vea disminuida en las bandas de conducción y de valencia, así como se ve en la FIGURA XLI.

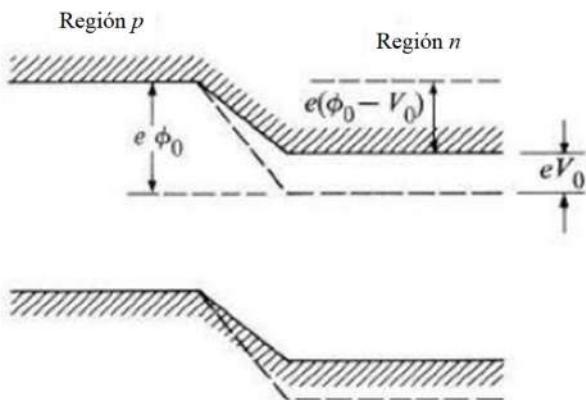


FIGURA XLI. Efecto de la polarización directa sobre la banda prohibida, de valencia y de conducción [42]

Bajo estas circunstancias, a través del diodo circula una corriente en función de la tensión aplicada que satisface la estadística de Maxwell – Boltzmann, así como se muestra

en la Ecuación 51.

$$I = I_0(\exp(eV_0/K_B T) - 1) \quad (51)$$

Siendo esta última, la Ecuación característica del diodo bajo una polarización directa, donde  $I_0$  es la corriente de saturación. Por otro lado, el diodo al ser sometido a una polarización inversa ( $-V_0$ ), se consigue que la zona de agotamiento ocupe más porción de ambos materiales semiconductores, lo cual se expresa energéticamente como el incremento de la barrera de potencial de la unión pn por un factor  $eV_0$  (FIGURA XLII). Por lo que la corriente presente bajo esta configuración se expresa según la Ecuación 52 [42], [54].

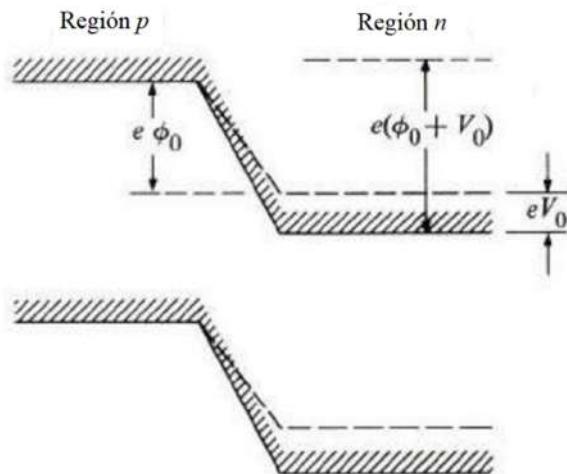


FIGURA XLII. Efecto de la polarización inversa sobre la banda prohibida, de valencia y de conducción [42]

$$I = I_0(1 - \exp(-eV_0/K_B T)) \quad (52)$$

Como normalmente el factor  $eV_0$  es mucho mayor que  $K_B T$ , entonces se podría decir que  $I \approx I_0$ . Obteniendo la curva característica del diodo completa (FIGURA XLIII).

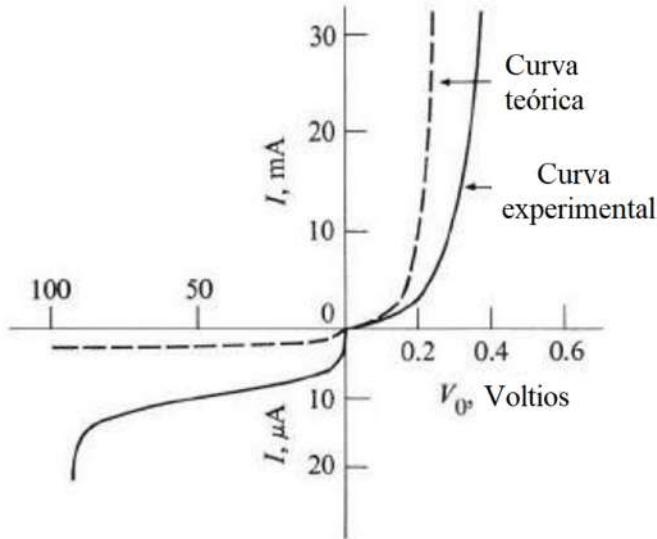


FIGURA XLIII. Curva característica del diodo [42]

Al ir incrementando el voltaje en polarización inversa, los electrones van ganando más energía cinética, sobre pasando la gran barrera de potencial que se ha formado en la zona de agotamiento. Al seguir aumentando el voltaje, la energía cinética de los electrones se hace lo suficientemente intensa como para poder generar pares electrón – hueco por medio de colisiones, luego los electrones liberados por medio de nuevas colisiones van liberando más electrones de manera sucesiva. A esta corriente generada se le llama corriente de avalancha ( $I_A$ ), la cual está asociada a una tensión de ruptura  $V_R$  [55]. La relación entre estos parámetros se muestra en la Ecuación 53.

$$I_A = \frac{I_0}{1 - \left(\frac{V_0}{V_R}\right)^n} \quad (53)$$

Donde el valor de  $n$  varía entre 4 y 6 dependiendo de la concentración de impurezas presentes. En la expresión se puede notar que a medida que  $V_0 \rightarrow V_R$ , la corriente de avalancha  $I_A$  tiende al infinito, lo que en teoría dejaría inservible al diodo debido a la gran agitación térmica [55].

○ **Heterojuntura pn:** Los dispositivos electrónicos que están hechos a base de semiconductores no necesariamente estarán constituidos por materiales de tipo  $n$  y  $p$  basados en los mismos componentes, de hecho, los LEDs están conformados por heterojunturas. En este tipo de uniones el ancho de banda prohibida de cada uno de los materiales no es el mismo, así como se puede observar en la FIGURA XLIV(a), en la que se tienen alineadas las afinidades electrónicas de cada material ( $\chi_{en}$ ,  $\chi_{ep}$ ), así como sus funciones trabajo ( $\varphi_{sn}$ ,

$\varphi_{sp}$ ). De igual manera se ven representadas sus capas de conducción y de valencia ( $\Delta E_c$ ,  $\Delta E_v$ ) [54], cuyas relaciones se ven plasmadas en las ecuaciones 54 y 55.

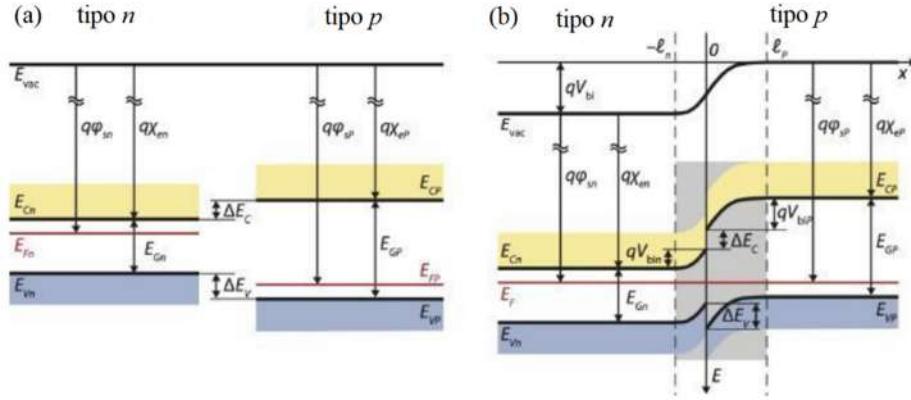


FIGURA XLIV. Diagrama de bandas de energía (a) para el material tipo n y tipo p por separado (b) para la heterojuntura [54]

$$\Delta E_c = e(\chi_N - \chi_P) \quad (54)$$

$$\wedge \quad \Delta E_c + \Delta E_v = E_{gP} - E_{gN} = \Delta E_g$$

$$\Rightarrow \quad \Delta E_v = \Delta E_g - \Delta E_c \quad (55)$$

Por otro lado, en la FIGURA XLIV(b) se puede observar cómo el diagrama de bandas de energía se ha modificado luego de alinear los niveles de Fermi de cada material. Además, manteniendo continua la afinidad electrónica, debido a que  $\Delta E_c$  y  $\Delta E_v$  son invariantes después de la unión. A esto último se le suele llamar la regla de afinidad electrónica, la cual es una aproximación teórica [54], [56].

Finalmente, el voltaje de la heterojuntura no es más que la diferencia de las funciones trabajo de ambos materiales, así como se muestra en la Ecuación 56 [54].

$$V_0 = \varphi_{sP} - \varphi_{sN} \quad (56)$$

### b) Pozos cuánticos

Al tener dos tipos de material como el AlGaAs y el GaAs formando una heterojuntura tipo sándwich de tal manera que el diagrama de bandas de energía tenga la apariencia mostrada en la FIGURA XLV(a). Las bandas de valencia y de conducción del GaAs presentarían una curvatura, la cual tiende a ser más rectilínea al utilizar una lámina de GaAs más

delgada (FIGURA XLV(b)). Siendo este un modelo simplificado de un pozo cuántico.

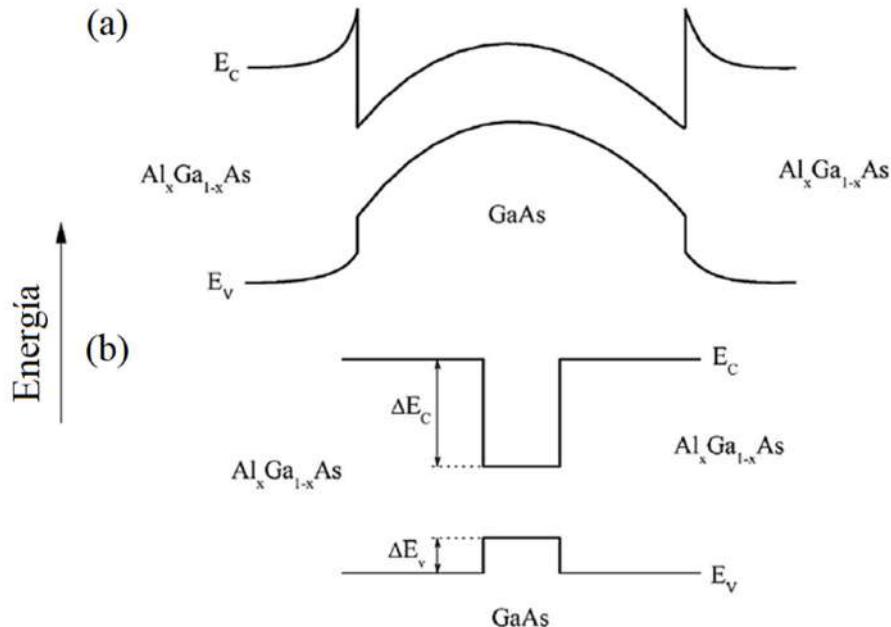


FIGURA XLV. Diagrama de bandas de energía para el AlGaAs-GaAs-AlGaAs (a)  
Pozo cuántico amplio y (b) pozo cuántico estrecho [57]

Este sistema se caracteriza por la ausencia de iones donadores en la zona intermedia (perteneciente al GaAs) de tal manera que haya una buena movilidad de portadores de carga en ella. Desde luego, estos portadores de carga son proporcionados por los materiales contiguos al GaAs (AlGaAs), estos portadores de carga a pesar de su movilidad se encuentran atrapados en el pozo cuántico, hasta la aparición de un campo eléctrico externo que les permita salir de su confinamiento.

La movilidad con la que cuentan los portadores de carga mejora el performance de dispositivo que posee este tipo de estructuras, como por ejemplo los LEDs o los fotodetectores. Para mejorar ello, se suelen implementar arreglos de múltiples pozos cuánticos (Multiple Quantum Wells – MQWs).

Básicamente existen dos tipos de MQWs: los de tipo I (FIGURA XLVI(a)), son aquellos cuyos electrones y huecos están bajo la misma ubicación espacial, mientras que en los de tipo II (FIGURA XLVI(b)), los electrones y huecos están distribuidos alternadamente [57].

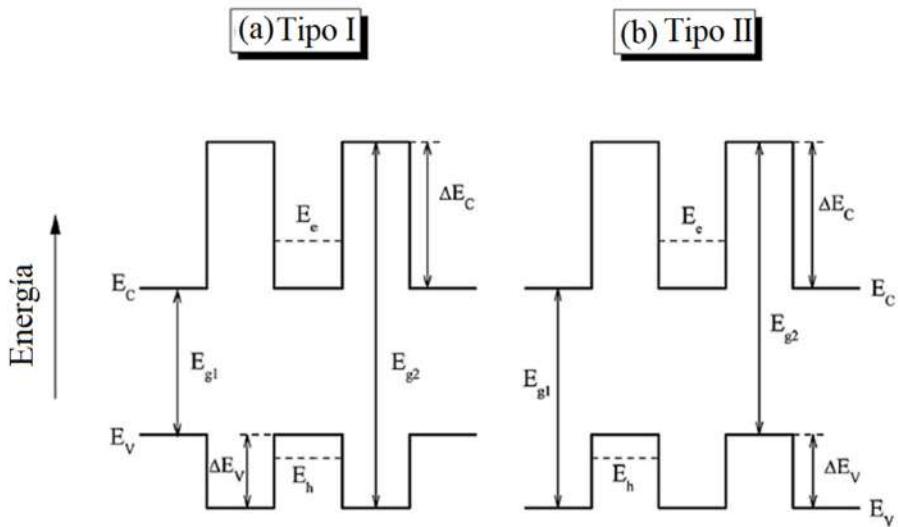


FIGURA XLVI. Pozos cuánticos múltiples (a) de tipo I y (b) de tipo II [57]

Como el ancho de banda prohibida del GaN es aproximadamente 3,4 eV a 25 °C, en la FIGURA XLVII se observa que la longitud de onda emitida es de 361,1 nm. Luego al añadir heteroestructuras de InGaN que compone a los MQWs da como resultado el desplazamiento de la longitud de onda hasta los 423,8 nm, además que, la presencia de defectos en los estados intermedios dentro de la banda prohibida ocasiona que la longitud de onda emitida se desplace más aún al rojo [58].

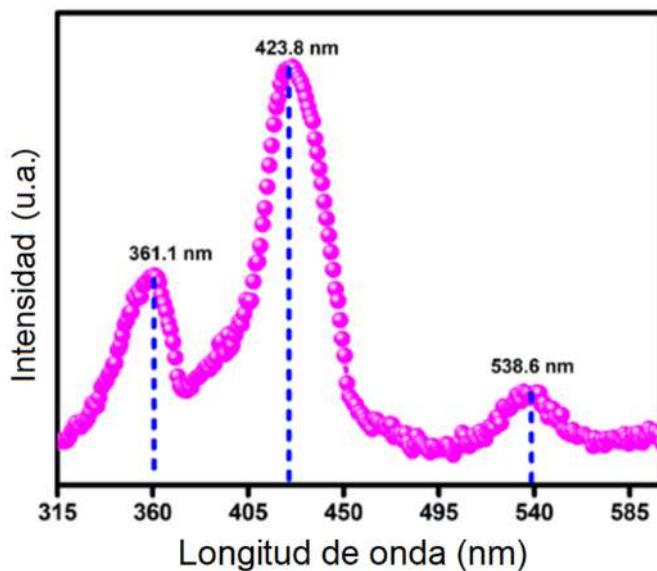


FIGURA XLVII. Influencia de la presencia de MQWs en la longitud de onda de la radiación emitida por un LED de GaN [58]

### c) Influencia de la temperatura sobre el ancho de banda prohibida

La variación del ancho de la banda prohibida en los semiconductores ha sido ampliamente estudiada, encontrando básicamente que este fenómeno se da por el efecto acumulativo.

lativo de la interacción electrón – fonón (EPI) y por la expansión térmica de la red cristalina (TLE) [59]. Por lo que existen modelos físicos que se ajustan a los datos experimentales. Uno de los más difundidos está representado por la Ecuación de Varshni [60] (Ecuación 57).

$$E_g(T) = E_0 - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (57)$$

Donde  $\alpha$  es el parámetro que está asociado a la pendiente de la curva  $E_g(T)$  cuando la temperatura es mucho mayor que la temperatura de Debye  $\Theta_D$  (temperatura en la que se da el modo de vibración más alto de la red cristalina [61]) y  $\beta$  también está asociado a  $\Theta_D$ . Ambos parámetros deben ser positivos a fin de asegurar que  $E_g(T)$  sea monótona, con lo cual, se señala que estos parámetros dependen del semiconductor. Por último,  $E_0$  es el valor de la banda prohibida al estar a una temperatura de  $T = 0\text{ K}$  [62].

Sobre la base del modelo de Varshni se estableció un modelo similar desarrollado en el Departamento de Física de la Universidad de Roorkee en India, modelo para el que se toman en consideración a  $\Theta_D$  del semiconductor y al valor de su banda prohibida a  $0\text{ K}$  ( $E_0$ ) así como se muestra en la Ecuación 58 [63].

$$E_g(T) = E_0 - \frac{(2,25 \times 10^{-5} \Theta_D) - (4,275 \times 10^{-3}) T^2}{5(T + 5\Theta_D - 1135)} \quad (58)$$

De tal manera que:

$$\left\{ \begin{array}{l} Eg \propto T^2 : T \ll \Theta_D \\ Eg \propto T : T \gg \Theta_D \end{array} \right.$$

En la TABLA V se muestra los datos experimentales del ancho de la banda prohibida del germanio a diferentes temperaturas, así como también, los datos calculados con la Ecuación 58 (proporcionada por la Universidad de Roorkee) y la Ecuación 57, observándose que los datos teóricos son bastante confiables.

TABLA V

Valores de la banda prohibida del germanio, datos experimentales y teóricos [63]

Germanio			
$E_0$	$\Theta_D$	$\alpha$	$\beta$
0,7412 eV	374 K	$4,561 \times 10^{-4}$ eV/K	210 K
$T(K)$	$E_g(eV)$	$E_g(eV)$	$E_g(eV)$
Experimental	Univ. Roorkee	Ec. Varshni	
20	0,740	0,740	0,740
70	0,735	0,736	0,733
85	0,731	0,733	0,730
190	0,700	0,708	0,700
250	0,680	0,688	0,679
285	0,665	0,675	0,666
370	0,635	0,638	0,634
420	0,615	0,615	0,613

Como el ancho de la banda prohibida disminuye con la temperatura, entonces la longitud de onda de la radiación emitida por un LED aumenta, de acuerdo a la Ecuación de Planck (Ecuación 59).

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (59)$$

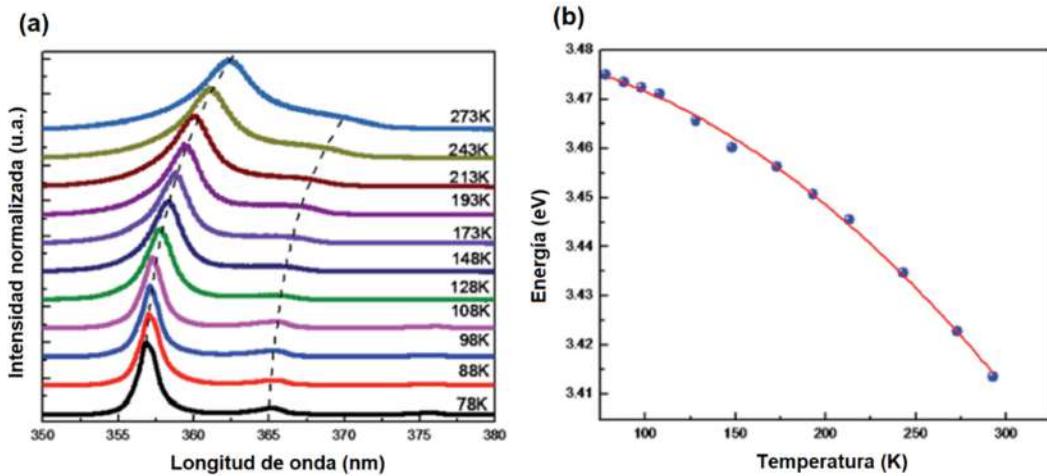


FIGURA XLVIII. Influencia de la temperatura sobre (a) la longitud de onda de radiación emitida por un LED y sobre (b). el ancho de banda prohibida del GaN [3]

Los LEDs blancos suelen estar compuestos de InGaN/GaN, donde el compuesto InGaN es intrínseco y compone a los pozos cuánticos [57], mientras que el GaN es el semiconductor principal, contando con un ancho de banda prohibida a 0 K ( $E_0$ ) de 3,47 eV, incluyendo sus respectivos parámetros  $\alpha = 3,74 \times 10^{-3}$  eV/K y  $\beta = 462,6$  K, por lo que al

utilizarlos en la Ecuación de Varshni se obtiene la curva mostrada en la FIGURA XLVIII(b), dicho sea de paso, en la FIGURA XLVIII(a) se puede observar el corrimiento al rojo del pico más alto del espectro con el aumento de la temperatura [3].

#### d) Tipos de recombinación

El proceso de emisión de luz en un LED en general, se suele dar por recombinación radiativa, sin embargo, no todas las recombinaciones entre electrones y huecos suelen ser de este tipo, siendo llamadas recombinaciones no radiativas de tipo Auger y las recombinaciones Shockley-Read-Hall. A continuación, se mirará un poco más de cerca cada uno ellos.

○ **Recombinación radiativa:** Este proceso se da cuando un electrón de la capa de conducción se recombina con un hueco de la banda de valencia, dando lugar a la liberación de radiación en forma de un fotón, así como se ilustra en la FIGURA XLIX, mostrando este fenómeno en su forma física (FIGURA XLIX(a)) y en su forma de diagrama de bandas (FIGURA XLIX(b)).

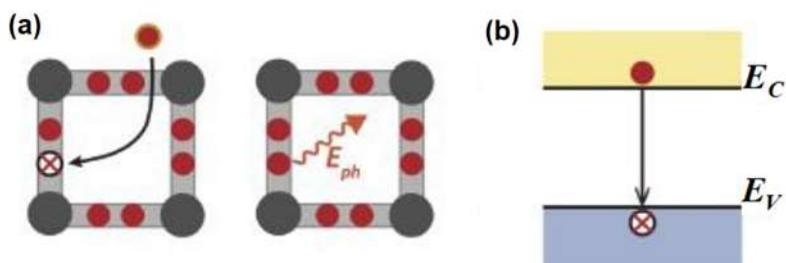


FIGURA XLIX. Proceso de la recombinación radiativa en su representación (a)física y (b) diagrama de bandas [54]

La energía con la que cuenta el fotón emitido es la misma que el ancho de la banda prohibida del material [64].

○ **Recombinación Auger:** En este tipo de recombinación, a diferencia de la recombinación radiativa, participan siempre tres, dando lugar a dos posibles casos. Primero, hay dos electrones en la banda de conducción, donde uno impacta sobre el otro, transfiriéndole energía para después perderla y volver al nivel más bajo de la banda de conducción, liberando su energía y perturbando la red cristalina en forma de algún modo de vibración llamado fonón, lo que macroscópicamente genera el incremento de la temperatura del semiconductor, mientras que el electrón impactado se recombina con un hueco de la banda de valencia [54] (FIGURA L(a)).

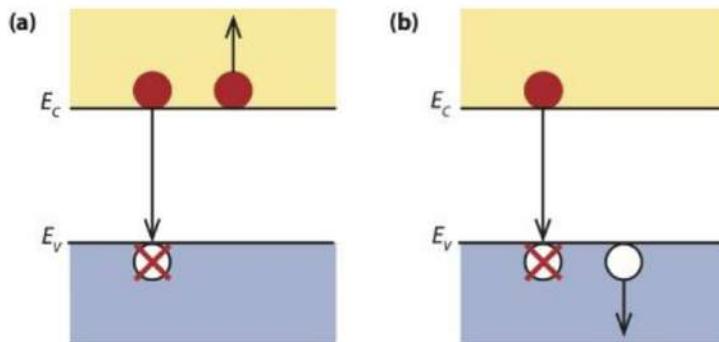


FIGURA L. Recombinación de tipo Auger (a) entre dos electrones y un hueco o (b) entre un electrón y dos huecos [54]

El segundo caso ocurre entre dos huecos y un electrón siguiendo un mecanismo similar, así como se ilustra en la FIGURA L(b).

El nombre acuñado a este tipo de recombinación se debe a que en 1925 el físico francés Pierre-Victor Auger descubriera el efecto que también lleva su nombre, en el cual un electrón ubicado en una de las capas de energía más altas de un átomo consigue reubicarse a niveles más bajos de energía a costa de transferir parte de su energía a uno o más electrones en lugar de emitir un fotón [65].

○ **Recombinación Shockley-Read-Hall:** Durante la elaboración de los semiconductores, así sea en menor medida, siempre existirá la posibilidad del alojamiento de impurezas que contengan niveles de energía que se encuentren dentro de la banda prohibida de un semiconductor extrínseco. Justamente estos niveles intermedios de energía servirán como trampas, atrapando electrones que consecuentemente atraerán huecos. Este proceso es de naturaleza no radiativa ya que el exceso de energía suele transmitirse a través del cristal en forma de calor [54], [66].

Cuatro tipos de procesos se pueden dar por parte de una trampa (FIGURA LI) que involucran las recombinaciones Shockley-Read-Hall [66]:

$A_1$  : captura de un electrón procedente de la banda de conducción.

$B_1$  : emisión de un electrón hacia la banda de conducción.

$A_2$  : captura de un hueco procedente de la banda de valencia.

$B_2$  : emisión de un hueco hacia la banda de valencia.

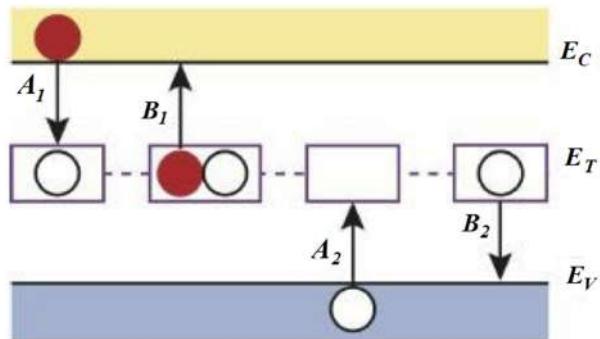


FIGURA LI. Procesos de captura y de emisión de portadores de carga en una trampa [54]

### e) Fósforo fluorescente

El fósforo fluorescente utilizado en los LED blancos está compuesto de materiales policristalinos inorgánicos, también llamados huéspedes, los cuales están dopados con iones metálicos (por lo general tierras raras, debido a la versatilidad en el ancho del espectro de emisión que pueden darse desde líneas hasta secciones de  $200\text{ nm}$ ) que a menudo son llamados activadores. Estos pueden ser el  $\text{Ce}^{3+}$  o el  $\text{Eu}^{2+}$ , los cuales emiten luz visible debido a la previa absorción de luz proveniente de un LED azul. A este fenómeno se le conoce con el nombre de fotoluminiscencia (FIGURA LII), donde se produce el cambio de Stokes, fenómeno en que la longitud de onda del fotón emitido (fotoluminiscente) es mayor que la longitud de onda del fotón incidente [49], [67].

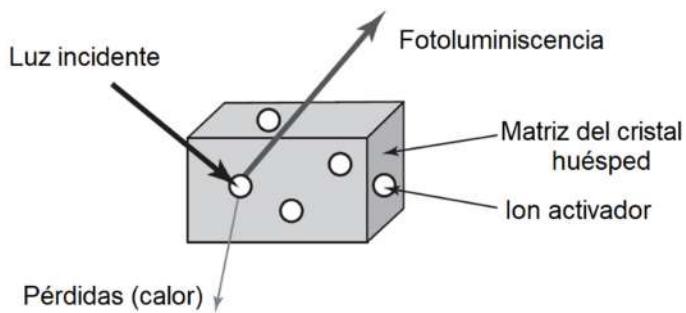
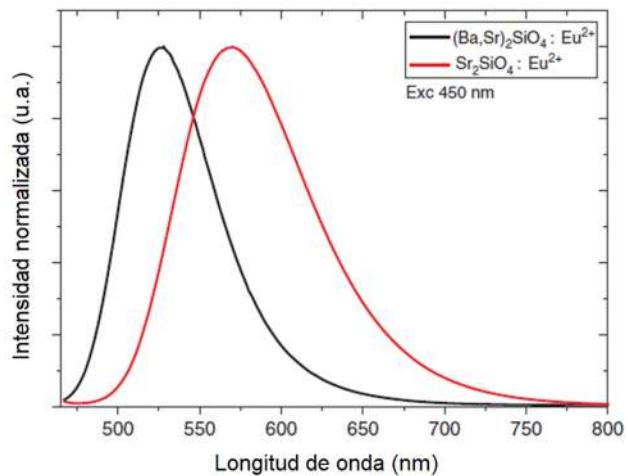


FIGURA LII. Fenómeno de fotoluminiscencia presente en el fósforo fluorescente de un LED blanco [67]

El proceso de emisión de luz se da como consecuencia de transiciones electrónicas entre los niveles de energía de los activadores, los cuales se encuentran dentro de la banda prohibida de los materiales policristalinos huéspedes.

Los huéspedes pueden estar compuestos de granates de aluminio, como por ejemplo el  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ . Así como también podrían ser los sulfuros alcalinotérreos, tales como el  $\text{MgS}$  o el  $\text{CaS}$ . Por citar una variedad más, podría hablarse de los orto silicatos alcalinoté-

rreos, presentando estructuras como el  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  o el  $\text{Sr}_2\text{SiO}_4$  [67] y produciendo cambios de Stokes como el que se muestra en la FIGURA LIII.



### **III. Desarrollo del trabajo de investigación**

En este capítulo se describe el montaje experimental de los equipos utilizados durante la toma de datos, así como la implementación de elementos que fueron necesarios para el montaje de los LEDs en instrumentos de medición tales como el goniofotómetro y la esfera integradora. Se describe también el proceso de colección de datos de mediciones eléctricas y luminotécnicas de los LEDs. Finalmente, se habla sobre el proceso de preparación de estos dispositivos para su posterior análisis en un microscopio electrónico de barrido (SEM) y análisis EDS.

#### **A. Procedimiento para medidas luminotécnicas**

El corazón de este trabajo de investigación radica en esta sección ya que los resultados que se obtendrán por medio del equipamiento y de los métodos descritos aquí, permitirán aclarar en cierto grado las cuestiones que se tienen en torno al comportamiento de los LEDs en función de la temperatura.

##### **1) Acondicionamiento de un dispositivo experimental**

Se cuenta con una caja de madera en forma de paralelepípedo cuyas paredes interiores son de color negro (caja oscura) para evitar la reflexión de la luz. Esta está constituida por dos tapas perforadas. La tapa 1 cuenta con un agujero rectangular de  $8\text{ cm} \times 6,5\text{ cm}$  para el montaje de un sistema de control de temperatura. Por otro lado, la tapa 2 cuenta con dos agujeros circulares de  $52\text{ cm}$  y  $0,3\text{ cm}$  de diámetro para el montaje del sensor de un luxómetro y de la fibra óptica de un espectrofotómetro, respectivamente. Las características descritas hasta el momento, así como particularidades adicionales que componen al diseño de la caja oscura son mostradas en la FIGURA LIV.

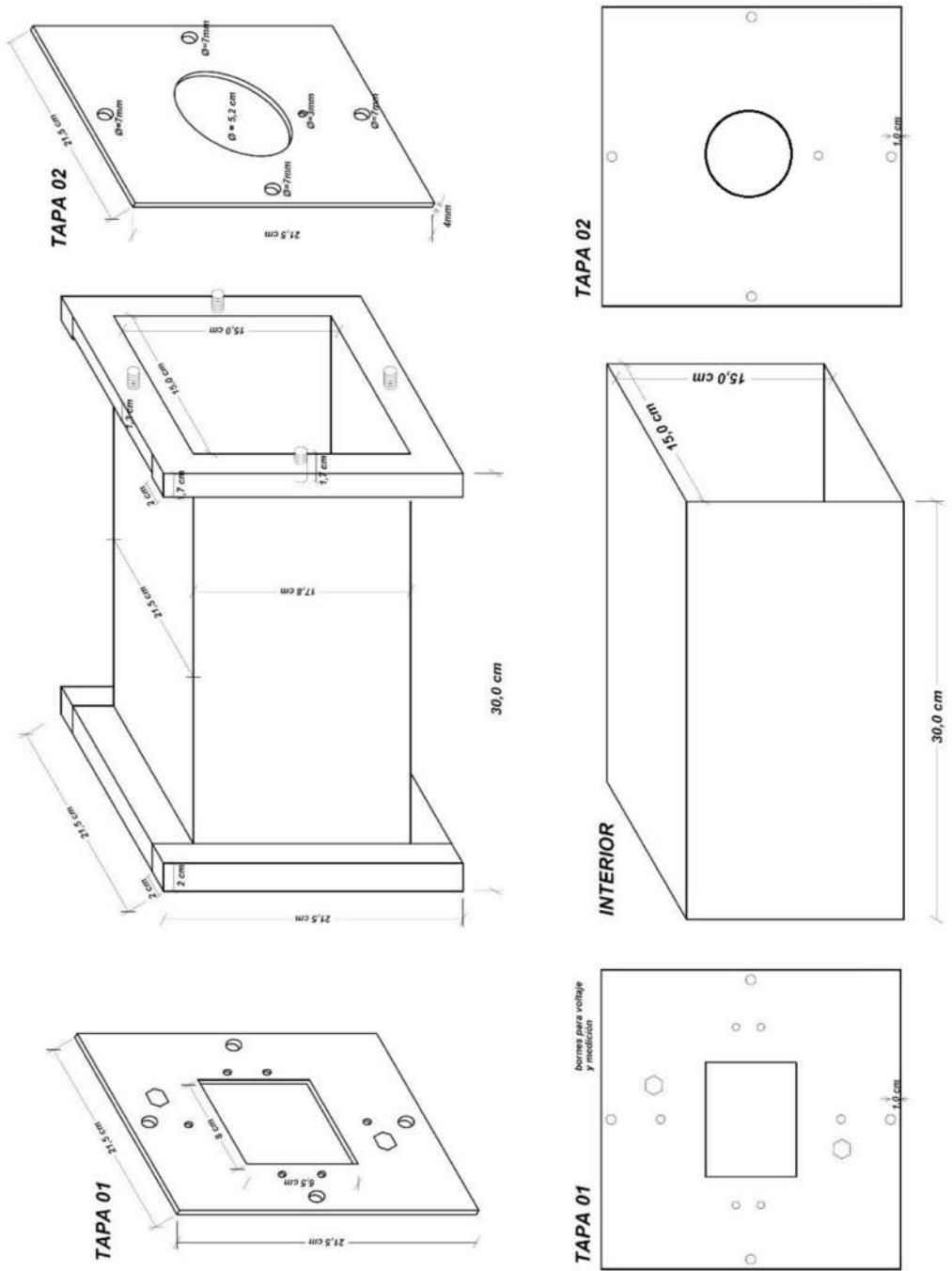


FIGURA LIV. Detalles del diseño de la caja oscura.

En la tapa 1, se encuentra montada una placa de aluminio de  $8,8 \text{ cm} \times 6,8 \text{ cm}$  de superficie. En su cara interior se ubicará un LED de alta potencia junto con un termopar, así como se muestra en la FIGURA LV, mientras que en la cara exterior de la platina de aluminio se encuentra un juego de cuatro celdas Peltier, en seguida está ubicado un disipador de calor junto con un cooler. Este sistema de enfriamiento-calentamiento (SCE) en conjunción con la caja oscura forman al dispositivo experimental (DE) así como se observa en la FIGURA LVI.

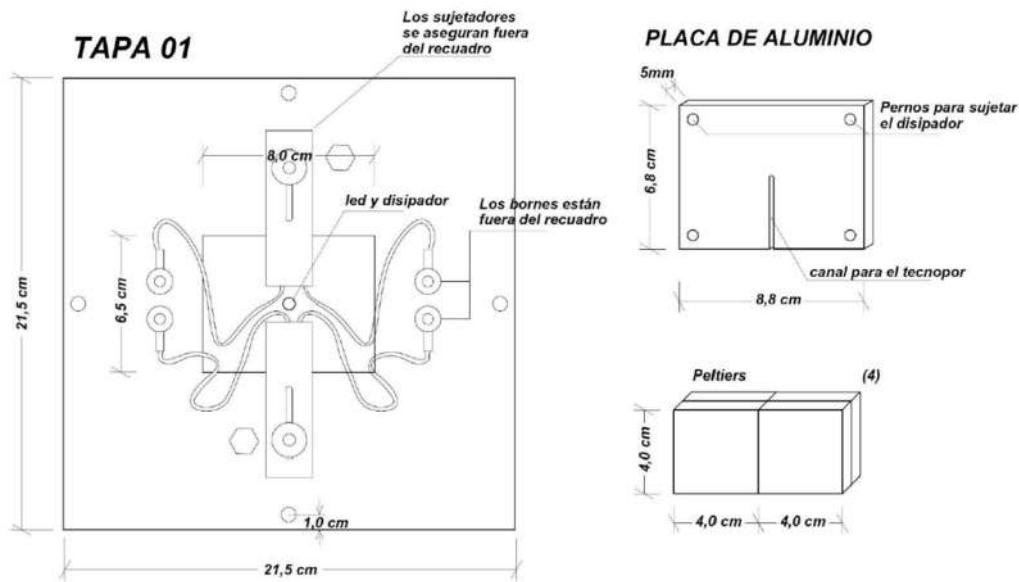


FIGURA LV. Forma física de la tapa 1 y sus componentes.



FIGURA LVI. Esquema longitudinal del DE.

El DE en conjunto con todos los equipos de alimentación, de control y de medición conforman al sistema experimental (SE) mostrado en la FIGURA LVII.

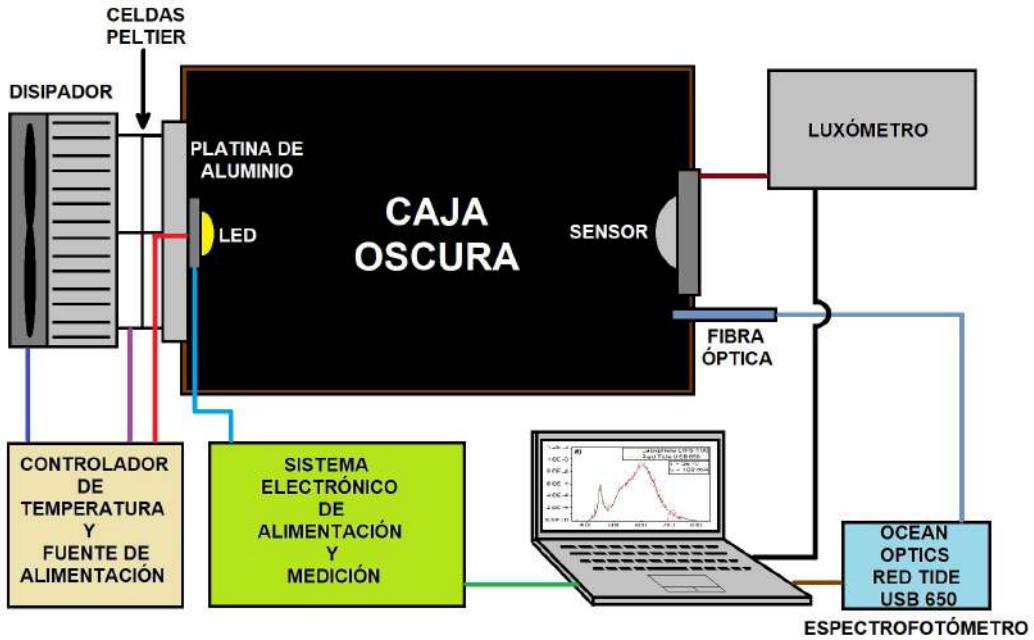


FIGURA LVII. Esquema del SE.

#### a) *Controlador de temperatura y fuente de alimentación*

Estos son los aditamentos del DE relacionados con el SCE. El controlador de temperatura está constituido por un dispositivo del mismo nombre (Marca: Autonics, serie TC4) [68] y un termopar tipo K, los cuales, bajo la configuración de un usuario ayudan a establecer una cierta temperatura en las celdas Peltier del SCE. Mientras que la alimentación está constituida por una fuente de 12 V que energiza al controlador de temperatura y al cooler del DE.

#### b) *Sistema electrónico de alimentación y medición*

Este sistema está constituido por una fuente de alimentación variable (Marca: Wapplek, modelo: KPS3010DF) [69], el cual energiza al LED. Mientras que el sistema de medición está compuesto por una resistencia shunt (Marca: VFR) de 50 mohm [70], un multímetro de banco de alta precisión (Marca: Fluke, modelo: 45) [71] que en conjunto permiten obtener la corriente que fluye por el LED. Adicionalmente, se tiene un multímetro de mano (TM - 145) que mide la tensión en el LED. Finalmente, se cuenta con un relé en conjunción con una placa Arduino UNO [72], que hacen posible la alimentación periódica del LED con ciclos de 2 segundos de encendido y 5 segundos de apagado, a fin de disminuir el incremento de la temperatura por autocalentamiento (FIGURA LVIII)

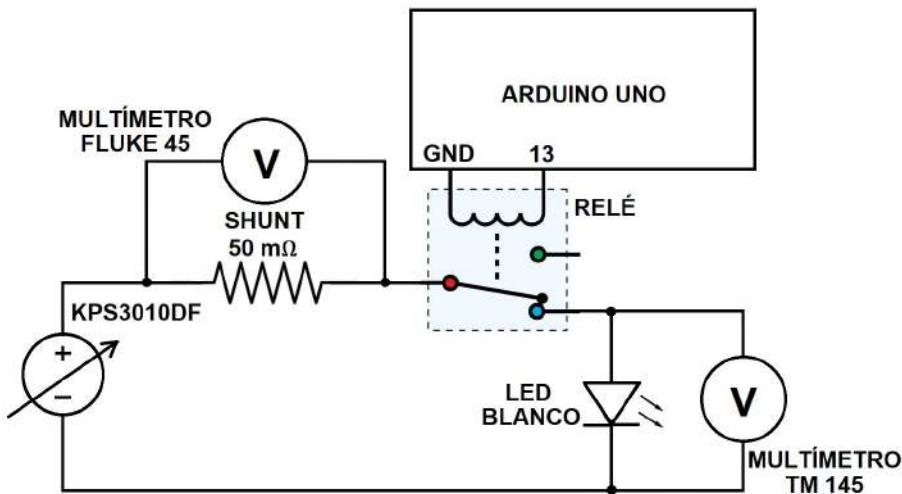


FIGURA LVIII. Circuito del sistema electrónico de alimentación y medición.

### c) Sistema de medición fotométrica

Por último, los instrumentos asociados a la tapa 2 son un luxómetro (Marca: Gossen, modelo: Mavolux 5032B) [73] y un espectrofotómetro (Marca: Ocean Optics, modelo: Red Tide USB 650) [74] controlado por medio de un software de nombre Ocean View [75].

#### 2) Armado de un soporte para un LED de alta potencia en base al casquillo E27

Se tomó una lámpara LED de casquillo E27, cuya bombilla plástica fue cortada en un plano perpendicular a su eje de simetría, de tal manera que se obtenga una apertura circular máxima (FIGURA LIX(a)).

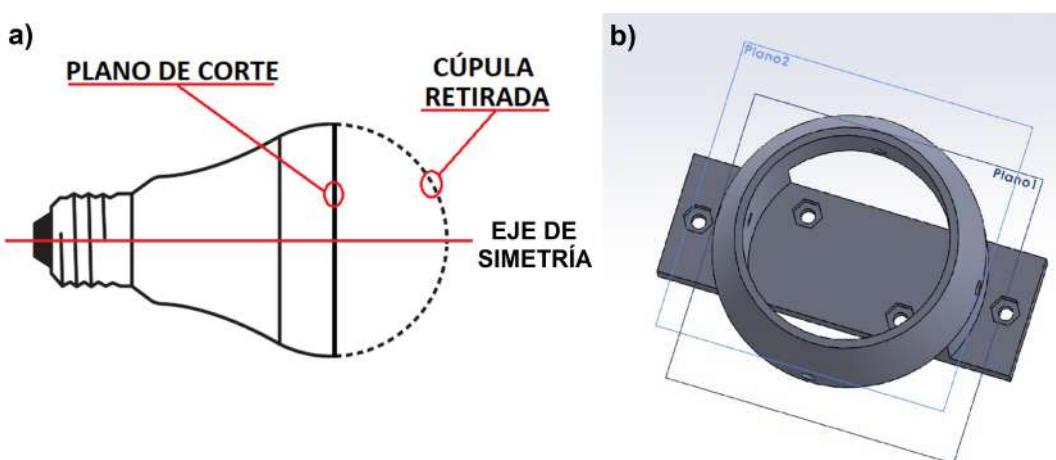


FIGURA LIX. Diseño de un soporte para LEDs de alta potencia con rosca E27. (a) Retiro de trozo de cúpula de una lámpara LED y (b) diseño en 3D de un soporte semiesférico en SolidWorks.

Haciendo uso del software SolidWorks, se diseñó un sistema mecánico semiesférico para el soporte de un disipador de calor de aluminio y un LED de alta potencia (FI-

GURA LIX(b)), el cual fue impreso en una de las impresoras 3D del laboratorio Smart City perteneciente al Centro de Tecnologías de Información y Comunicaciones (CTIC) de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Este pequeño sistema, de ahora en adelante llamado Soporte E27 (SE27), resulta ser muy versátil ya que permite una fácil instalación de un LED de alta potencia en el goniofotómetro y también dentro de la esfera integradora. En la FIGURA LX se observan diferentes vistas del SE27 ya ensamblado.

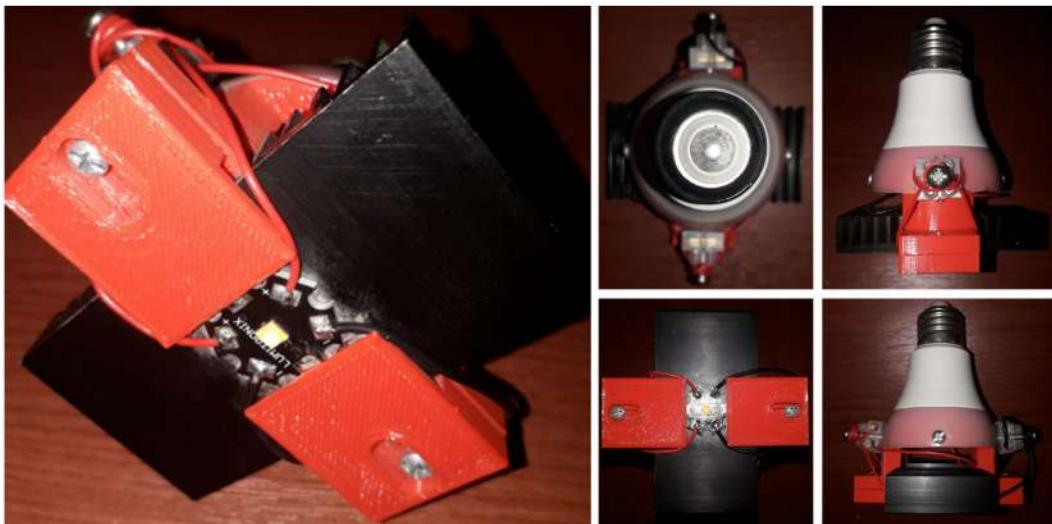


FIGURA LX. Diferentes vistas del ensamblaje del SE27.

### 3) Toma de datos con la esfera integradora Labsphere LMS-400

La intensidad de los espectros que se pueden obtener con el espectrofotómetro Ocean Optics se encuentra en una unidad arbitraria, expresada en número de cuentas, la cual no resulta objetiva al no estar sujeta a unidad estandarizada. Por ello, resulta indispensable el uso de una esfera integradora equipada con un espectroradiómetro que permita obtener espectros con una intensidad expresada en unidad de potencia por nanómetro ( $W \cdot nm^{-1}$ ), permitiendo la posterior calibración del espectrofotómetro en su componente intensidad. La esfera integradora empleada para este propósito es una de marca Labsphere, modelo LMS-400 [76], la cual fue calibrada con una lámpara patrón. Así mismo el espectroradiómetro empleado es de marca Labsphere, cuyo modelo es CDS-1100 [77].

Se debe tener en cuenta que durante el tiempo de manejo de la esfera integradora, la temperatura dentro del laboratorio de fotometría no debe presentar una variación mayor de 1 °C, verificando constantemente el termómetro instalado en este ambiente. Es así que, con las condiciones dadas, se procede con el uso de la esfera tal como se describe a

continuación:

- Se instala un LED en contacto directo con un termopar tipo K en el SE27, el cual luego es colocado dentro la esfera integradora.
- Se realizan las conexiones entre los terminales exteriores de la esfera integradora y los demás elementos mostrados en el esquema de la FIGURA LXI. Tal como se puede observar, este esquema se parece mucho al que se muestra en la FIGURA LVIII, sin embargo, no se hace uso del Arduino UNO, pero si se añaden el termopar y un multímetro (Marca: Prasek, modelo: PR-61C), el cual se encuentra configurado en el rango de milivoltios, para determinar el posible aumento de la temperatura del LED. Luego de verificar las conexiones se cierra la esfera integradora.
- Enseguida, se enciende una lámpara auxiliar, la cual se encuentra dentro de la esfera integradora, dejándola en funcionamiento por unos veinte minutos para asegurar la estabilidad de la misma (durante este proceso el LED se mantiene apagado). Pasado este tiempo se hace la caracterización de la esfera por medio del software LightMtrX.
- Se apaga la lámpara auxiliar y se enciende el LED, regulando la corriente ( $100\text{ mA}$ ) que pasa a través de él y manteniéndolo encendido mientras dure la evaluación con el software LightMtrX. Se procura que este procedimiento sea lo más breve posible a fin de evitar el autocalentamiento en la unión pn del semiconductor.

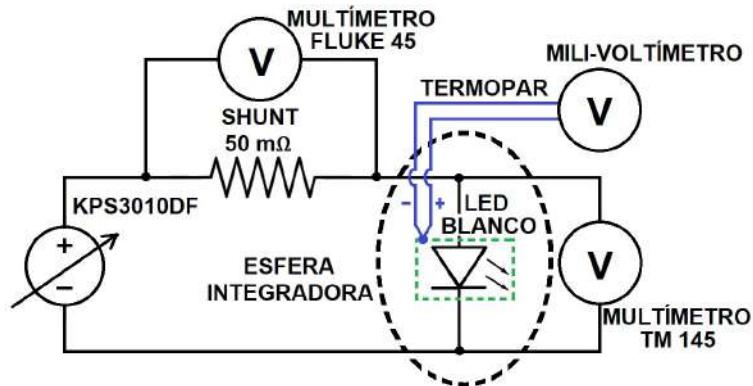


FIGURA LXI. Circuito encargado de la energización y monitorización del LED blanco en la esfera integradora.

En caso de realizar evaluaciones adicionales de lámparas que cuenten con características físicas idénticas a una primera lámpara ya evaluada, no va a ser necesario realizar nuevas caracterizaciones de la esfera integradora con la lámpara auxiliar, procediendo con las evaluaciones de estas de forma directa.

#### **4) Calibración del espectrofotómetro Ocean Optics USB650**

El procedimiento de calibración de un espectrofotómetro Ocean Optics USB 650 ya ha sido tratado y estudiado por el Ingeniero Físico Robert Chala [6], por ello, con fines de realizar un procedimiento similar es que se tomará como referencia su trabajo de tesis de titulación, realizando algunas modificaciones a fin de adaptarla a las necesidades y requerimientos para este trabajo de investigación.

##### **a) Procedimiento experimental para la calibración de la componente longitud de onda**

Para realizar la calibración del eje de longitud de onda en nm, se hizo uso de un juego de cinco lámparas de gases elementales (He, Ne, Ar, Hg y H<sub>2</sub>) las cuales se muestran en la FIGURA LXII. Los espectros de emisión de estos gases han sido estudiados cabalmente por lo que se puede encontrar sus patrones de emisión en la base de datos de entidades acreditadas, en este caso del NIST [78].

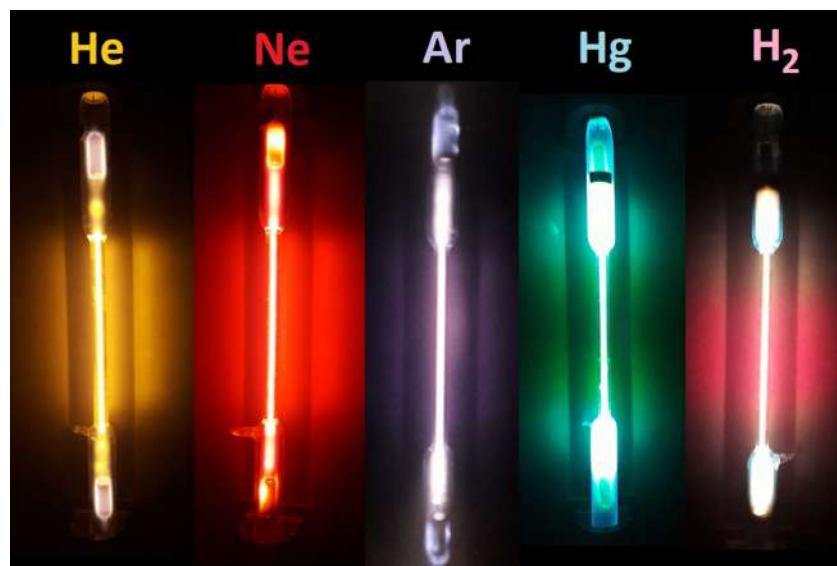


FIGURA LXII. Gases elementales utilizados durante el procedimiento de calibración del espectrofotómetro USB 650.

El procedimiento realizado para la obtención de los patrones espectrales de cada gas consiste en los siguientes pasos:

- Se utiliza la caja oscura del DE como soporte para el espectrofotómetro, lo cual implica el retiro de la tapa 1 para colocar en su lugar una de las lámparas de gas, así como se muestra en el esquema de la FIGURA LXIII.
- Antes del encendido de la lámpara se descarta cualquier otra fuente de luz, mantenien-

do al laboratorio en penumbra. Luego, se realiza la captura de los datos del ruido de oscuridad con el espectrofotómetro Ocean Optics en conjunto con el software Ocean View, enseguida son exportados a un archivo de Excel llamado Espectros\_Patrón.xlsx.

- Como siguiente paso, se enciende la lámpara de gas dejándola encendida entre diez a quince minutos, con la finalidad de obtener una emisión más estable.
- Se realiza una serie de diez mediciones de la intensidad de emisión en función de la longitud de onda. Entre cada captura de datos se toma una pausa de treinta segundos, los cuales también son almacenados en el archivo Espectros patrón. Cabe resaltar que el rango de longitudes de onda tomados por el espectrofotómetro, abarca desde los  $350\text{ nm}$  hasta los  $1000\text{ nm}$ , con una resolución de  $1\text{ nm}$ .
- Los datos correspondientes a cada lámpara de gas son almacenados en cinco hojas de cálculo rotuladas con los nombres de los gases utilizados.

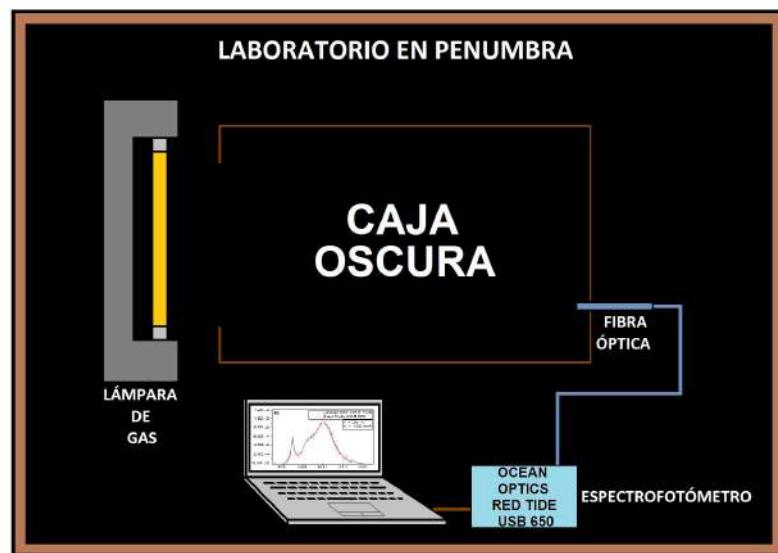


FIGURA LXIII. Condiciones para la obtención del espectro de una lámpara de gas.

**b) Procedimiento experimental para la calibración de la componente intensidad radiométrica**

Con la esfera integradora Labsphere LMS-400 en conjunto con el espetroradiómetro Labsphere CDS-1100 se pueden realizar mediciones absolutas del flujo luminoso de una luminaria, así como también de su densidad de flujo en función de la longitud de onda. Siendo este último el de mayor importancia para esta parte del procedimiento de calibración. Por

tanto, este equipo en conjunto con un LED blanco de alta potencia puede ser utilizado como referencia, procediendo de la siguiente manera:

- Se instala un LED blanco de alta potencia (Marca: CREE, modelo: XP-G3 R5) con una CCT de 2700  $K$  [79] en el DE y se instala el espectrofotómetro en la ranura más pequeña de la tapa 2.
- Se estabiliza al SCE a 25 °C. Manteniendo el LED apagado, se realiza la medición del ruido de oscuridad, repitiendo esta medida nueve veces más y guardando la data en un archivo de Excel llamado Datos\_LEDs\_1.xlsx.
- Se enciende el LED bajo una corriente continua de 100 mA, enseguida se configura el tiempo de exposición del espectrofotómetro con el software Ocean View a fin de no saturar de iluminación al instrumento. Luego se capturan los datos de las intensidades que conforman al espectro. Se procura que la medición sea lo más breve posible para evitar el autocalentamiento del LED, repitiendo este procedimiento nueve veces más con lapsos de apagado de un minuto a fin de mantener al LED a 25 °C.
- Luego se extrae el LED del DE para ser instalado en la esfera integradora en conjunto con el SE27 y se sigue el procedimiento descrito en el apartado *Toma de datos con la esfera integradora Labsphere LMS-400*.
- Posteriormente, se obtiene un archivo en formato XML el cual es exportado a Microsoft Excel para su posterior análisis y uso en el proceso de calibración. La densidad de flujo captada por la esfera integradora cubre un rango más estrecho en el espectro, desde los 350 nm hasta los 850 nm a diferencia que el espectrofotómetro que va desde los 350 nm hasta los 1000 nm, por lo que el intervalo de análisis queda determinado por el rango de la esfera integradora.
- Este mismo procedimiento se repite para los LEDs blancos de alta potencia CREE XP-L U6 [80] y XP-G3 S5 [79] con CCT de 3000 K y 6000 K, respectivamente.

### **5) Colección de datos con el DE**

La toma de datos con el DE propiamente dicha, se realiza en esta sección. A continuación, se dan detalles de este procedimiento:

- Se instala un LED blanco de alta potencia en el DE y se monta el SE completamente según el esquema mostrado inicialmente en la FIGURA LVIII.
- Manteniendo el LED apagado, se estabiliza al SCE a  $10^{\circ}C$  con ayuda del controlador de temperatura, esperando dos minutos aproximadamente para que el LED alcance dicha temperatura.
- Se programa el Arduino UNO para que el relé cierre y abra el circuito de alimentación del LED por intervalos de dos y cinco segundos, respectivamente de manera periódica. Luego se regula la tensión del LED de tal manera que la corriente que circula a través de él sea de  $0,2\text{ mA}$ .
- Se registran los datos de tensión, corriente eléctrica e iluminancia, así como la captura de datos pertenecientes al espectro proporcionado por le espectrofotómetro.
- Este procedimiento se repite para corrientes eléctricas en  $\text{mA}$  de: 1, 2, 10, 20, 100, 200, ..., 800 y 900. Terminada esta secuencia, se repite varias veces esta secuencia para las temperaturas en  $^{\circ}C$  de: 25, 50, 75 y 95. Todo este proceso se logra visualizar en el diagrama de flujo de la FIGURA LXIV.

Esta colección de datos es aplicada para cada uno de los tres LEDs CREE utilizados (XP-G3 R5, XP-L U6 y XP-G3 S5) y la información es almacenada en diferentes libros de Excel que llevan nombres alusivos a los LEDs bajo estudio, tales como: Datos\_LED\_2700K.xlsx, Datos\_LED\_3000K.xlsx y Datos\_LED\_6000K.xlsx.

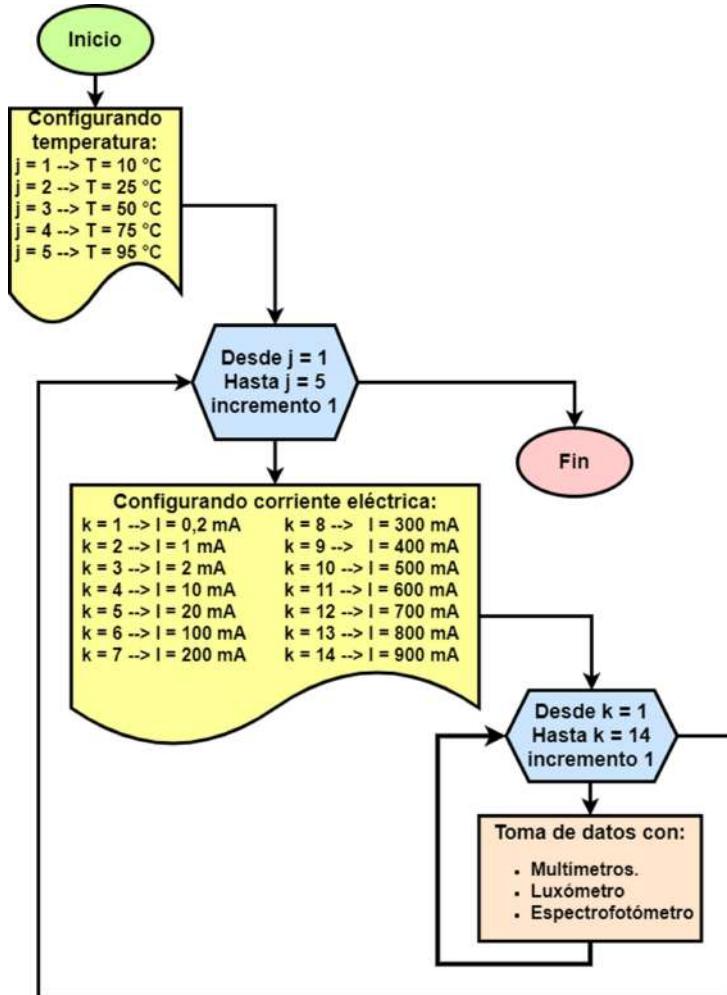


FIGURA LXIV. Diagrama de flujo de la colección de datos con el sistema experimental.

#### **6) Uso de un goniofotómetro para LEDs blancos de alta potencia**

El goniofotómetro del Laboratorio de Fotometría de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, posee dos grados de libertad, siendo uno de ellos,  $\theta$  (polar) que barre arcos entre los  $0^\circ$  y  $90^\circ$  con una resolución de  $2^\circ$ , mientras que  $\varphi$  (azimutal) barre una circunferencia completa con una resolución de  $22,5^\circ$ . El sistema mecánico de giro que da soporte a estos grados de libertad es controlado por un software implementado en el lenguaje gráfico LabView, activando de manera periódica los motores a pasos que la componen. Mientras que el luxómetro, el cual está equipado con un colimador para evitar la medición de luces ajenas a la de la fuente, se ubica a un metro del LED. Dadas estas condiciones, se procede de la siguiente manera:

- Se instala el LED en el SE27, luego, este último se enrosca en el socket del goniofotómetro y se alinea el disco de giro polar con el LED de tal manera que los giros

polar y azimutal del sistema mecánico no altere la posición espacial del LED respecto al luxómetro.

- Se energiza el LED con una corriente de  $300\text{ mA}$ , ya que a menores corrientes la iluminación se torna tenue y a mayores corrientes se produce un notorio autocalentamiento del LED. Luego se procede con la activación del sistema mecánico por medio del software, iniciando con la rotación automatizada de los discos de giro polar y azimutal, a fin de ubicarlos en su posición inicial de medición.
- Se apagan todas las luces del laboratorio que puedan interferir con la calidad de las mediciones de iluminancia por parte del luxómetro y se confirma el inicio de las mediciones mediante el software, comenzando así con la toma de datos.
- La data es almacenada en un archivo de texto plano de extensión .txt, el cual se puede exportar posteriormente a un formato Excel, MatLab u Origin para la realización de los gráficos en coordenadas polares que permitan la obtención de las curvas fotométricas.

Este mismo procedimiento se repite para cada uno de los tres LEDs CREE (XP-G3 R5, XP-L U6 y XP-G3 S5).

### **7) Colección semiautomatizada de sondeo de temperatura del LED con el DE y un termopar tipo K**

El procedimiento experimental descrito hasta ahora estuvo más enfocado en observar cómo las magnitudes fotométricas de un LED blanco de alta potencia se ven afectadas por la temperatura de operación, para ello se procuró evitar el autocalentamiento del LED. Sin embargo, en esta sección se desea realizar un procedimiento experimental para, posteriormente, determinar la contribución de temperatura del autocalentamiento a la temperatura de operación del LED. Con este objetivo, se establecieron tres rutinas de energización del LED CREE XP-L U6 (CCT:  $3000\text{ K}$ ) descritas a continuación:

- El LED es instalado en el DE, añadiendo un termopar tipo K sobre el disipador de calor del propio LED, estando lo más cerca posible a la cúpula plástica del semiconductor. Mejorando el contacto térmico al aplicarse pasta térmica.
- Se añade un módulo MAX6675 [81], el cual está diseñado para trabajar con termopares de tipo J, K, etc. Este módulo se conecta al microcontrolador Arduino UNO y al

termopar (FIGURA LXV). Las tres rutinas de energización, las mediciones de temperatura y el almacenamiento de los datos son automatizados por medio de dos algoritmos llamados `Temperatura_Tiempo.ino` y `datosMAX6675.py` escritos en el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) de Arduino y en lenguaje Python en VScode, respectivamente. Guardando los datos en múltiples archivos de extensión .txt. Los circuitos en detalle, así como, los algoritmos son presentados en el ANEXO C.

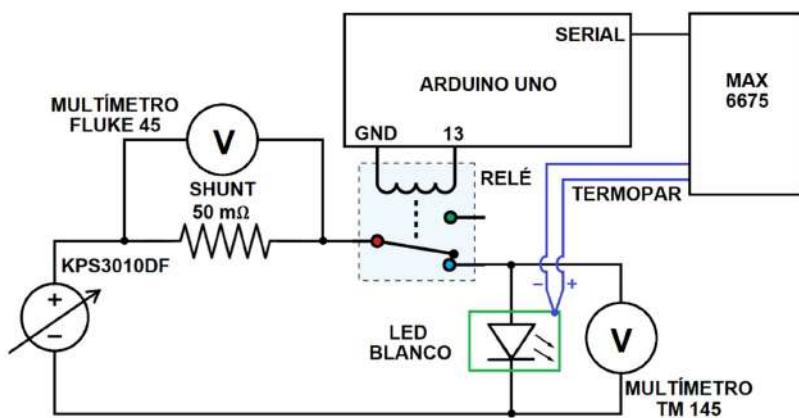


FIGURA LXV. Circuito encargado de la energización y monitorización del LED blanco instalado dentro de la CO del DE adaptado al módulo MAX6675.

- Las rutinas de energización y medición de temperatura (REMT), bajo las TO de 25 °C y 95 °C constan con un número de períodos globales de energización (NPGE) igual a 10 minutos, cada periodo global de energización (PGE) está conformado por cinco minutos de encendido y cinco minutos de apagado, iniciando el primero con 100 mA de CC, el segundo con 200 mA y así sucesivamente, hasta el décimo periodo con 1000 mA. Dentro de cada semiperíodo de encendido se cuentan con tres posibles períodos locales de energización (PLE): el primero de cinco minutos continuos de alimentación, el segundo está constituido por múltiples ciclos de dos segundos de encendido y cinco segundos de apagado, por lo que su rutina es llamada 2U5D (U: Up, D: Down), finalmente, el tercero consta de dos segundos de encendido y dieciocho segundos de apagado, cuya rutina es llamada 2U18D. Todas las rutinas se encuentran resumidas en la TABLA VI.
- La regulación de la corriente aplicada durante cada una de las rutinas de energización y medición se realizan de forma manual.

TABLA VI

Descripción de las rutinas de medición de temperatura del LED CREE XP-L U6.

REMT	TO (°C)	PGE (min)	PLE (s)	NPGE	I (mA)
Continuo			300		100
2U5D	25		7		a
2U18D			20		
Continuo		10		10	1000
2U5D	95		7		$\Delta I = 100$
2U18D			20		

## B. Análisis morfológico y elemental del fósforo fluorescente y del semiconductor que componen a los LEDs blancos de alta potencia

Para esta parte del procedimiento experimental, fueron analizados una serie de seis LEDs, los cuales no cuentan con una marca en específico, pero si poseen características diferentes entre sí, como se verá más adelante. Previamente, se da una mirada superficial de la física detrás de las tecnologías utilizadas para esta parte del trabajo experimental.

### 1) Microscopía digital

Un microscopio óptico funciona mediante un conjunto de lentes que amplían considerablemente una imagen utilizando la luz proveniente de una muestra colocada debajo del objetivo del instrumento. Esta imagen se proyecta a través del ocular para finalmente llegar al ojo humano.

Por otro lado, un microscopio digital opera de manera similar al microscopio óptico, pero con una diferencia fundamental: en lugar de utilizar un ocular, emplea un sensor del tipo CCD (Charged Coupled Device) o CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor). Este sensor está compuesto por un arreglo de fotodiodos llamados píxeles, los cuales capturan los fotones que conforman la imagen ampliada. Posteriormente, las señales de voltaje generadas por la estimulación de los fotodiodos se convierten en señales digitales y se procesan para crear una imagen que puede ser visualizada en un monitor [82].

En la FIGURA LXVI se presenta un esquema que ilustra el funcionamiento de un microscopio digital.

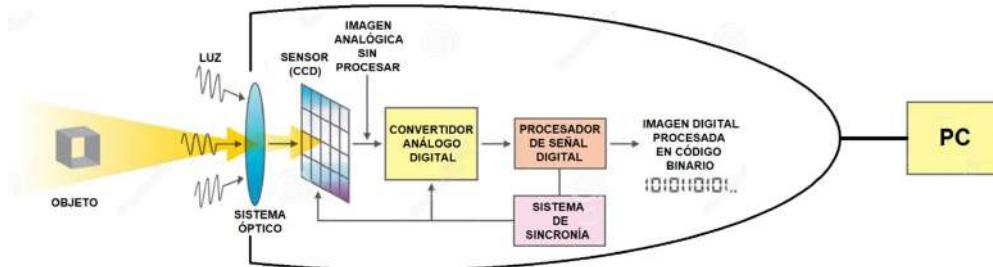


FIGURA LXVI. Estructura y procesamiento básico de la imagen producida por un microscopio digital [83]

Antes de que los LEDs fueran sometidos al análisis del microscopio electrónico de barrido (SEM) y al análisis EDS, se capturaron imágenes de ellos utilizando un microscopio digital de bolsillo de la marca Dino-Lite, el cual se puede controlar mediante el software Dinocapture [84]. Esto permitió obtener imágenes utilizando iluminación en el rango de luz UV, IR y visible.

La elección de utilizar iluminación UV se basó en su capacidad para observar con detalle el fósforo presente en algunas de las muestras, así como para observar con mejor detalle a los semiconductores.

## 2) Microscopía electrónica de barrido y análisis EDS

Para esta parte se utilizó un microscopio electrónico de barrido o SEM, por sus siglas en inglés. Este instrumento funciona, básicamente, capturando electrones secundarios (ES) (electrones atómicos con una energía de alrededor de los  $50\text{ eV}$ ) que fueron extraídos de una muestra debido al bombardeo de un haz de electrones primarios (EP), los cuales fueron generados por emisión termoiónica en un filamento de wolframio, componente del cañón de electrones del SEM, estos son acelerados por un campo eléctrico (asociado a una diferencia de potencial entre los  $0,1\text{ kV}$  y los  $30\text{ kV}$ ) presente en el cañón electrónico. Luego, este haz pasa por una serie de colimadores magnéticos y diafragmas metálicos. El objetivo es disminuir el diámetro del haz, desde los  $5-50\text{ }\mu\text{m}$  (diámetro inicial) hasta los  $2-20\text{ nm}$  (diámetro final del haz que llega a la muestra) y también, evitar el paso de electrones que se encuentren fuera del haz. Cabe resaltar que el interior del SEM se debe encontrar en un alto vacío (alrededor de  $10^{-7}\text{ Torr}$ ) para evitar la colisión de electrones con partículas compuestas por algún gas presente [85, 86] (FIGURA LXVII).

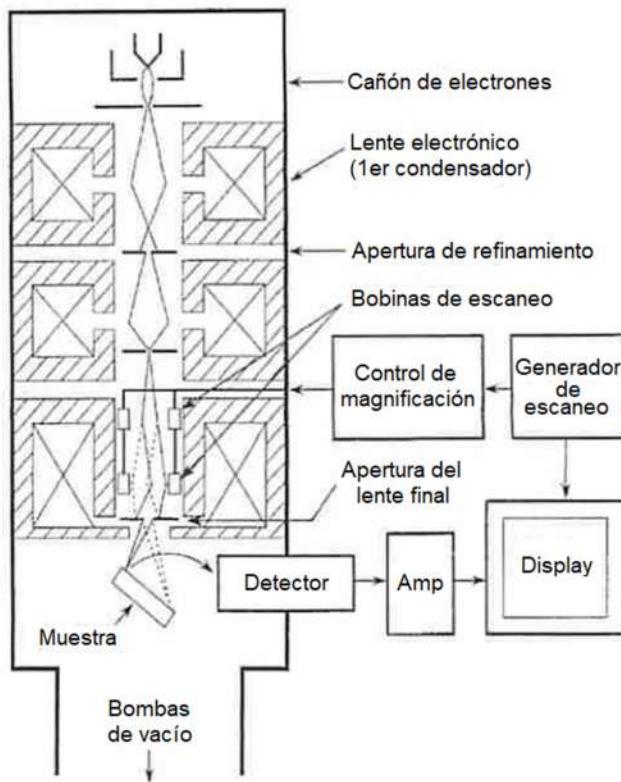


FIGURA LXVII. Esquema básico del SEM [85]

La formación de las imágenes se da a partir de los ES captados por el colector, el cual transforma la energía de los electrones en fotones, de tal manera que, a más electrones captados de alguna zona de la muestra implica mayor brillo y en contraparte, la poca captación de electrones de alguna otra zona implica un menor brillo. Obteniéndose imágenes en una escala de grises, proporcionando una sensación de relieve y profundidad [85], [86].

Por otro lado, el bombardeo de EP implica la generación de emisiones electromagnéticas por parte de los átomos de la muestra, ya que se aparecen vacancias en el nivel K de los átomos (donde anteriormente se hallaban los ES), las cuales son ocupadas por electrones procedentes de niveles de la capa L<sub>3</sub>, generando dicha emisión, la cual suele estar en el rango perteneciente a los rayos X. Esta radiación es captada por un detector EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy/Spectrometer) con lo que se obtiene el espectro característico de cada elemento analizado.

En la FIGURA LXVIII(a) se observa la incidencia de un EP sobre un electrón del nivel K de un átomo de la muestra, generándose un ES. Luego, el EP pierde energía, pero queda con la suficiente como para poder escapar del ion, convirtiéndose en un electrón retrodispersado (ERD). Seguidamente, en la FIGURA LXVIII(b) se observa la emisión de un fotón de rayos X, según lo ya descrito en el párrafo anterior [87].

En la FIGURA LXIX se observa el microscopio SEM Zeiss EVO MA10 utilizado en la Facultad de Ciencias de la UNI [88].

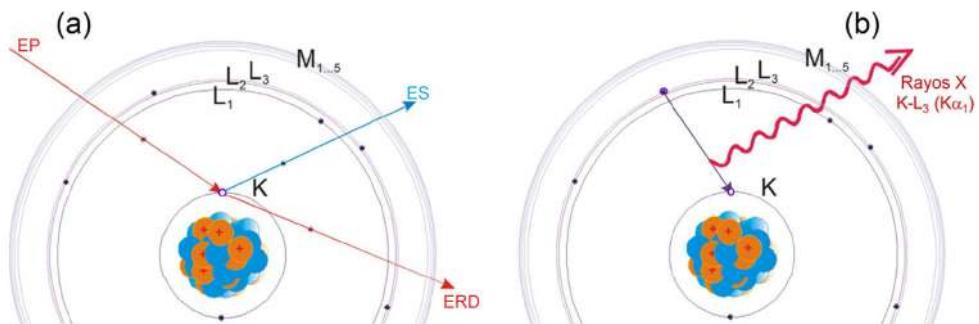


FIGURA LXVIII. Principio físico del análisis EDS de una muestra. (a) Incidencia de un EP y generación de un ES y un ERD, (b) Emisión de rayos X por medio de la estabilización del ion debido a la caída de un electrón del nivel  $L_3$  al K [87]



FIGURA LXIX. SEM de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Para la determinación de la composición elemental de los LEDs blancos de alta potencia se prepararon seis LEDs sin marca (cuatro de tono cálido y dos de tono frío), estos fueron categorizados según como se muestra en la TABLA VII.

TABLA VII

Codificación y descripción de los LEDs blancos a analizar.

Código	Descripción	Laboratorio de análisis	Con fósforo	Sobrecargado
1	LED cálido		<input type="radio"/>	
2	LED frio	CIMAV	<input type="radio"/>	
3	LED cálido	Chihuahua		
4	LED frio	México		
5	LED cálido			<input type="radio"/>
6	LED cálido	SEM FC - UNI	<input type="radio"/>	

- A los LEDs 1, 2 y 6 solo se les retiró la cubierta plástica y el lente de gel que los cubrían.
- A los LEDs 3 y 4 además de haberles retirado estos elementos, también se les retiró el fósforo fluorescente, dejando a los semiconductores expuestos.
- El LED 5 fue sometido a tensiones eléctricas de polarización directa superiores a las que puede soportar, deteriorándolo, luego se le extrajo el fósforo para poder determinar si ha ocurrido algún cambio en la composición elemental del semiconductor.

Los LEDs 1, 2, 3, 4 y 5 fueron enviados al CIMAV en Chihuahua, México donde fueron analizados en su Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), además de realizarles el análisis EDS. Posteriormente, el LED 6 fue analizado en el SEM de la facultad de Ciencias de la UNI.

## IV. Análisis y discusión de resultados

En esta sección, los datos obtenidos durante el procedimiento experimental son presentados y analizados. Posteriormente, los resultados conseguidos son puestos a discusión, a fin de encontrar las respuestas a los cambios que experimentan las magnitudes eléctricas y luminotécnicas como consecuencia de variaciones en la temperatura.

### A. Resultados eléctricos, fotométricos y espectrofotométricos

Con la finalidad de mantener un orden en la descripción de los resultados y sus discusiones, se opta por, inicialmente, hablar de manera breve sobre el proceso de calibración del espectrofotómetro. Bajo esta base, se procede con la exposición de los resultados eléctricos, fotométricos y espectrofotométricos. Complementando a esto se discute sobre las curvas fotométricas obtenidas con el goniofotómetro y finalmente, se hace un breve análisis de la temperatura de uno de los LEDs blancos de alta potencia debido a su autocalentamiento.

#### 1) Calibración del espectrofotómetro

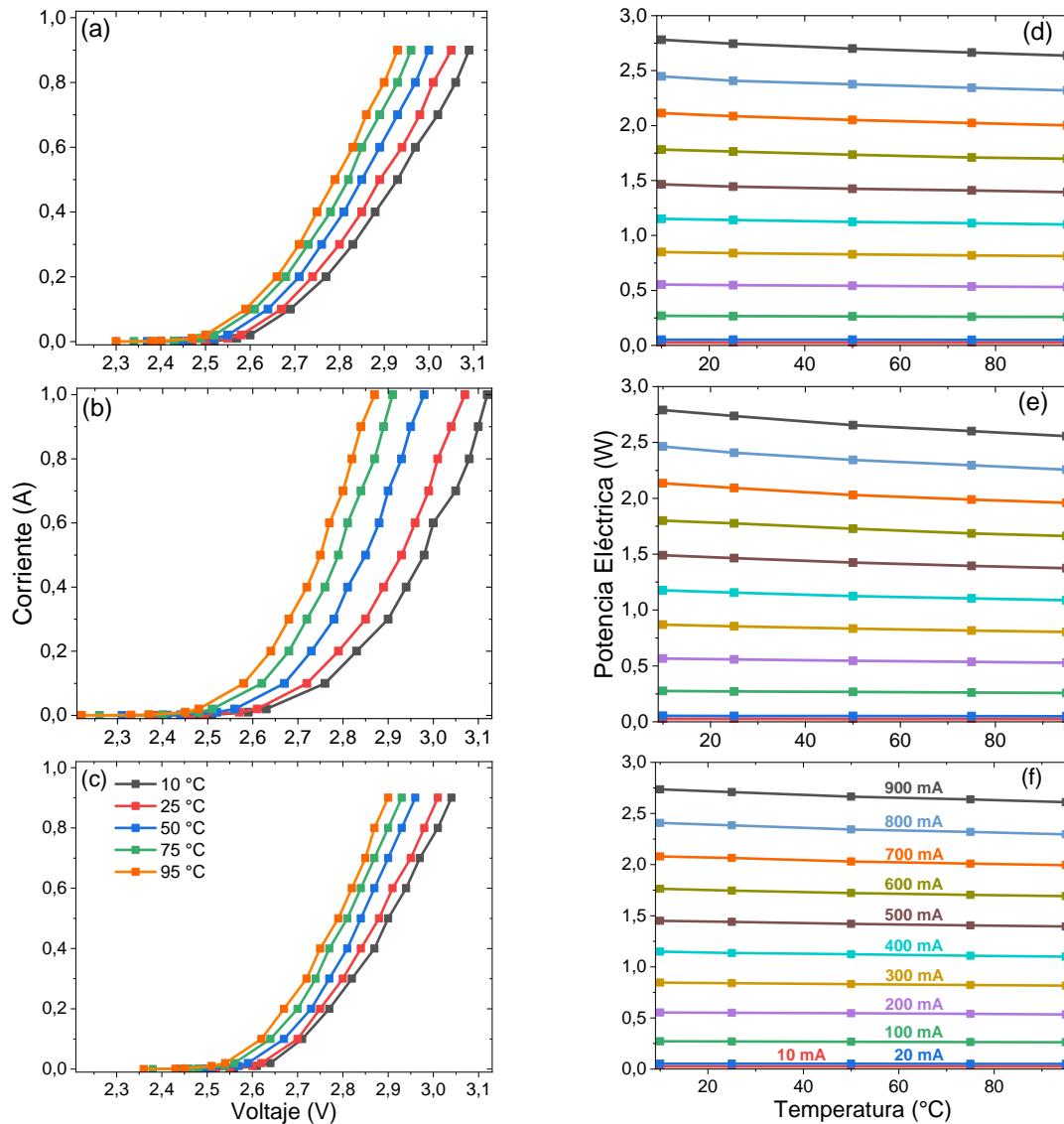
Para calibración del espectrofotómetro Ocean Optics en la longitud de onda se recurrió a un método estadístico (diagrama de caja y bigotes) [89] para descartar algunos valores atípicos presentes en el ruido de oscuridad. Posteriormente, basándose en los resultados de los espectros de emisión de las lámparas de gas, se realizó el análisis de errores e incertidumbres, tomando como referencia el procedimiento de calibración de espektorradímetros OP-003 del Centro de Español de Metrología (CEM) [90].

Por otro lado, para la calibración del espectrofotómetro Ocean Optics en las intensidades por cada longitud de onda, se utilizaron los tres LEDs blancos de alta potencia CREE con CCTs de 2700  $K$ , 3000  $K$  y 6000  $K$ . Por lo tanto, los resultados que se obtuvieron fueron referenciales, permitiendo obtener factores de conversión nanómetro a nanómetro correspondientes a cada LED.

En el anexo B se puede conocer más de cerca los detalles concernientes a esta parte del procedimiento de calibración, así como sus resultados.

## 2) Resultados eléctricos de los LEDs con el SE

Al analizar los datos almacenados en los archivos Excel Datos\_LED\_2700K.xlsx, Datos\_LED\_3000K.xlsx y Datos\_LED\_6000K.xlsx concernientes a las mediciones eléctricas realizadas durante el procedimiento experimental, se consiguen los resultados mostrados en la FIGURA LXX



En las FIGURAS LXX(a, b y c) se observan las curvas características de los LEDs blancos CREE sometidos a diferentes condiciones de temperatura. Se aprecia que, incrementando este parámetro, la tensión disminuye para los mismos valores de corriente, implicando el desplazamiento de derecha a izquierda de las curvas características, sugiriendo una posible disminución de la potencia eléctrica con el aumento de temperatura (Curvas ca-

racterísticas en polarización directa e inversa en el anexo C). A fin de corroborar ello, en las FIGURAS LXX(d, e y f) se muestra a la potencia eléctrica en función de la temperatura para diferentes niveles de corriente, observándose que la potencia se mantiene casi constante ante la variación de la temperatura para corrientes eléctricas bajas (menores o iguales a 100 mA). Luego, para valores de corriente por encima de los 100 mA se observa una disminución de la potencia eléctrica ante el incremento de la temperatura, donde la mayor variación es de aproximadamente -0,25 W entre las TO de 10 °C y 95 °C bajo una corriente constante de 900 mA.

### **3) Resultados fotométricos de los LEDs con el SE**

La información contenida en los archivos Excel llamados Datos\_LED\_2700K.xlsx, Datos\_LED\_3000K.xlsx y Datos\_LED\_6000K.xlsx, también incluyen datos asociados a las cantidades fotométricas que se desean analizar. Siendo estas el flujo luminoso y la eficacia luminosa, ya que son las magnitudes normalmente reportadas de manera comercial. A continuación, se hace diversos análisis de estas cantidades.

#### **a) Flujo luminoso en función de parámetros eléctricos**

Los datos fotométricos adquiridos mediante el uso del SE, originalmente se encuentran expresados en  $lx$ . Pero, para poder expresarlos en  $lm$  se recurre a un factor de proporcionalidad determinado por el flujo luminoso y la iluminancia de un LED blanco. Estas cantidades fotométricas son adquiridas por medio de mediciones realizadas con la esfera integradora y con el SE, bajo condiciones de corriente y temperatura de 100 mA y 25 °C, respectivamente.

Por otro lado, la eficacia luminosa se obtiene mediante el cociente entre el flujo luminoso del LED y la potencia eléctrica consumida por el mismo ( $\eta_v = \Phi_v / P_{LED}$ ), siendo su magnitud:  $lm \cdot W^{-1}$  [11].

En las FIGURAS LXXI(a, b y c) se muestra al flujo luminoso en función de la corriente eléctrica para diferentes temperaturas de operación de los LEDs CREE. Inicialmente el flujo luminoso presenta un comportamiento casi uniforme para corrientes menores a los 0,1 A (100 mA). Luego, se observa variaciones más acentuadas del flujo luminoso para los mismos niveles de corriente al incrementarse la temperatura. Siendo de -75 lm la mayor variación bajo una corriente de 1 A, entre los 10 °C y 95 °C (FIGURA LXXI(b)). Esto se podría percibir como una disminución en el brillo de los LEDs. De manera complementaria, en

las FIGURAS LXXI(d, e y f) se muestra al flujo luminoso en función de la potencia eléctrica, viendo cómo la variación del flujo presenta un comportamiento bastante similar al que se da frente a la corriente eléctrica, notándose que la variación de flujo luminoso de  $-75 \text{ lm}$ , mencionada anteriormente, se da para una potencia eléctrica de alrededor de los  $3 \text{ W}$ .

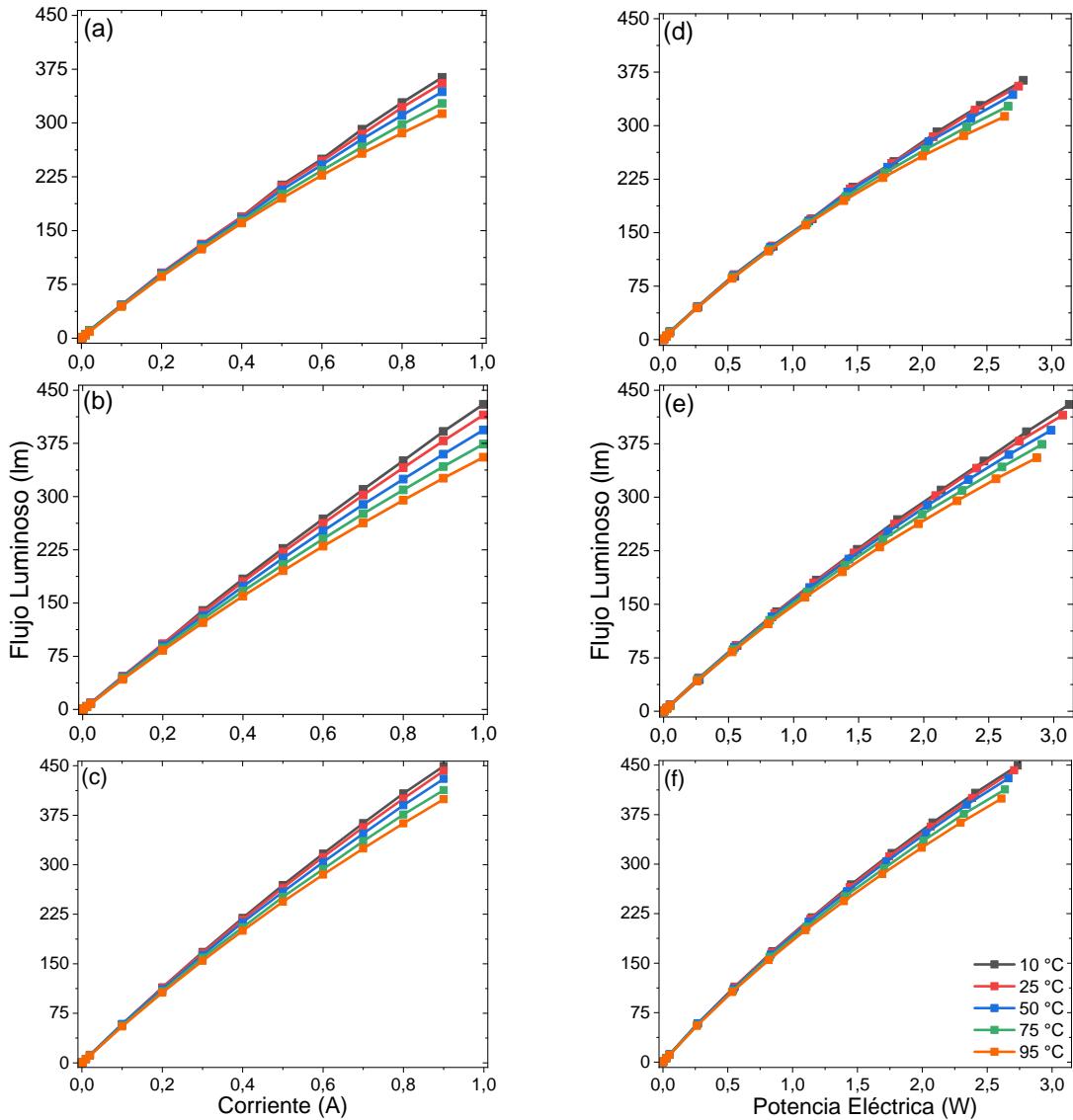


FIGURA LXXI. Flujo luminoso en función de la corriente y de la potencia eléctrica bajo diferentes niveles de temperatura aplicados a los LEDs blancos de alta potencia CREE (a), (d) XP-G3 R5, (b), (e) XP-L U6 y (c), (f) XP-G3 S5.

### b) Parámetros fotométricos en función de la temperatura

En las FIGURAS LXXII(a, b y c) se presenta al flujo luminoso en función de la temperatura. Observando variaciones de flujo luminoso de tan solo  $-2 \text{ lm}$  o  $-3 \text{ lm}$  a lo largo del todo el rango de temperaturas para corrientes menores o iguales a los  $100 \text{ mA}$ . Luego, para mayores niveles de corriente, se van acentuando estas variaciones, alcanzando los  $-66 \text{ lm}$  como el mayor cambio de flujo luminoso (FIGURA LXXII(b)). Se puede notar el gran pareci-

do de estas gráficas con las mostradas en las FIGURAS LXX(d, e y f), lo cual tiene sentido, considerando que el flujo luminoso y la potencia eléctrica son dimensionalmente análogos.

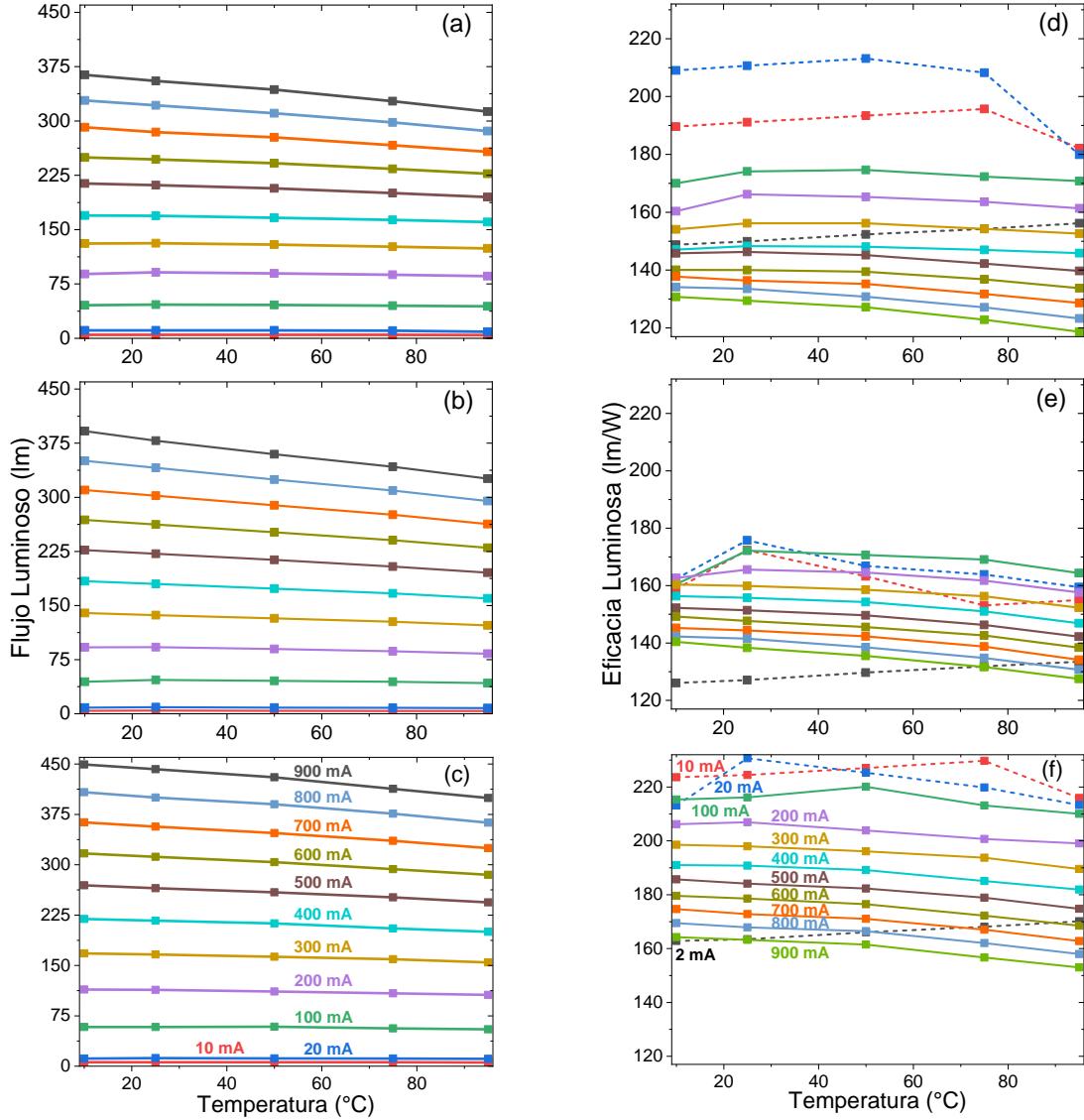


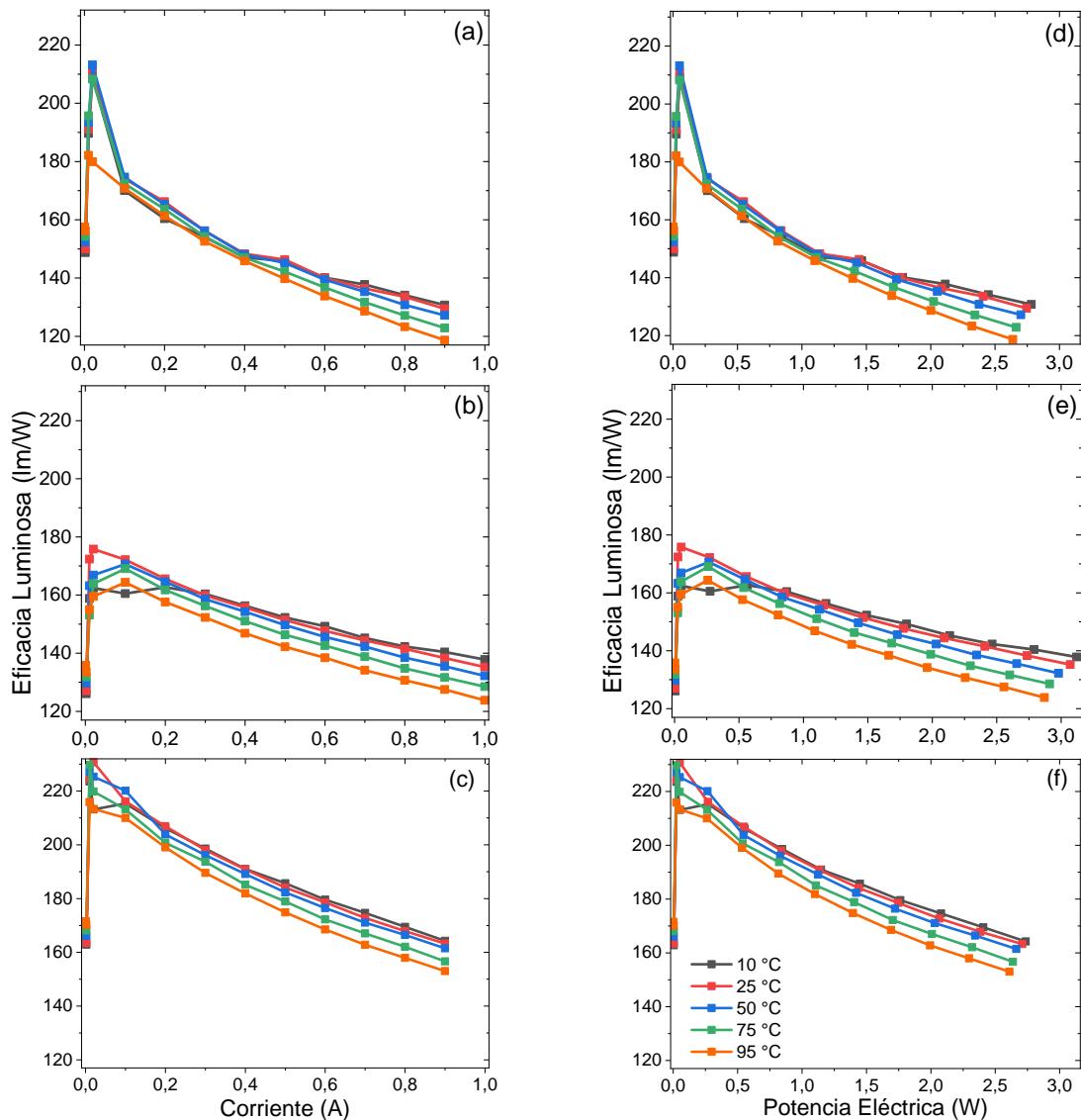
FIGURA LXXII. Flujo luminoso y eficacia luminosa en función de la temperatura, bajo diferentes niveles de corriente para LEDs blancos de alta potencia CREE (a), (d) XP-G3 R5, (b), (e) XP-L U6 y (c), (f) XP-G3 S5.

Por otro lado, la eficacia luminosa en función de la temperatura para diferentes condiciones de corriente se muestra en las FIGURAS LXXII(d, e y f). Una característica que resalta de manera general para los tres LEDs, es que la eficacia luminosa va en aumento desde los  $2\text{ mA}$  hasta los  $20\text{ mA}$ , siendo este último para el que se alcanza la mayor eficacia en al menos un punto de evaluación dentro de las temperaturas de operación, alcanzando los  $212\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ,  $177\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$  y  $231\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ , respectivamente. Luego, desde los  $100\text{ mA}$ , la eficacia va disminuyendo a un ritmo más estable, desde  $175\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$  hasta  $117\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$  (FIGURA LXXII(d)), desde  $172\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$  hasta  $123\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$  (FIGURA LXXII(e)) y desde  $220$

$lm \cdot W^{-1}$  hasta  $153 lm \cdot W^{-1}$  (FIGURA LXXII(f)).

### c) Eficacia luminosa en función de parámetros eléctricos

La eficacia luminosa en función de la corriente se muestra en las FIGURAS LXXIII(a), b y c).



Se observa cómo la eficacia aumenta de manera muy rampante y casi uniforme independientemente de la TO, llegando hasta los  $213 lm \cdot W^{-1}$ ,  $177 lm \cdot W^{-1}$  y  $230 lm \cdot W^{-1}$  para corrientes alrededor de los  $0,02 A$  ( $20 mA$ ) (FIGURA LXXIII(a), LXXIII(b) y LXXIII(c)) y para potencias eléctricas dentro de un intervalo desde los  $0,05 W$  hasta los  $0,3 W$  (FIGURAS LXXIII(d), LXXIII(e) y LXXIII(f)), respectivamente. Luego, se muestra una caída progresiva de esta magnitud con el aumento de la corriente y la potencia eléctrica, observándose rit-

mos de decrecimiento similares entre las curvas, salvo pequeñas excepciones en puntos muy específicos como es el caso de la FIGURA LXXIII(a), en la cual, la caída de la curva correspondiente a los  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  se da de manera anticipada luego de los  $0,01\text{ A}$  o los  $0,025\text{ W}$ , para el caso mostrado en la FIGURA LXXIII(d). También, en la FIGURA LXXIII(b) y LXXIII(e), para las curvas correspondientes a los  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se observa que hay poca variación de la eficacia luminosa para corrientes y potencias en los intervalos de  $0,02 - 0,3\text{ A}$  y  $0,05 - 0,6\text{ W}$ .

Finalmente, se ve que, de manera general en todas las gráficas de la FIGURA LXXIII, el ritmo de decaimiento de la eficacia luminosa respecto al aumento de la corriente o de la potencia eléctrica se da de forma prácticamente paralela para cada temperatura de operación.

#### **4) Resultados espectrofotométricos de los LEDs con el SE**

##### **a) Comportamiento espectral de los LEDs CREE bajo una temperatura constante y corriente variable**

Al someter a los LEDs CREE a diferentes niveles de corriente y de temperatura, para la observación del comportamiento fotométrico, se evaluó de forma paralela su distribución espectral con ayuda del espectrofotómetro Ocean Optics ya calibrado. En las FIGURAS LXIV(a, b y c) se muestran a los espectros de los LEDs CREE XP-G3 R5, XP-L U6 y XP-G3 S5 con CCTs nominales de  $2700\text{ K}$ ,  $3000\text{ K}$  y  $6000\text{ K}$ , respectivamente. Los niveles de corrientes eléctricas van desde los  $100\text{ mA}$  hasta los  $900\text{ mA}$  bajo una temperatura de operación de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Como es de esperarse, los  $\text{W} \cdot \text{nn}^{-1}$  se van incrementando con el aumento de la corriente, viéndose esto reflejado en el incremento de las intensidades de los picos azules y de las crestas de reemisión por parte del fósforo fluorescente, comprendidas entre los  $470\text{ nm}$  y los  $800\text{ nm}$ . En cada uno de los espectros se logra apreciar de forma empírica un cambio en la proporción entre las alturas de los picos azules y las crestas de reemisión ante el incremento de la corriente, cuyo efecto se podría manifestar mediante el cambio de la CCT. Esto se comprueba mediante el uso de un software llamado ColorCalculator [91], desarrollado por la compañía OSRAM, cuyos parámetros de entrada son las densidades de flujo en  $\text{W} \cdot \text{nn}^{-1}$  del espectro de una luminaria, devolviendo diferentes parámetros lumino-técnicos, siendo la CCT el parámetro deseado para esta comprobación.

En la TABLA VIII se muestran las CCTs obtenidas con el software ColorCalculator para cada uno de los espectros analizados, las cuales se encuentran plasmadas en las FI-

GURAS LXXIV(d, e y f), observando su incremento con el aumento de la corriente eléctrica, siendo este de  $80\text{ K}$  aproximadamente para los LEDs XP-G3 R5 (FIGURA LXXIV(d)) y XP-L U6 (FIGURA LXXIV(e)), mientras que este incremento es mucho más significativo para el LED XP-G3 S5 (FIGURA LXXIV(f)), siendo de  $360\text{ K}$ . Como se verá más adelante de forma cualitativa que, la CCT de un LED blanco y la concentración del fósforo fluorescente mantienen una relación inversa. Lo cual da pie a la idea que cuanto mayor sea la CCT nominal de un LED blanco; entonces su CCT experimental estará más susceptible a cambios ante variaciones de la corriente suministrada.

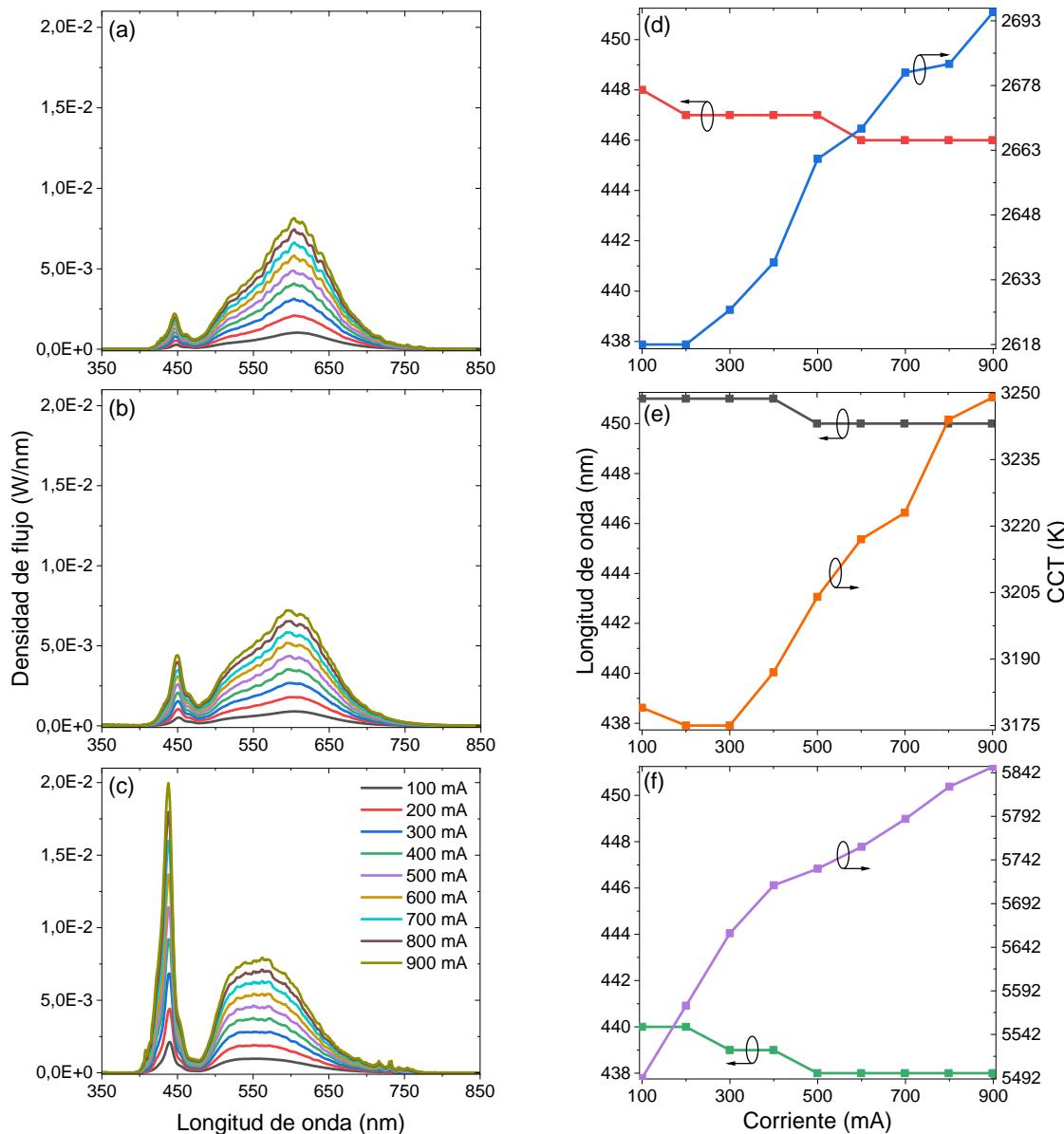


FIGURA LXXIV. Variación de los espectros bajo diferentes condiciones de corriente a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  de los LEDs blancos CREE (a) XP-G3 R5, (b) XP-L U6, (c) XP-G3 S5 y sus respectivos cambios en longitud de onda de sus picos azules y en sus CCTs, siendo sus CCTs nominales de (d)  $2700\text{ K}$ , (e)  $3000\text{ K}$  y (f)  $6000\text{ K}$ .

Estas mismas figuras permiten apreciar incrementos poco significativos de la longi-

tud de onda, a lo que se denomina corrimiento al rojo [3], siendo este de tan solo de uno a dos nanómetros.

Finalmente, en la TABLA VIII también se muestra la comparación de densidad de flujo porcentual de los picos azules, la cual se determina mediante la relación porcentual de las densidades de flujo para un determinado nivel de corriente a 25 °C.

TABLA VIII

Características de los picos azules de los LEDs CREE, así como sus CCTs bajo diferentes niveles de corriente eléctrica a 25 °C.

LED CREE	Pico azul máximo					
	Corriente eléctrica (mA)	Longitud de onda (nm)	Densidad de flujo (W · nm <sup>-1</sup> )	Comparación		
				de densidad de flujo	CCT (K)	
XP-G3 R5	100	448	2,7908E-04	100,00	2618	(%)
	200	447	5,3895E-04	193,12	2618	
	300	447	8,0355E-04	287,93	2626	
	400	447	1,0508E-03	376,53	2637	
	500	447	1,2901E-03	462,27	2661	
	600	446	1,5509E-03	555,71	2668	
	700	446	1,7620E-03	631,37	2681	
	800	446	1,9803E-03	709,58	2683	
	900	446	2,2135E-03	793,14	2695	
XP-L U6	100	451	5,2350E-04	100,00	3179	
	200	451	1,0547E-03	201,47	3175	
	300	451	1,5541E-03	296,87	3175	
	400	451	2,0841E-03	398,10	3187	
	500	450	2,6084E-03	498,25	3204	
	600	450	3,0999E-03	592,16	3217	
	700	450	3,4926E-03	667,17	3223	
	800	450	3,9911E-03	762,38	3244	
	900	450	4,4205E-03	844,41	3249	
XP-G3 S5	100	440	2,1282E-03	100,00	5492	
	200	440	4,4092E-03	207,18	5575	
	300	439	6,8399E-03	321,40	5658	
	400	439	9,2104E-03	432,79	5713	
	500	438	1,1407E-02	536,02	5732	
	600	438	1,3668E-02	642,25	5757	
	700	438	1,5989E-02	751,29	5789	
	800	438	1,7971E-02	844,45	5826	
	900	438	1,9970E-02	938,39	5849	

**b) Comportamiento espectral de los LEDs CREE bajo temperatura variable y corrientes constantes**

En la FIGURA LXXV se muestran los espectros pertenecientes a los LEDs CREE XP-G3 R5 (FIGURA LXXV(a), LXXV(b) y LXXV(c)), XP-L U6 (FIGURA LXXV(d), LXXV(e) y LXXV(f)) y XP-G3 S5 (FIGURA LXXV(g), LXXV(h) y LXXV(i)); los cuales son sometidos a tres niveles de corriente eléctrica: 100, 500 y 900 mA; bajo cinco niveles de temperatura: 10, 25, 50, 75 y 95 °C. En cada uno de los casos se observa una leve disminución de la densidad de flujo a medida que la temperatura se incrementa. Para los dos primeros LEDs, este efecto destaca más en las crestas de reemisión por parte del fósforo fluorescente, mientras que, para el tercer LED, el efecto se hace más notorio en los picos de los azules (ver TABLAS IX, X y XI). Simultáneamente y de forma general para todos los casos, se puede observar un ligero corrimiento al rojo de estos picos al incrementarse la temperatura. La simultaneidad de todos estos efectos genera cambios en las CCTs experimentales, las cuales también se muestran en las TABLAS IX, X y XI. Luego, se aprecian estos cambios en las FIGURAS LXXVI, LXXVII y LXXVIII.

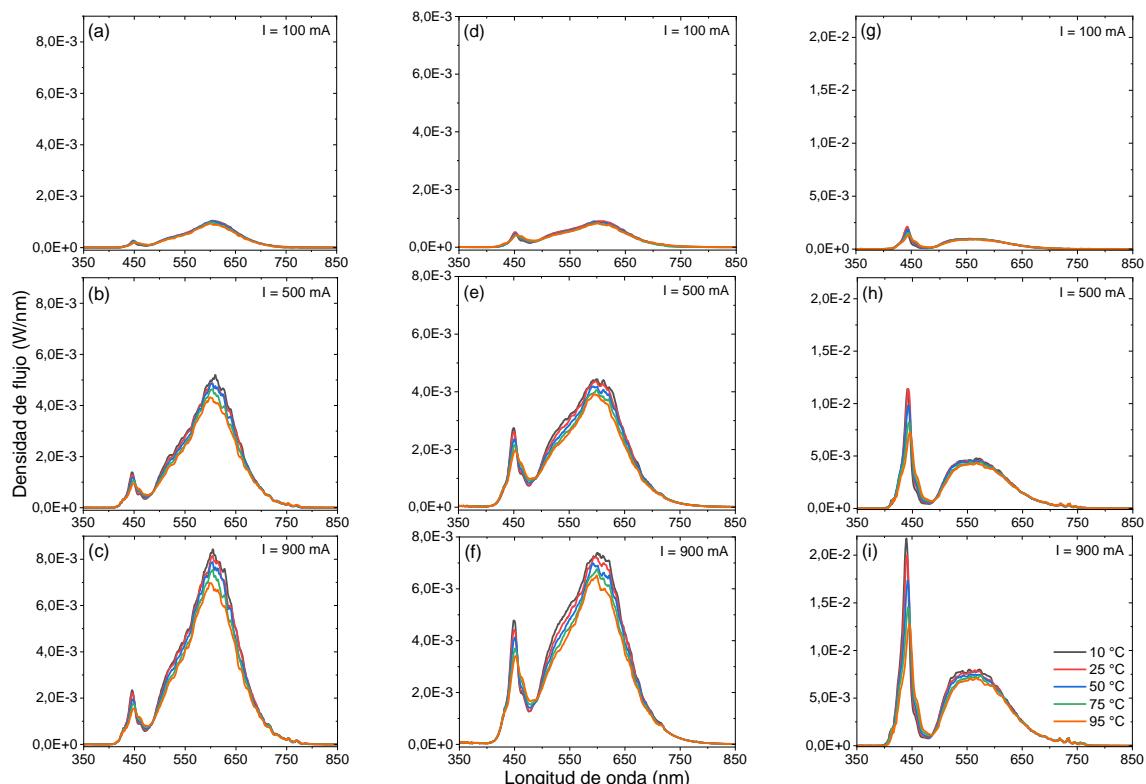


FIGURA LXXV. Variación de los espectros del LED CREE bajo diferentes condiciones de temperatura y de corriente eléctrica (a) XP-G3 R5 a 100 mA, (b) XP-G3 R5 a 500 mA, (c) XP-G3 R5 a 900mA, (d) XP-L U6 a 100 mA, (e) XP-L U6 a 500 mA, (f) XP-L U6 a 900mA, (g) XP-G3 S5 a 100 mA, (h) XP-G3 S5 a 500 mA y (i) XP-G3 S5 a 900mA.

TABLA IX

LED CREE XP-G3 R5. Características de sus picos azules y cambios en sus CCTs bajo diferentes niveles de temperatura y de corriente.

LED CREE XP-G3 R5					
Corriente eléctrica (mA)	Temperatura (°C)	Pico azul máximo			Comparación de densidad de flujo porcentual (%)
		Longitud de onda (nm)	Densidad de flujo (W · nm⁻¹)	de densidad de flujo	
		(nm)	(W · nm⁻¹)		
100	10	447	2,3924E-04	100,00	2549
	25	448	2,7908E-04	116,65	2618
	50	450	2,6205E-04	109,54	2601
	75	450	2,2788E-04	95,25	2613
	95	452	1,9547E-04	81,71	2628
500	10	446	1,3898E-03	100,00	2652
	25	447	1,2901E-03	92,83	2661
	50	448	1,1859E-03	85,33	2628
	75	449	1,0582E-03	76,14	2643
	95	450	9,5443E-04	68,67	2665
900	10	445	2,3450E-03	100,00	2681
	25	446	2,2135E-03	92,83	2695
	50	447	1,9573E-03	85,33	2677
	75	448	1,7554E-03	74,86	2680
	95	449	1,5500E-03	66,10	2707

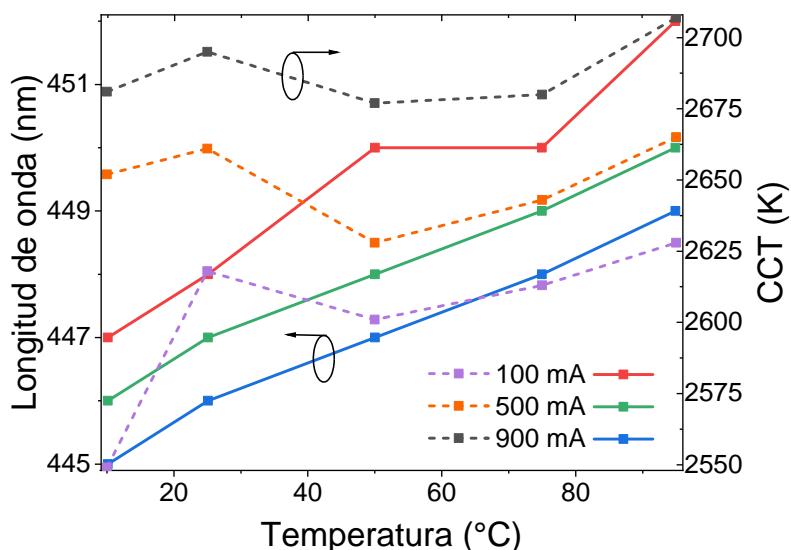


FIGURA LXXVI. Cambios de la CCT experimental y de la longitud de onda del pico azul del LED CREE XP-G3 R5 bajo diferentes condiciones de temperatura y de corriente.

TABLA X

LED CREE XP-L U6. Características de sus picos azules y cambios en sus CCTs bajo diferentes niveles de temperatura y de corriente.

LED CREE XP-L U6					
Corriente eléctrica (mA)	Temperatura (°C)	Pico azul máximo		Comparación	
		Longitud de onda (nm)	Densidad de flujo (W · nm⁻¹)	de densidad de flujo	CCT (K)
				porcentual (%)	
100	10	451	4,8340E-04	100,00	3100
	25	451	5,2350E-04	108,30	3179
	50	452	4,7271E-04	97,79	3162
	75	454	4,2902E-04	88,75	3164
	95	454	4,1670E-04	86,20	3213
500	10	450	2,7477E-03	100,00	3236
	25	450	2,6084E-03	94,93	3204
	50	451	2,3608E-03	85,92	3196
	75	452	2,1578E-03	78,53	3200
	95	452	1,9725E-03	71,79	3220
900	10	449	4,7791E-03	100,00	3287
	25	450	4,4205E-03	92,50	3249
	50	451	4,1218E-03	86,25	3250
	75	451	3,7062E-03	77,55	3246
	95	452	3,4134E-03	71,42	3270

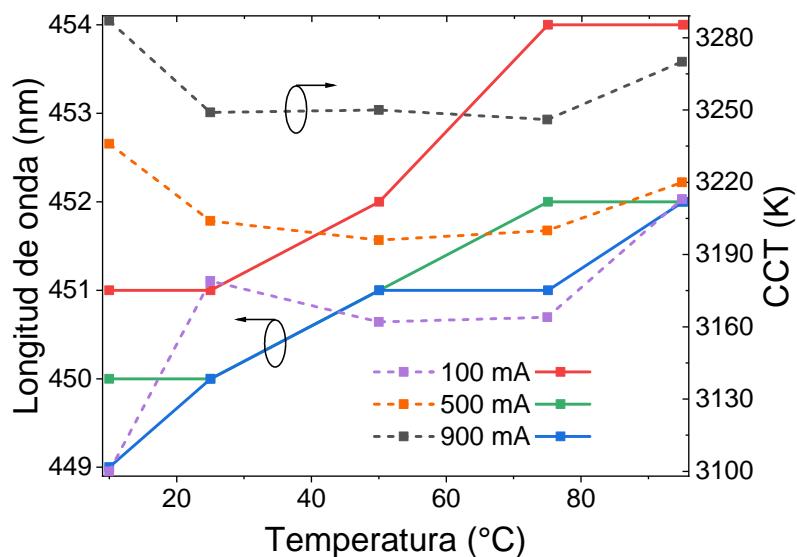


FIGURA LXXVII. Cambios de la CCT experimental y de la longitud de onda del pico azul del LED CREE XP-L U6 bajo diferentes condiciones de temperatura y de corriente.

TABLA XI

LED CREE XP-G3 S5. Características de sus picos azules y cambios en sus CCTs bajo diferentes niveles de temperatura y de corriente.

LED CREE XP-G3 S5					
Corriente eléctrica (mA)	Temperatura (°C)	Pico azul máximo			Comparación (%)
		Longitud de onda (nm)	Densidad de flujo (W · nm <sup>-1</sup> )	de densidad de flujo porcentual (%)	
100	10	442	1,9022E-03	100,00	4991
	25	443	2,1282E-03	111,88	5425
	50	444	1,8406E-03	96,76	5343
	75	445	1,5483E-03	81,40	5197
	95	446	1,3229E-03	69,55	5163
500	10	441	1,1399E-02	100,00	5415
	25	442	1,1407E-02	100,08	5666
	50	443	9,8196E-03	86,15	5617
	75	443	8,2113E-03	72,04	5388
	95	445	7,2431E-03	63,54	5351
900	10	440	2,1769E-02	100,00	5817
	25	441	1,9970E-02	91,74	5854
	50	442	1,7369E-02	79,79	5749
	75	443	1,4560E-02	66,88	5551
	95	445	1,2747E-02	58,56	5469

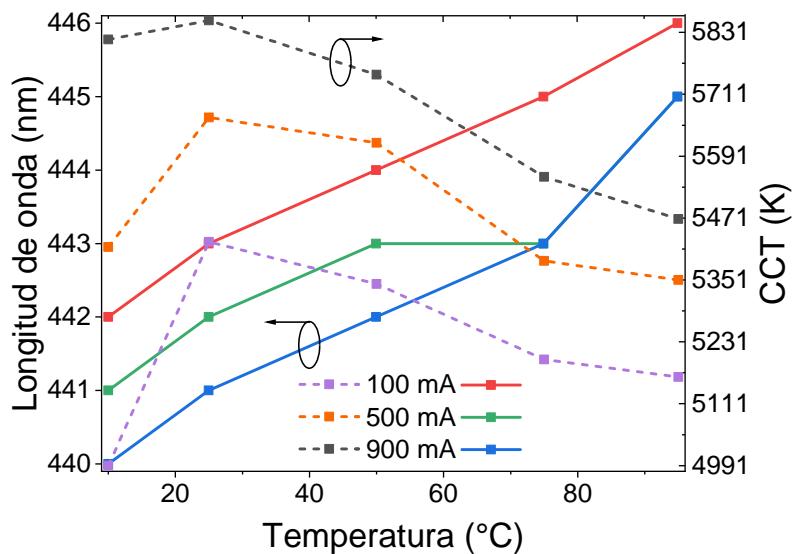


FIGURA LXXVIII. Cambios de la CCT experimental y de la longitud de onda del pico azul del LED CREE XP-G3 S5 bajo diferentes condiciones de temperatura y de corriente.

Observando las TABLAS IX, X y XI, así como también, las FIGURAS LXXVI, LXXVII y LXXVIII, es fácil notar que la longitud de onda de los picos azules se desplaza entre 4 a 5 nm a longitudes de onda más largas, por lo que el desplazamiento al rojo se hace ya significativo y apreciable en los espectros mostrados en la FIGURA LXXV.

Los cambios más sutiles e intrincados son los que se dan en las CCTs de cada LED, ya que estos dependen de los cambios de corriente, de temperatura y del LED que se está evaluando.

Es importante recordar que los CCTs nominales de los LEDs CREE XP-G3 R5, XP-L U6 y XP-G3 S5 son 2700, 3000 y 6000 K, respectivamente; ya que esta información es clave para el siguiente análisis:

TABLA XII

Variación de la CCT de los LEDs CREE entre los 100 mA y los 900 mA para 10 °C y 95°C.

LED CREE	XP-G3 R5	XP-L U6	XP-G3 S5			
CCT nominal (K)	2700	3000	6000			
ΔI (mA)						
T (°C)	10	95	10	95	10	95
ΔCCT (K)	132	79	187	57	826	306

En la TABLA XII se pueden observar dos puntos muy importantes:

- ΔCCT tiende a incrementarse para LEDs de mayor CCT nominal.
- ΔCCT disminuye ante el incremento de la temperatura, además que este cambio se hace más drástico para LEDs de mayor CCT nominal.

Ahora, analizando la variación de la CCT a lo largo de variaciones de temperatura para corrientes definidas, se tiene lo siguiente:

TABLA XIII

Variación de la CCT de los LEDs CREE entre los 10 °C y los 95 °C para 100 mA, 500mA y 900 mA.

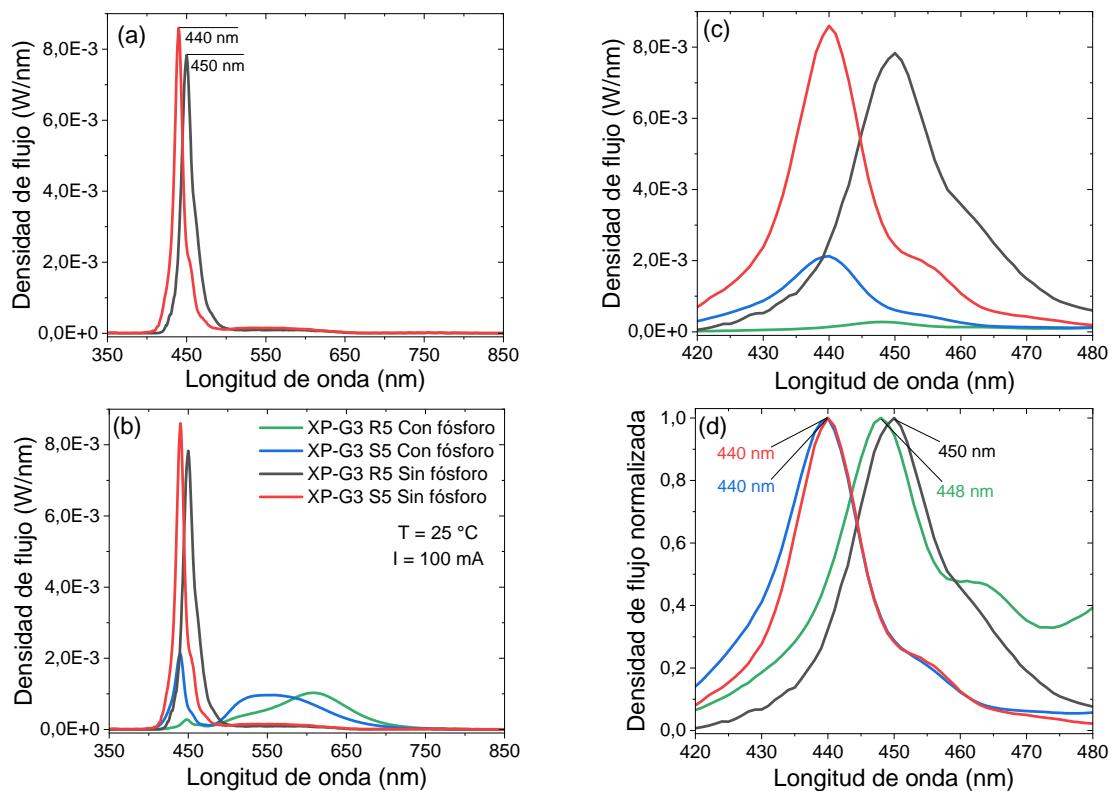
LED CREE	XP-G3 R5			XP-L U6			XP-G3 S5		
CCT nominal (K)	2700			3000			6000		
ΔT (°C)					85				
I (mA)	100	500	900	100	500	900	100	500	900
ΔCCT (K)	79	13	26	113	-16	-17	172	-64	-348

Basándose en los datos obtenidos en la TABLA XIII, se puede resaltar que: tras variar

la temperatura de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\text{CCT}$  tiende a incrementarse cada vez más, conforme la CCT nominal aumenta (bajo una corriente de  $100\text{ mA}$ ), sin embargo,  $\Delta\text{CCT}$  tiende a decrecer de forma cada vez más abrupta conforme se incrementa la CCT nominal, ante corrientes de  $500\text{ mA}$  y  $900\text{ mA}$ .

**c) Comparativa espectrofotométrica de los LEDs CREE ante la extracción del fósforo fluorescente**

Tras la extracción del fósforo fluorescente de los LEDs CREE XP-G3 R5 y XP-G3 S5, se les hace una evaluación espectrofotométrica a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $100\text{ mA}$ , obteniendo los espectros mostrados en la FIGURA LXXIX(a). Haciéndose notar la diferencia de  $10\text{ nm}$  entre sus respectivas longitudes de onda de sus picos azules.



En la FIGURA LXXIX(b) se muestra la comparación de los espectros de los LEDs CREE antes y después de la extracción del fósforo fluorescente. Mientras que en la FIGURA LXXIX(c) se muestra esta misma comparativa, pero centrada en un intervalo de longitud de onda aledaño a los picos de los azules. La normalización de estos últimos se observa en la FIGURA LXXIX(d). Las comparaciones de densidades de flujo porcentual mostradas

en la TABLA XIV muestran que, el fósforo fluorescente del LED XP-G3 R5 atenúa en una vigésimo octava parte la densidad de flujo del chip LED azul, mientras que esta atenuación por parte del fósforo fluorescente es de tan solo la cuarta parte para el caso del LED XP-G3 S5.

TABLA XIV

Comparativa cuantitativa de los picos azules de LEDs CREE antes y después de la extracción del fósforo fluorescente.

LED CREE	Pico azul máximo		
	Longitud de onda (nm)	Densidad de Flujo ( $W \cdot nm^{-1}$ )	Comparación de densidad de flujo porcentual (%)
XP-G3 R5	Con fósforo	448	2,7908E-04
	Sin fósforo	450	7,8327E-03
XP-G3 S5	Con fósforo	440	2,1282E-03
	Sin fósforo	440	8,5976E-03

### 5) Curvas fotométricas de los LEDs blancos de alta potencia

Al tratar y plasmar los datos recopilados con el goniofotómetro en coordenadas polares, se obtuvieron las curvas fotométricas de los LEDs CREE XP-G3 R5 (FIGURA LXXX) y XP-G3 S5 (FIGURA LXXXI) en los planos C0-C180 y C90-C270.

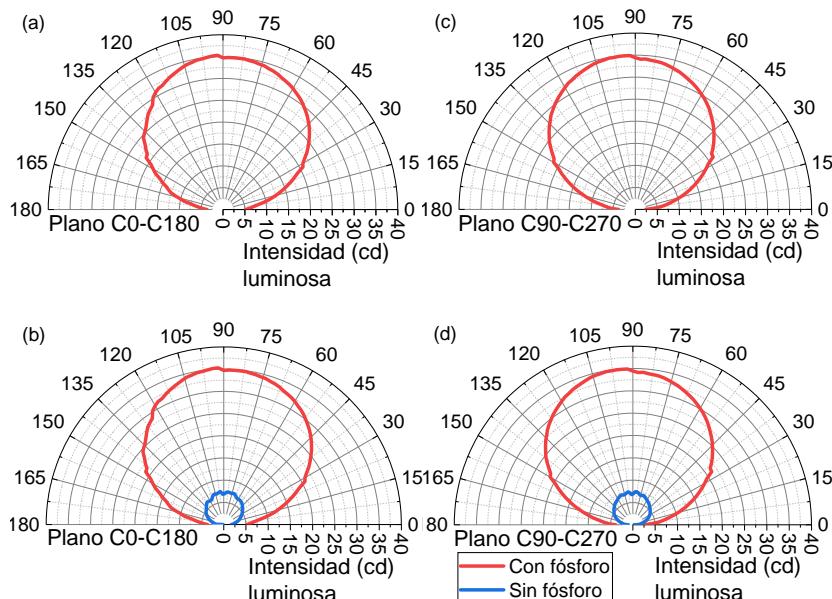


FIGURA LXXX. Curvas fotométricas para el LED CREE XP-G3 R5: (a) con fósforo en plano C0-C180, (b) con y sin fósforo en plano C0-C180, (c) con fósforo en plano C90-C270, (d) con y sin fósforo en plano C90-C270.

En las FIGURAS LXXX(a) y LXXX(c) (planos C0-C180 y C90-C270) se observa uni-

formidad y simetría en la distribución angular de la intensidad luminosa del primer LED, llegando a un máximo de  $35 \pm 8,1\% \text{ cd}$  aproximadamente. Luego, en las FIGURAS LXXX(b) y LXXX(d) (planos C0-C180 y C90-C270) se aprecian las curvas fotométricas del mismo LED antes y después de la extracción del fósforo fluorescente. La drástica disminución de la intensidad luminosa es lo más resaltante, llegando a un máximo de aproximadamente  $7,5 \pm 8,1\% \text{ cd}$ , habiéndose perdido uniformidad, pero aun conservándose la simetría respecto del eje de  $90^\circ$ .

En las FIGURAS LXXXI(a) y LXXXI(c) (planos C0-C180 y C90-C270), también se observa uniformidad y simetría en la distribución angular de la intensidad luminosa del segundo LED, llegando a un máximo de  $41 \pm 8,1\% \text{ cd}$  aproximadamente. Luego, en las FIGURAS LXXXI(b) y LXXXI(d) (planos C0-C180 y C90-C270) se aprecian las curvas fotométricas del mismo LED antes y después de la extracción del fósforo fluorescente. Como era de esperarse, también resalta la drástica disminución de la intensidad luminosa, llegando a un máximo de aproximadamente  $8,7 \pm 8,1\% \text{ cd}$ , habiéndose perdido uniformidad, pero aun conservándose la simetría respecto del eje de  $90^\circ$ .

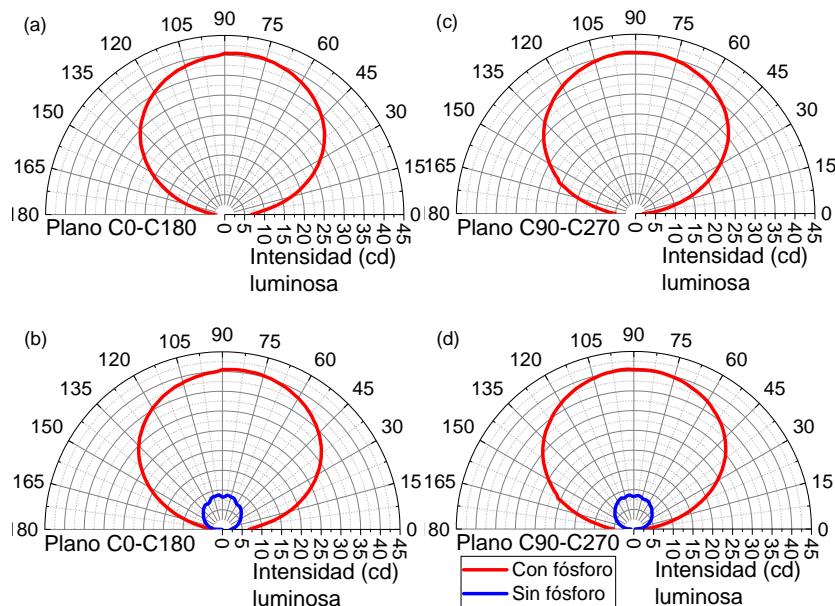


FIGURA LXXXI. Curvas fotométricas para el LED CREE XP-G3 S5: (a) con fósforo en plano C0-C180, (b) con y sin fósforo en plano C0-C180, (c) con fósforo en plano C90-C270, (d) con y sin fósforo en plano C90-C270.

Para el primer LED hubo una disminución de la intensidad luminosa del 78,6%, mientras que para el segundo LED la intensidad luminosa cayó en un 78,8%. Esto se debe a la poca sensibilidad que tiene un luxómetro a la luz azul ya que este instrumento cuenta con una sensibilidad proporcional a la función de la eficiencia luminosa.

De las curvas fotométricas vistas y analizadas se hace una comparativa entre los resultados de los LEDs CREE sin fósforo, notándose la semejanza que existe entre las curvas de los LEDs XP-G3 R5 (FIGURA LXXXII(a)) y XP-G3 S5 (FIGURA LXXXII(b)), tanto para el plano C0-C180 como para el plano C90-C270. Esto sugiere que la forma física para estos modelos de LEDs chip es la misma; consecuentemente, la distribución espacial de la intensidad luminosa de ambos productos es semejante.

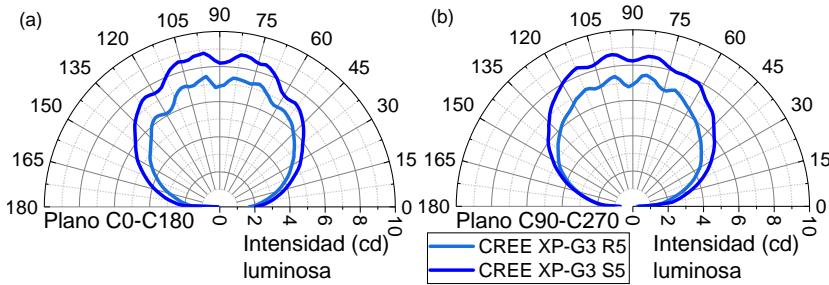


FIGURA LXXXII. Curvas fotométricas de los LEDs CREE XP-G3 R5 y XP-G3 S5 sin fósforo en los planos: (a) C0-C180 y (b) C90-C270.

## **6) Monitoreo de la temperatura del LED debido al autocalentamiento**

Basándose en las mediciones de temperatura realizadas sobre el disipador del LED CREE XP-L U6, con el termopar tipo K en conjunto con el módulo MAX6675 y el SE, se obtienen los resultados que se muestran en la FIGURA LXXXIII, en la cual se puede observar cómo la temperatura del LED va en aumento a medida que se incrementa la corriente (desde 100 mA hasta 1000 mA), debido al autocalentamiento. Considerándose las rutinas de medición continua, 2U5D y 2U18D.

En las FIGURAS LXXXIII(a) y LXXXIII(d) se muestra el cambio de la temperatura en función del tiempo para cada una de las rutinas de medición, bajo las TO de 25 °C y 95 °C, respectivamente. Observándose que las rutinas discontinuas son comparables entre sí, siendo mejor la 2U18D en términos de variación de temperatura por autocalentamiento. Es muy destacable la reducida variación de temperatura (<50 %), que se da al aplicar cualquiera de estas rutinas, frente a la variación de temperatura generada por la rutina continua. En las TABLAS XV y XVI se pueden observar cuantitativamente las variaciones de la temperatura respecto de las TO.

Luego, en las FIGURAS LXXXIII(b) y LXXXIII(e) se muestran con mejor detalle las variaciones de temperatura bajo las corrientes de 100, 600 y 1000 mA, aplicando la rutina de medición 2U5D en condiciones de TO de 25 °C y 95 °C, respectivamente. Para 100 mA,

$\Delta T \leq 1^\circ C$ , por lo que ocasionalmente las lecturas se llegan a confundir con el ruido del sensor, gráficamente dando un patrón de oscilación “pixelada”. Mientras que, para 600 y 1000 mA se tienen ciclos de oscilación muy regulares cuyo periodo es de siete segundos y con amplitudes pico a pico por lo general muy regulares.

Por último, las FIGURAS LXXXIII(c) y LXXXIII(f) muestran, de forma análoga, los detalles de las oscilaciones de temperatura bajo las corrientes de 100, 600 y 1000 mA al aplicarse la rutina de medición 2U18D, para las TO de  $25^\circ C$  y  $95^\circ C$ , respectivamente. Para estos casos también se registran  $\Delta T \leq 1^\circ C$  para los 100 mA, con oscilaciones “pixeladas”, pero con patrones de mayor periodo. Finalmente, los ciclos de oscilación para 600 y 1000 mA poseen un periodo de veinte segundos.

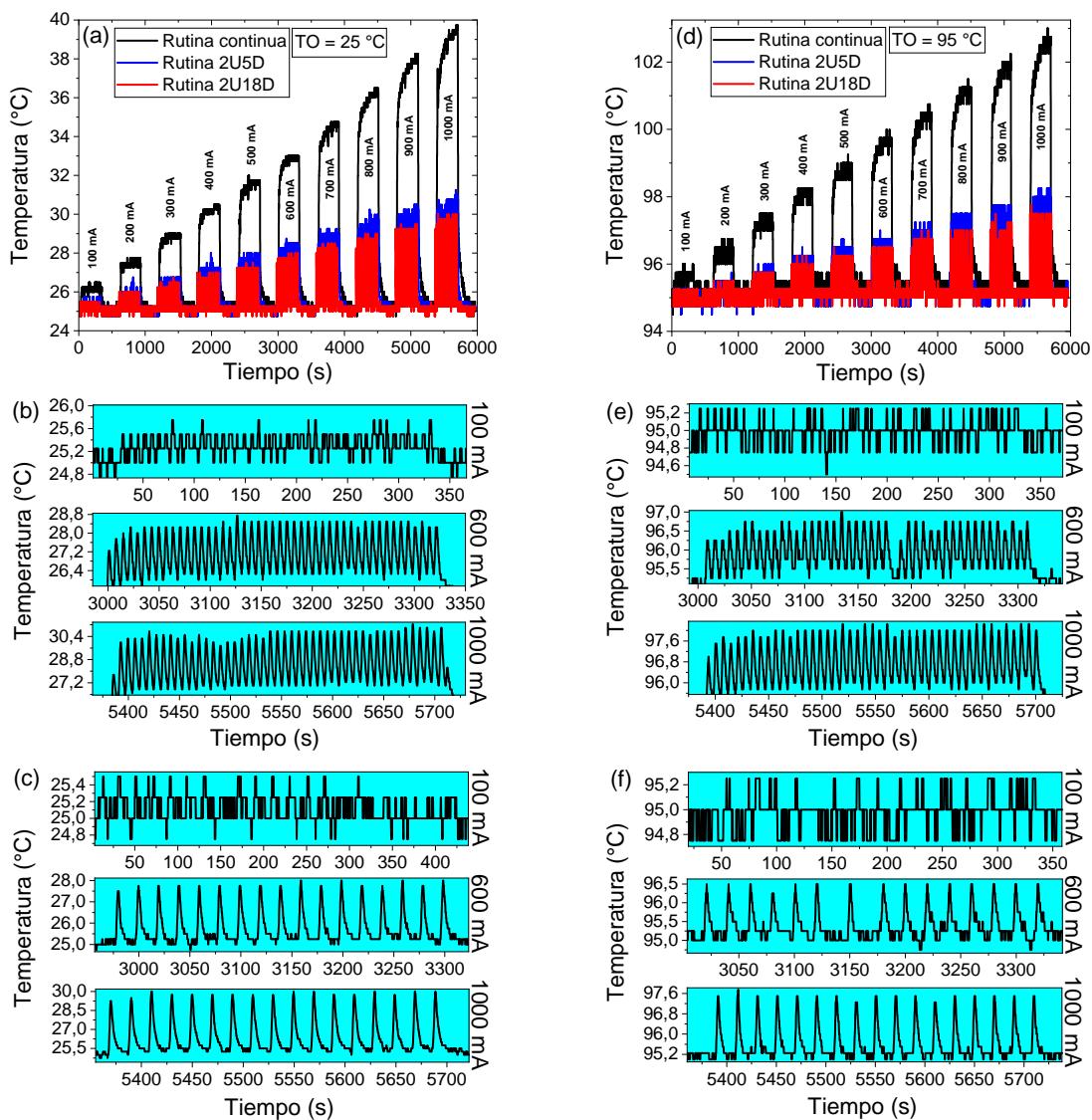


FIGURA LXXXIII. Monitoreo de la temperatura del disipador del LED CREE XP-L U6. (a) Rutinas de medición de la temperatura a  $25^\circ C$ , (b) ampliación de las medidas de temperatura bajo corrientes de 100 mA, 600 mA y 1000 mA a  $25^\circ C$ , aplicando las rutinas 2U5D y (c) 2U18D. (d) Rutinas de medición de la temperatura a  $95^\circ C$ , (e) ampliación de las medidas de temperatura bajo corrientes de 100 mA, 600 mA y 1000 mA a  $95^\circ C$ , aplicando las rutinas 2U5D y (f) 2U18D.

TABLA XV

Incremento de la temperatura medida del LED respecto a la temperatura de operación de 25 °C y porcentaje de variación respeto a la variación máxima del método continuo.

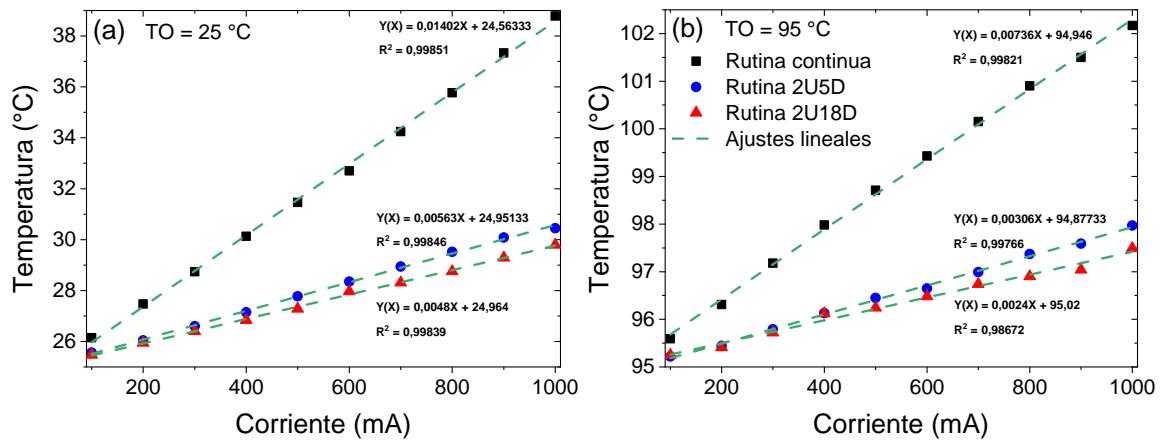
<b>I (mA)</b>	<b>Método</b>	<b>T máxima local promedio</b>	<b>ΔT máxima local promedio</b>	<b>Comparación</b>
	<b>de energización</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>de ΔT porcentual (%)</b>
100	Continuo	26,15	1,15	100,00
	2U5D	25,56	0,56	48,70
	2U18D	25,47	0,47	40,87
200	Continuo	27,47	2,47	100,00
	2U5D	26,04	1,04	42,11
	2U18D	25,94	0,94	38,06
300	Continuo	28,74	3,74	100,00
	2U5D	26,60	1,60	42,11
	2U18D	26,40	1,40	37,43
400	Continuo	30,13	5,13	100,00
	2U5D	27,15	2,15	41,91
	2U18D	26,84	1,84	35,87
500	Continuo	31,46	6,46	100,00
	2U5D	27,77	2,77	42,88
	2U18D	27,28	2,28	35,29
600	Continuo	32,70	7,70	100,00
	2U5D	28,35	3,35	43,51
	2U18D	27,96	2,96	38,44
700	Continuo	34,24	9,24	100,00
	2U5D	28,94	3,94	42,64
	2U18D	28,31	3,31	35,82
800	Continuo	35,77	10,77	100,00
	2U5D	29,52	4,52	41,97
	2U18D	28,75	3,75	34,82
900	Continuo	37,33	12,33	100,00
	2U5D	30,08	5,08	41,20
	2U18D	29,29	4,29	34,79
1000	Continuo	38,78	13,78	100,00
	2U5D	30,45	5,45	39,55
	2U18D	29,79	4,79	34,76

TABLA XVI

Incremento de la temperatura medida del LED respecto a la temperatura de operación de 95 °C y porcentaje de variación respeto a la variación máxima del método continuo.

<b>Método</b> <b>I (mA)</b>	<b>T máxima</b>	<b>ΔT máxima</b>	<b>Comparación</b>
	<b>de local promedio</b>	<b>local promedio</b>	<b>de ΔT porcentual (%)</b>
100	Continuo	95,59	0,59
	2U5D	95,22	0,22
	2U18D	95,25	0,25
200	Continuo	96,31	1,31
	2U5D	95,44	0,44
	2U18D	95,41	0,41
300	Continuo	97,18	2,18
	2U5D	95,79	0,79
	2U18D	95,72	0,72
400	Continuo	97,98	2,98
	2U5D	96,13	1,13
	2U18D	96,12	1,12
500	Continuo	98,71	3,71
	2U5D	96,45	1,45
	2U18D	96,24	1,24
600	Continuo	99,43	4,43
	2U5D	96,65	1,65
	2U18D	96,48	1,48
700	Continuo	100,15	5,15
	2U5D	96,99	1,99
	2U18D	96,74	1,74
800	Continuo	100,90	5,90
	2U5D	97,37	2,37
	2U18D	96,90	1,90
900	Continuo	101,50	6,50
	2U5D	97,59	2,59
	2U18D	97,04	2,04
1000	Continuo	102,17	7,17
	2U5D	97,97	2,97
	2U18D	97,49	2,49

Basándose a las TABLAS XV y XVI se realizan las gráficas mostradas en la FIGURA LXXXIV(a) y LXXXIV(b), en ellas se observa que la relación entre la temperatura del LED por efecto del autocalentamiento podría tener una relación lineal con la intensidad de corriente aplicada.



### B. Análisis morfológico y elemental de LEDs blancos de alta potencia

En esta parte del análisis se consideran como objetos de estudio a LEDs blancos de alta potencia sin marca, ya que para el momento del envío de las muestras a los microscopios SEM, aún no se contaban con los LEDs CREE en el laboratorio de fotometría.

#### 1) Fotografía UV óptico-digital

Las fotografías UV de los LEDs blancos de alta potencia se obtuvieron por medio del uso del microscopio digital de bolsillo Dino-Lite. A continuación, en las FIGURAS LXXXV(a), LXXXV(b) y LXXXV(c) se muestran diferentes imágenes de un LED blanco de tonalidad cálida ( $CCT < 4000 K$ ). Mientras que, en las FIGURAS LXXXV(d), LXXXV(e) y LXXXV(f) se pueden ver, también, diferentes tomas de un LED blanco de tonalidad fría ( $CCT > 4000 K$ ).

Comparando las imágenes de ambos LEDs, se puede observar lo cual parece ser como un coloide, donde el primero presenta una cantidad abundante de partículas suspendidas de tono amarillento que conforman al fósforo fluorescente; mientras que, en el segundo el número de partículas suspendidas es notoriamente escaso. Notándose, por lo tanto, que la tonalidad de la luz blanca va a depender de la concentración del fósforo fluorescente que el LED posea.

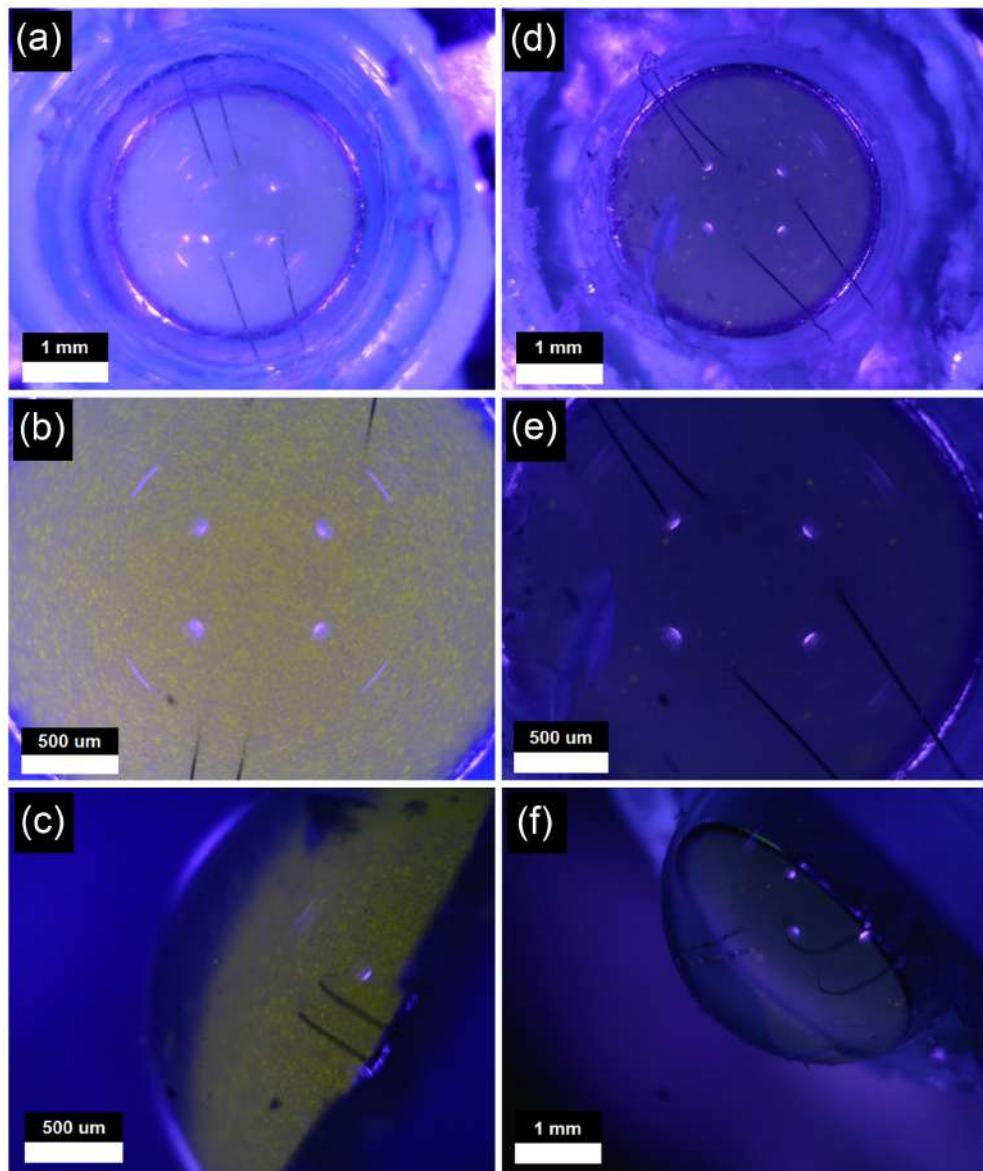


FIGURA LXXXV. Fotografías bajo iluminación UV en tamaño aumentado (a, b y c) de un LED blanco cálido y (d, e y f) de un LED blanco frio. Ambos sin marca.

Se extrae el fósforo fluorescente de los LEDs blancos a fin de conocer la apariencia de los chips que los componen. Viéndose que ambos son físicamente idénticos, se opta por mostrar en la FIGURA LXXXVI(a) a uno de ellos. En la estructura se pueden observar algunos surcos serpenteantes, los cuales vendrían a ser líneas conductoras conectadas directamente a los bornes de alimentación, así como se muestra en la FIGURA LXXXVI(c) [92]. Por otro lado, para poder obtener la fotografía mostrada en la FIGURA LXXXVI(b), se dispone de un LED azul de alta potencia. Se logra apreciar el brillo de su superficie que es contrastado por la oscuridad de los surcos conductores de alimentación.

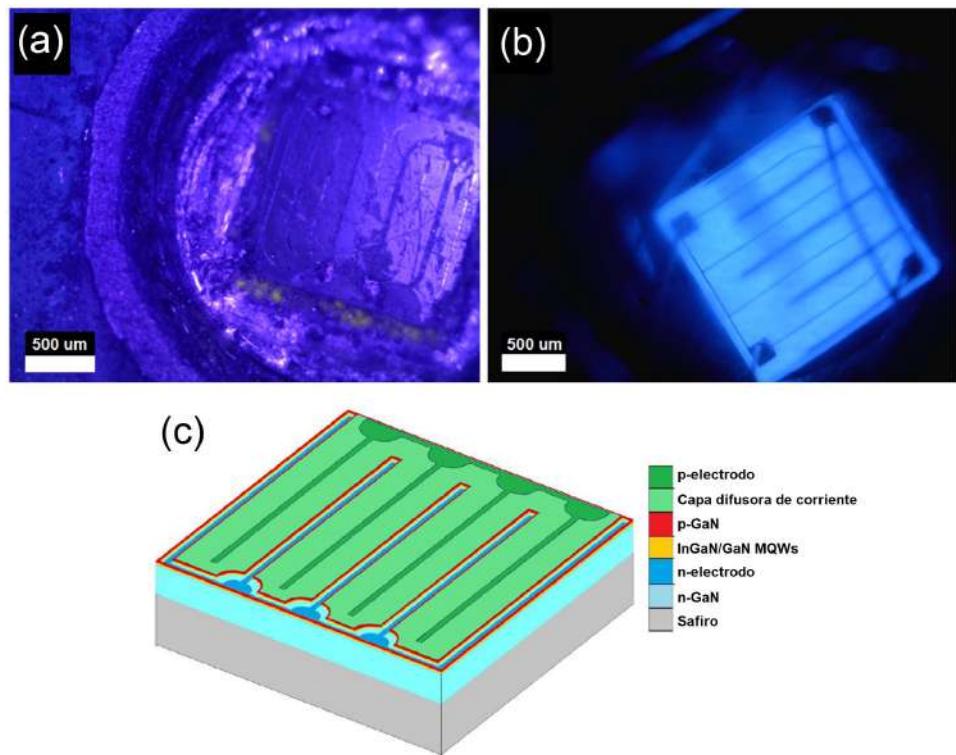


FIGURA LXXXVI. (a) LED blanco despojado de su cubierta de fósforo fluorescente, (b) LED azul de alta potencia en funcionamiento y (c) estructura de un chip LED.[92]

## 2) Análisis morfológico y EDS

### a) LED 1 – de luz blanca cálida ( $CCT < 4000 K$ )

En la FIGURA LXXXVII se muestran las imágenes SEM y los espectros EDS del fósforo fluorescente del LED 1. En la primera imagen (FIGURA LXXXVII(a)) se aprecia una superficie (área a) de textura suave, sobre la cual al examinar una pequeña región se obtiene su respectivo espectro EDS, observando la presencia de Si, Ca, C y O. Por otro lado, al realizar un acercamiento sobre otra sección del LED (área b) se logra obtener una imagen (FIGURA LXXXVII(b)) en la cual se muestra una superficie de textura rugosa, la cual al ser examinada se obtiene también un espectro EDS que devela la presencia de Si, C, O y Zn. Se piensa que la capa de carbono depositada sobre el LED no fue del todo uniforme, lo cual impide la detección de los mismos compuestos en el fósforo fluorescente.

En la TABLA XVII se tienen los porcentajes en masa y atómico de los elementos encontrados, viéndose que la abundancia de elementos presentes es la siguiente: C > O > Si > Ca > Zn.

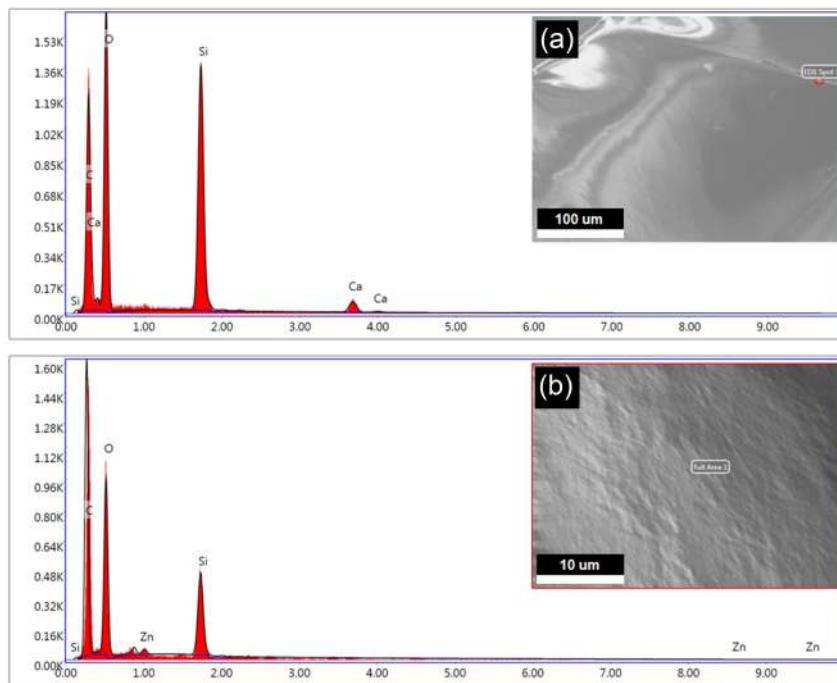


FIGURA LXXXVII. Imágenes SEM y resultados del análisis EDS del fósforo fluorescente del LED 1 en dos zonas aleatorias denominadas como (a) área a y (b) área b.

TABLA XVII

Elementos químicos encontrados en dos áreas distintas del LED 1 y sus correspondientes % Masa y % Atómico.

LED 1				
Elemento químico	Área a (Figura 4.18a)		Área b (Figura 4.18b)	
	% Masa	% Atómico	% Masa	% Atómico
C	42,13	52,24	54,50	62,85
O	43,30	40,30	39,50	34,19
Si	12,89	6,84	5,98	2,95
Ca	1,68	0,62	—	—
Zn	—	—	0,02	0,01

### b) LED 2 – de luz blanca fría (CCT > 4000 K)

En la FIGURAS LXXXVIII(a) y LXXXVIII(b) se muestran las imágenes SEM y los espectros EDS del fósforo fluorescente del LED 2. Ambas figuras están asociadas a las superficies denominadas como área a y área b, respectivamente; las cuales presentan múltiples irregularidades, sobre todo el área b. Además, que los espectros EDS de ambas zonas muestran la misma composición elemental constituida por C, O y Si.

En la TABLA XVIII Se tienen los porcentajes en masa y atómico de los elementos encontrados, viéndose que la abundancia de elementos presentes es la siguiente: C > O > Si.

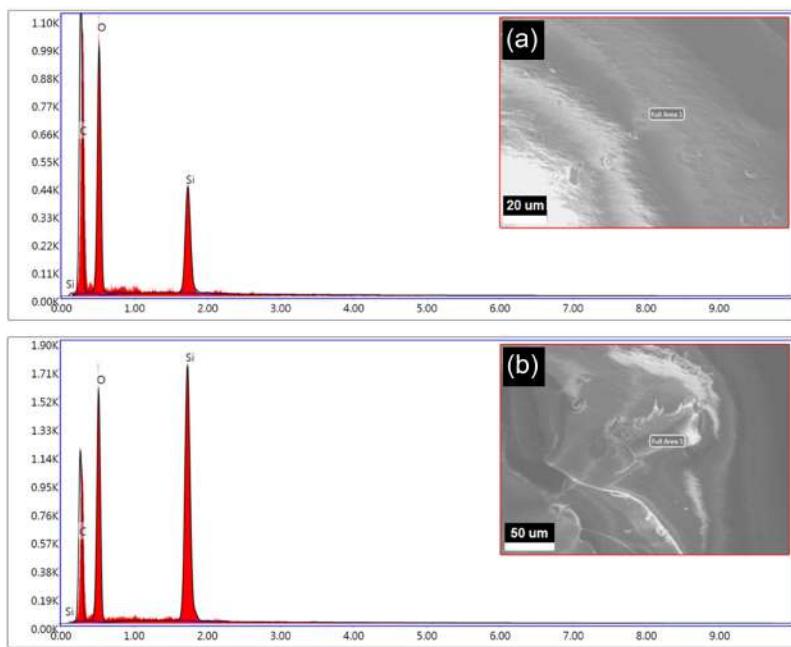


FIGURA LXXXVIII. Imágenes SEM y resultados del análisis EDS del fósforo fluorescente del LED 2 en dos zonas aleatorias denominadas como (a) área a y (b) área b.

TABLA XVIII

Elementos químicos encontrados en dos áreas distintas del LED 2 y sus correspondientes % Masa y % Atómico.

LED 2				
Elemento químico	Área a (Figura 4.19a)		Área b (Figura 4.19b)	
	% Masa	% Atómico	% Masa	% Atómico
C	50,56	59,13	44,28	54,71
O	42,68	37,48	39,71	36,83
Si	6,77	3,39	16,02	8,46

La ausencia de Ca o de Zn en los resultados EDS del fósforo fluorescente del LED 2, puede tratarse de dos factores combinados: La poca concentración de fósforo fluorescente (al tratarse de un LED de tonalidad blanca fría) y la deposición de carbono.

c) **LED 3 – de tonalidad blanca cálida (CCT < 4000 K) – sin fósforo fluorescente**

En la FIGURA LXXXIX se muestran las imágenes SEM y los espectros EDS del LED 3 sin fósforo fluorescente. En la primera imagen (FIGURA LXXXIX(a)) se aprecia una superficie plana (área a) con algunas protuberancias de tonos oscuros. Se postula que esta región pueda contener impurezas ya que en el espectro EDS figuran picos pertenecientes a elementos ajenos a los que podrían contener el fósforo fluorescente y los semiconductores tales como el Sn o el Pb, también están presentes el O y Si, siendo este último el menos

abundante según lo que se muestra en la TABLA XIX.

En la segunda imagen (FIGURA LXXXIX(b)) se muestra una superficie (área b) en la que destacan cuatro zonas que son catalogadas basándose en la bibliografía consultada [92]:

- La primera zona de tonalidad clara y ubicada en parte central de la imagen, vendría a ser una de las vías de conducción eléctrica del chip LED.
- La siguiente zona de tonalidad oscura, contigua y envolvente a la primera, estaría formada por el semiconductor tipo n cuya sustancia huésped estaría hecha a base de Ga.
- La tercera zona de tonalidad gris, contigua y envolvente a la segunda, estaría formada por una serie de múltiples capas de semiconductores a base de In y Ga que conformarían a los MQWs.
- Finalmente, la cuarta zona de tonalidad gris clara y la más extensa de todas, estaría conformada por el semiconductor tipo p, compuesto a base de Ga.

La presencia de los elementos mencionados vendría a ser respaldada por su respectivo resultado del análisis EDS, el cual reporta la detección de O, Si, Ga e In. Los porcentajes de masa y atómico muestran cifras poco despreciables de cada elemento, así como se puede ver en la TABLA XIX.

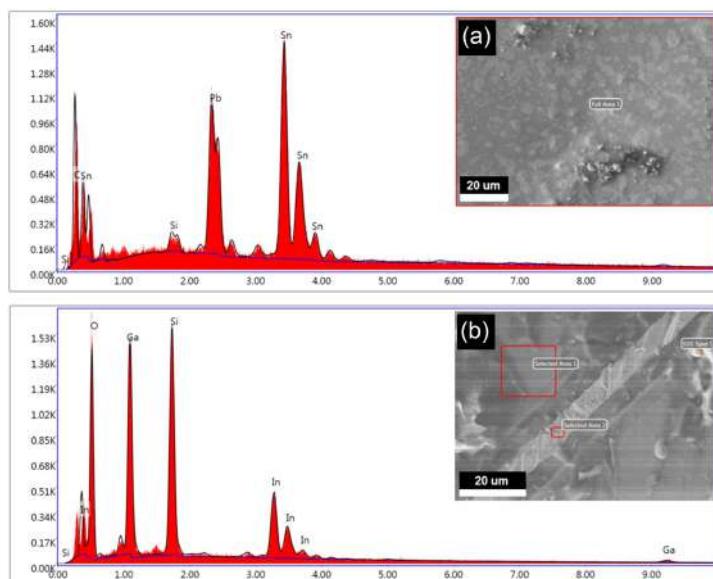


TABLA XIX

Elementos químicos encontrados en dos áreas distintas del LED 3 y sus correspondientes % Masa y % Atómico.

LED 3				
Elemento químico	Área a (Figura 4.20a)	Área b (Figura 4.20b)	Área a (Figura 4.20a)	Área b (Figura 4.20b)
	% Masa	% Atómico	% Masa	% Atómico
C	12,86	61,71	—	—
O	—	—	26,96	55,88
Si	0,98	2,01	18,12	21,39
Pb	26,75	7,44	—	—
Sn	59,41	28,84	—	—
Ga	—	—	36,72	17,47
In	—	—	18,20	5,26

**d) LED 4 – de tonalidad blanca fría ( $CCT > 4000 K$ ) – sin fósforo fluorescente**

En las FIGURAS XC(a) y XC(b) se muestran dos superficies (áreas a y b, respectivamente) de una misma zona, las cuales son similares al área b vista en la FIGURA XC(b). Naturalmente, los resultados del análisis EDS muestran la presencia de O, Si, Ga e In, claro que en proporciones diferentes a las del LED 3, sugiriendo que la cantidad de sustancia empleada para un chip LED azul podría depender del CCT que se quiere lograr obtener. En la TABLA XX se muestran de forma cuantitativa estas proporciones en % Masa y % Atómico.

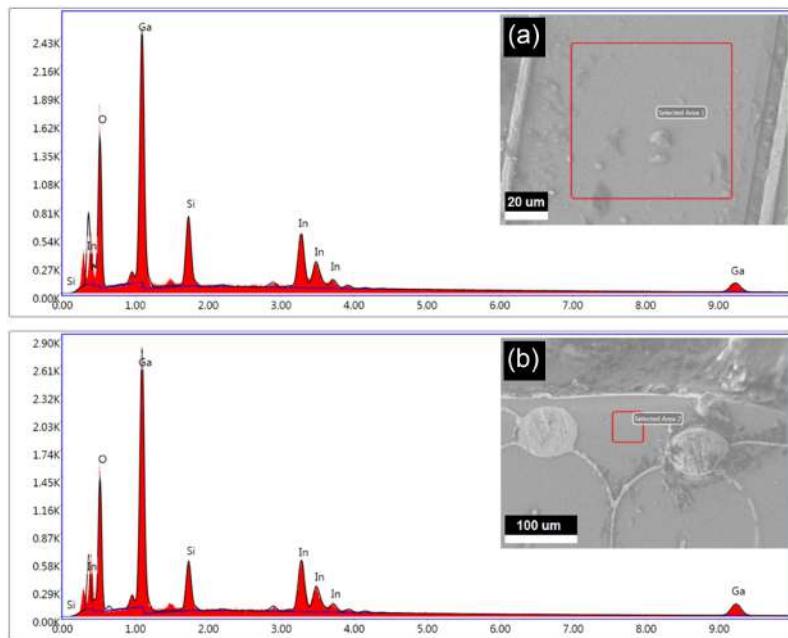


FIGURA XC. Imágenes SEM y resultados del análisis EDS del semiconductor del LED 4 en dos zonas aleatorias denominadas como (a) área a y (b) área b.

TABLA XX

Elementos químicos encontrados en dos áreas distintas del LED 4  
y sus correspondientes % Masa y % Atómico.

LED 4				
Elemento químico	Área a (Figura 4.21a)		Área b (Figura 4.21b)	
	% Masa	% Atómico	% Masa	% Atómico
O	22,58	54,67	21,15	53,54
Ga	52,65	29,33	55,76	32,39
Si	7,28	10,06	5,44	7,84
In	17,55	5,94	17,65	6,23

e) **LED 5 – de tonalidad blanca cálida (CCT <4000 K) – sin fósforo fluorescente – deteriorado por sobrecarga**

En la FIGURA XCI se muestran las imágenes SEM y los espectros EDS del LED 5 sin fósforo fluorescente, este LED fue puesto en funcionamiento hasta quedar inoperativo por sobrecarga. En la primera imagen (FIGURA XCI(a)) se aprecia una superficie (área a) muy accidentada y agrietada, dando la apariencia de calcinación. El sobrecalentamiento del dispositivo pudo provocar el desprendimiento de las capas semiconductoras, siendo extraídas conjuntamente con el fósforo fluorescente, motivo por el cual no se detecta la presencia de Ga ni de In en el análisis EDS. En lugar de estos compuestos se logra encontrar C, O, Al y Si en el orden de abundancia de: C > O > Si > Al, los porcentajes se encuentran detallados en la TABLA XXI. Estos elementos podrían sugerir la exposición del sustrato, empleado para la fabricación del LED, el cual puede estar compuesto por  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (zafiro) y/o SiC [92], [93].

En la segunda imagen (FIGURA XCI(b)) se muestra una superficie (área b) en la que se observa el nodo de conexión de las vías de conducción eléctrica, mientras que a sus alrededores se vuelve a ver parte de las zonas calcinadas por sobrecarga. En el espectro EDS se muestra la presencia de Ag, Al y Si. Según la TABLA XXI el orden de abundancia es: Ag  $\gg$  Si > Al, por lo que el análisis EDS estuvo enfocado en el nodo de conexión, el cual está compuesto de Ag principalmente, la presencia de Al y Si se debe a que una parte muy ínfima del sustrato fue detectada.

Los resultados EDS de los LEDs 3 y 4, a los que se les retiró el fósforo fluorescente, presentan comúnmente Si y C. Esto podría decir que, de manera convergente, parte del sustrato ha sido detectado en ambas muestras. Estos elementos estás presentes en el LED 5 incluyendo el Al y el O, lo cual es de esperarse ya que se postula que el sustrato se

encuentra expuesto en esta última muestra.

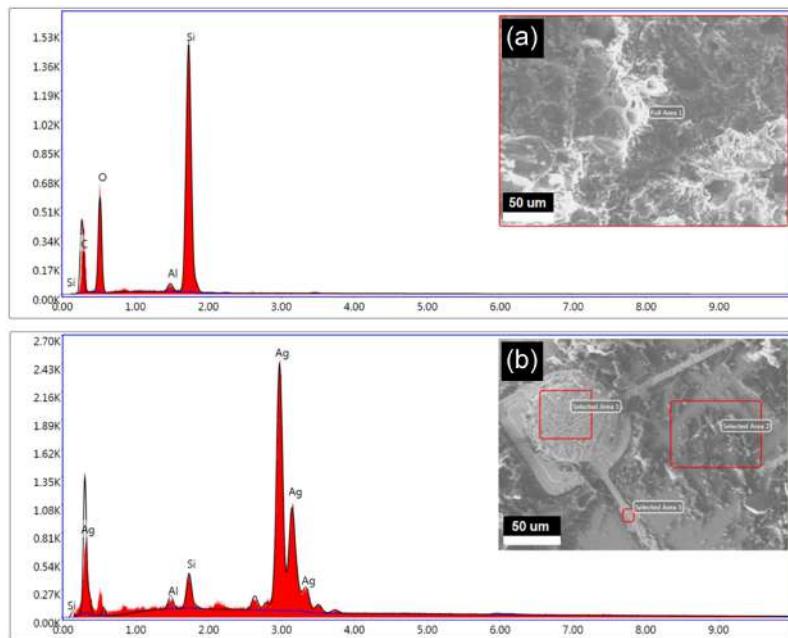


FIGURA XCI. Imágenes SEM y resultados del análisis EDS del semiconductor y de un borne del LED 5 en dos zonas aleatorias denominadas como (a) área a y (b) área b.

TABLA XXI

Elementos químicos encontrados en dos áreas distintas del LED 5 y sus correspondientes % Masa y % Atómico.

LED 5				
Elemento químico	Área a (Figura 4.22a)		Área b (Figura 4.22b)	
	% Masa	% Atómico	% Masa	% Atómico
C	43,28	56,06	—	—
O	29,86	29,04	—	—
Al	1,06	0,61	1,18	6,15
Si	25,80	14,29	4,30	14,04
Ag	—	—	93,89	79,81

#### f) LED 6 – de tonalidad blanca cálida (CCT < 4000 K)

En la FIGURA XCII se muestra la imagen SEM del LED 6 y su espectro EDS. A este LED se le retiró parte del fósforo fluorescente, dejando ver un poco del nodo de conexión del filamento de conducción. Los elementos detectados en esta zona son: C, O, Si y Ag. El C presente puede deberse al depositado sobre la muestra, mientras que el Si y el O pertenecerían a compuestos que forman al fósforo fluorescente. Finalmente, la detección de Ag, se debe al metal del cual está hecho el nodo de conexión.

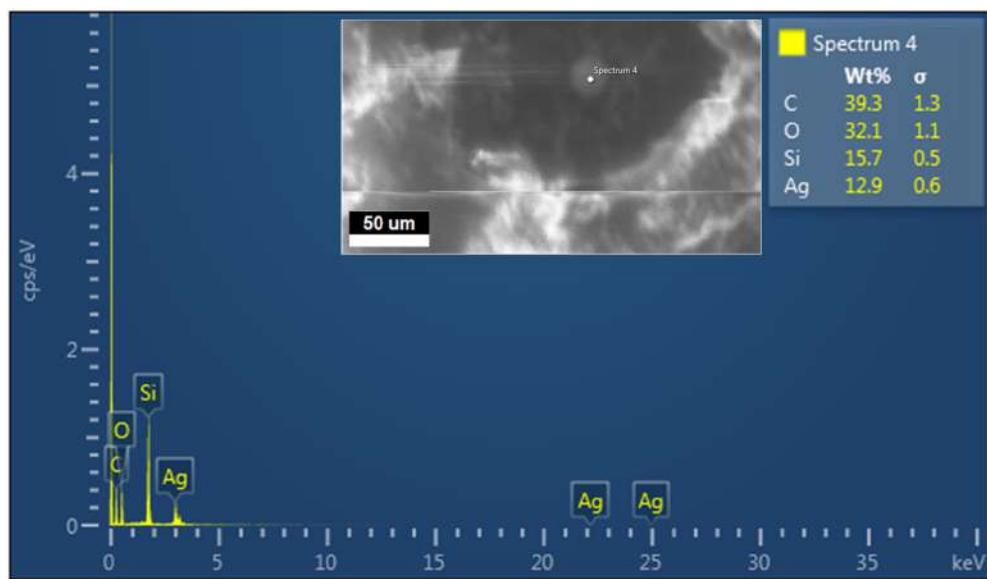


FIGURA XCII. Imágenes SEM y resultados del análisis EDS del fósforo fluorescente y de uno de los bornes del LED 6.

## V. Conclusiones

- Como resultado del presente trabajo, actualmente, se dispone de un sistema experimental (SE) en el Laboratorio de Fotometría de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. Este sistema permite determinar de manera cuantitativa las propiedades eléctricas, fotométricas y colorimétricas de LEDs blancos en un rango de temperatura de 0 °C a 100 °C.
- Utilizando el SE en combinación con la esfera integradora Laphsphere LMS-400 y el espectrómetro Labsphere CDS 1100 del Laboratorio, se ha determinado experimentalmente la influencia de la temperatura en las curvas características, flujo luminoso y eficacia luminosa de LEDs blancos de alta potencia. Se pudo medir y observar cómo el aumento de la temperatura conlleva a una disminución del flujo luminoso y de la eficacia luminosa.
- Además, se ha determinado la influencia de la temperatura sobre los espectros de los LEDs. Se observó un corrimiento al rojo de aproximadamente 5 nm en el pico azul de sus espectros y ligeras variaciones en la temperatura correlacionada de color (CCT) dependientes de las CCT nominales de los LEDs (TABLAS XII y XIII).
- Todas estas mediciones se complementaron con la determinación de las curvas fotométricas de los LEDs blancos estudiados, obtenidas mediante el goniofotómetro del Laboratorio, así como un análisis morfológico y elemental utilizando espectrómetros SEM y EDS. Estas mediciones también se realizaron en un LED al cual se le eliminó la capa fluorescente, dejando únicamente la heterounión. Todo esto permitió ver de cerca las bondades inherentes a los LEDs blancos de alta potencia, tales como: la variación uniforme de su intensidad luminosa en espacio, la versatilidad en la obtención de diferentes CCTs al variar la concentración de fósforo fluorescente por parte del fabricante y su diseño compacto.
- Parte de este trabajo se presentó en el XXIX Simposio Peruano de Energía Solar, celebrado en Chachapoyas del 14 al 28 de noviembre de 2022 [94], y en las Jornadas Peruanas de Energía Solar 2022, que tuvieron lugar en Lima del 11 al 13 de mayo de 2022, publicado en Journal of Physics: Conference Series [95].

## VI. Referencias bibliográficas

- [1] E. Saavedra, F. J. Rey y J. Luyo, "SISTEMAS DE ILUMINACIÓN, SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS", *TECNIA*, vol. 26, no 2, pp. 44 - 62, 2017.
- [2] D. Durmus, "Correlated color temperature: Use and limitations", *Lighting Research and Technology*, vol. 54, no 4, pp 1 - 13. 2022.
- [3] A. Najar, M. Shafa y D. Anjum, "Synthesis, optical properties and residual strain effect of GaN nanowires generated: Via metal-assisted photochemical electroless etching", *RSC Advances*, vol. 7, no 35, pp. 21697 - 21702, 2017.
- [4] M. R. Ruiz, "Diseño y construcción de un goniofotómetro", Tesis de titulación, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2007.
- [5] F. Oscoco, "CARACTERIZACIÓN FOTOMÉTRICA DE LÁMPARAS LED", Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2016.
- [6] R. Chala, "Montaje de un espectrómetro con esfera integradora para la caracterización fotométrica de LEDs", Tesis de titulación, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2019.
- [7] S. Joon Oh y J. Cho, "Junction temperature rise due to self-heating effects in GaInN blue light-emitting diodes", *Thin Solid Films*, vol. 641, no , pp. 8 - 11, Nov, 2017.
- [8] J. V. Forrester, A. D. Dick, P. G. McMenamin, F. Roberts y E. Pearlman, "Anatomy of the eye and orbit" en *The Eye*, 1ra ed. Elsevier, 2016, ch. 1, pp. 1 - 102.
- [9] J. F. Arévalo, C. Agüero, C. W. Arzabe, A. Lavaque, N. Ramón, J. A. Roca y L. Wu, "RETINA PAAO 2019", 1ra ed, Baltimore, Maryland, USA, 2019.
- [10] J. L. Barbur y A. Stockman, "Photopic, Mesopic and Scotopic Vision and Changes in Visual Performance" en *Encyclopedia of the Eye*, 1ra ed. Elsevier, 2010, pp. 323 - 331.
- [11] ILV: *Vocabulario Internacional de Iluminación*, CIE S 017/E:2011, 2011, Disponible: [www.cie.co.at](http://www.cie.co.at).
- [12] J. Norgard, "The Electromagnetic Spectrum" en *National Association of Broadcasters Engineering Handbook*, 10ma ed. Elsevier, 2007, ch. 1.1, pp. 3 - 10.

- [13] S. N. Thakur, "Atomic emission spectroscopy" en *NLaser-Induced Breakdown Spectroscopy*, 1ra ed. Elsevier, 2007, ch. 2, pp. 23 - 48.
- [14] M. B. Kirkham, "Solar Radiation, Black Bodies, Heat Budget, and Radiation Balance" en *Principles of Soil and Plant Water Relations*, 2da ed. Elsevier, 2014, ch. 25, pp. 453 - 472.
- [15] D. J. Griffiths y D. F. Schroeter, "*Introduction to Quantum Mechanics*", 3ra ed, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2018.
- [16] K. McGhee. "How Does a Spectrometer Work? Principles Explained." ossila.com. <https://www.ossila.com/pages/spectrometer-working-principles> (consultado Feb. 6, 2023).
- [17] K. R. Spring, T. J. Fellers, M. W. Davidson. "Introduction to Charge-Coupled Devices (CCDs)." microscopyu.com. <https://www.microscopyu.com/digital-imaging/introduction-to-charge-coupled-devices-ccds> (consultado Feb. 8, 2023).
- [18] "Barr Order-SOrting FilterS." Consultado: Feb. 8, 2023. [Online]. Disponible: <http://www.wait-tech.cn/uploads/soft/141112/BARR-14.pdf>.
- [19] Catalogo No. KACC9003E09, Mini-spectrometers, Hamamatsu Photonics K. K., Sunayama-cho, Hamamatsu.
- [20] "What Is Stray Light and How Does It Work? | Synopsys." Consultado: Feb. 9, 2023. [Online]. Disponible: [https://www.synopsys.com/glossary/what-is-stray-light.html?gclid=CjwKCAiA85efBhBbEiwAD7oLQA\\_pW5ABMaD9Es-8BCJkrMw3-tTXzuxRVd9zNypXMiJmJM1SW\\_E7wxoCT-oQAvD\\_BwE](https://www.synopsys.com/glossary/what-is-stray-light.html?gclid=CjwKCAiA85efBhBbEiwAD7oLQA_pW5ABMaD9Es-8BCJkrMw3-tTXzuxRVd9zNypXMiJmJM1SW_E7wxoCT-oQAvD_BwE).
- [21] M.H. Freeman, C.C. Hull y W.N. Charman, "Radiometry and photometry" en *Optics*, 11va ed. London, UK: Butterworths, 2003, ch. 10, pp. 344 - 373.
- [22] N. Ohta y A. R. Robertson, "*Colorimetry: Fundamentals and Applications*", West Sussex, England: WILEY, 2005.
- [23] R. McCluney, "Radiometry and photometry" en *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 3ra ed. Tarzana, CA, USA: Ramtech, 2003, pp. 731 - 758.
- [24] J. C. Zwinkels, E. Ikonen, N. Fox, G. Ulm y M. L. Rastello, "Photometry, radiometry and 'the candela': Evolution in the classical and quantum world", *Metrologia*, vol. 47, no , pp. , 2010.

- [25] E. F. Schubert, “*Light-emitting diodes*”, 2da ed, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2006.
- [26] A. W.S. Tarrant, “Optical Measurements” en *Instrumentation Reference Book*, 4ta ed. London, UK: Butterworth, 2009, ch. 4.2, pp. 499 - 519.
- [27] J. L. Monteith y M. H. Unsworth, “Transport of Radiant Energy” en *Principles of Environmental Physics*, 4ta ed. Elsevier , 2013, ch. 4, pp. 37 - 48.
- [28] *Integrating Sphere Radiometry and Photometry*, Labsphere., North Sutton, Nh, USA, 2017, pp. 18 - 19.
- [29] D. G. Goebel, “Generalized integrating-sphere theory”, *Applied Optics*, vol. 5, pp. 125 - 128, 1967.
- [30] D. Czyżewski y I. Fryc, “The Influence of Luminaire Photometric Intensity Curve Measurements Quality on Road Lighting Design Parameters”, *Energies*, vol. 13, pp. 1 - 17, 2020.
- [31] D. Kołakowska. “LED ILLUMINANCE MEASUREMENTS BY USING SONEL LXP LIGHT METERS.” sonel.pl. <https://www.sonel.pl/en/knowledge-centre/press-articles/illuminance-measurements/led-illuminance-measurements-using-sonel-lxp-light-meters/> (consultado Dic. 19, 2022).
- [32] C. Chen, “*Encyclopedia of Color Science and Technology*”, 1ra ed. New York, NY, USA: Springer, 2016, pp. 700 - 705.
- [33] *THE MEASUREMENT OF LUMINOUS FLUX*, CIE 84, 1989, Disponible: <https://cie.co.at>.
- [34] A. Gilchrist y J. Nobbs, “Colorimetry, Theory,” en *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, 3ra ed. New York, NY, USA: Academic Press, 2017, pp. 328 - 333.
- [35] D. DiLaura, “A Brief History of Lighting”, *Optics and Photonics News*, vol. 19, pp. 22 - 28, 2008.
- [36] “Arc Lamps - How They Work and History.” Accessed: Feb. 12, 2023. [Online]. Disponible: <https://edisontechcenter.org/ArcLamps.html>.
- [37] J. F. Waymouth, “History of light sources” en *Handbook of Advanced Lighting Technology*, 1ra ed. Suiza: Springer, 2017, pp. 3 - 40.

- [38] "El enigma de la bombilla de luz que alumbría desde 1901 - BBC News Mundo." Accessed: Feb. 12, 2023. [Online]. Disponible: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-44542763>.
- [39] D. MacIsaac, G. Kanner y G. Anderson, "Basic physics of the incandescent lamp (light-bulb)", *The Physics Teacher*, vol. 37, pp. 519 - 525, Dic. 1999.
- [40] J. C. Moerkens, "An electronic starter for long fluorescent lamps," PHILIPS. Consultado: Feb. 19, 2023. [Online]. Disponible: <https://www.lighting-gallery.net/gallery/albums/userpics/12665/Moerkens20197020-20\Philips20Tech20Rev20v31n220-20An20electronic20starter20for20long20fluo\rescent20lamps.pdf>
- [41] G. G. Lister, J. E. Lawler, W. P. Lapatovich, y V. A. Godyak, "The physics of discharge lamps", *Reviews of Modern Physics*, vol. 76, no. 2, pp. 541 - 598, Jun. 2004.
- [42] M. A. Omar, "ELEMENTARY SOLID STATE PHYSICS", 1ra ed. USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1993, pp. 320 - 330.
- [43] S. Muhl y A. Pérez, "The use of hollow cathodes in deposition processes: A critical review", *Thin Solid Films*, vol. 579, pp. 174–198, Mar 2015.
- [44] R. D. Dupuis y M. R. Krames, "History, development, and applications of high-brightness visible light-emitting diodes", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 9, pp. 1154–1171, Mayo 2008.
- [45] N. Zheludev, "The life and times of the LED - A 100-year history", *Nature Photonics*, vol. 1, no. 4, pp. 189 - 192, Abr. 2007.
- [46] "Conozca un poco sobre diodos." <https://ea5fmh.jimdofree.com/conocimiento-sobre-diodos/> (consultado Feb. 25, 2023).
- [47] R. H. Pratt y I. J. Feng, "Electron—Atom Bremsstrahlung" en *Atomic Inner-Shell Physics*, 1ra ed. NY, USA: Springer, 1985, ch. 12, pp. 533 - 580.
- [48] J. Cho, J. H. Park, J. K. Kim, y E. F. Schubert, "White light-emitting diodes: History, progress, and future", *Laser Photon Rev*, vol. 11, no. 2, pp. 1 - 17, Mar. 2017.
- [49] S. Ye, F. Xiao, Y. X. Pan, Y. Y. Ma, y Q. Y. Zhang, "Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties", *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 71, no. 1, pp. 1 - 6, 2010.

- [50] G. Hong, X. Gan C. Leonhardt, Z. Zhang, J. Seibert, J. M. Busch y S. Bräse, “A Brief History of OLEDs—Emitter Development and Industry Milestones”, *Advanced Materials*, vol. 33, no. 9, pp. 1 - 24, 2021.
- [51] J. Mapes-Christ y A. C. Gross, “The World Market for Light Sources: Lamps and LED, 2006-21”, *Business Economics*, vol. 50, no. 4, pp. 219 - 227, 2015.
- [52] A. S. Kamat, R. Khosla, y V. Narayananamurti, “Illuminating homes with LEDs in India: Rapid market creation towards low-carbon technology transition in a developing country”, *Energy Res Soc Sci*, vol. 66, pp. 1 - 11, 2020.
- [53] M. J. Muñoz Avendaño, J. A. Toullier Salazar, y M. A. Valverde Arévalo, “PLAN ESTRATÉGICO DE UNA EMPRESA PERUANA DE LUMINARIAS 2018-2022”, Tesis de maestría, Universidad del Pacífico, Lima, Perú, 2018.
- [54] A. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. van Swaaij, y M. Zeman, “*Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*”, 1ra ed., England: UIT Cambridge, 2016, pp. 92 - 127.
- [55] J. P. Colinge y C. A. Colinge, “The PN Junction Diode” en *Physics of Semiconductor Devices*, 1ra ed., NY, USA: Springer, 2005, pp. 95 - 137.
- [56] L. J. Brillson, “Semiconductor Heterojunctions” en *An Essential Guide to Electronic Material Surfaces and Interfaces*, 1ra ed., NJ, USA: WILEY, 2016, ch. 14, pp. 223 - 248.
- [57] R. J. Martín-Palma y J. M. Martínez-Duart, “Semiconductor Quantum Nanostructures, Multiple Quantum Wells, and Superlattices” en *Nanotechnology for Microelectronics and Photonics*, 2da ed., Elsevier Science, 2017, ch. 5, pp. 107 - 131.
- [58] G. Yadav, S. Dewan, y M. Tomar, “Electroluminescence study of InGaN/GaN QW based p-i-n and inverted p-i-n junction based short-wavelength LED device using laser MBE technique”, *Opt Mater*, vol. 126, 2022.
- [59] R. Pässler, “Semi-empirical descriptions of temperature dependences of band gaps in semiconductors”, *Phys Status Solidi B Basic Res*, vol. 236, no. 3, pp. 710 - 729, 2003.
- [60] K. P. O'Donnell y X. Chen, “Temperature dependence of semiconductor band gaps”, *Appl Phys Lett*, vol. 58, no. 25, pp. 2924 - 2926, Jun. 1998.
- [61] C. Li y Z. Wang, “Computational modelling and ab initio calculations in MAX phases

- I” en *Advances in Science and Technology of Mn+1AXn Phases*, 1ra ed., Elsevier, 2012, ch. 9, pp. 197 - 222.
- [62] C. Li, Z. Ji, J. Li, M. Xu, H. Xiao y X. Xu, “Electroluminescence properties of InGaN/GaN multiple quantum well-based LEDs with different indium contents and different well widths”, *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, pp. 1 - 8, Nov. 2007.
- [63] N. M. Ravindra y V. K. Srivastava, “Temperature dependence of the energy gap in semiconductors”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 40, no. 10, pp. 791 – 793, Ene. 1979.
- [64] S. Hubbard, “Recombination” en *Photovoltaic Solar Energy*, 1ra ed., WILEY, 2016, ch. 2.4, pp. 39 – 46.
- [65] E. Gregersen, “Auger effect - physics.” britannica.com, <https://www.britannica.com/science/Auger-effect> (consultado Mar. 16, 2023).
- [66] W. Shockley y W. T. Read, “Statistics of the recombinations of holes and electrons”, *Physical Review*, vol. 87, no. 5, pp. 835 – 842, Set. 1979.
- [67] T. Q. Khanh, P. Bodrogi, Q. T. Vinh, y H. Winkler, “*LED Lighting: Technology and Perception*”, 1ra ed., Weinheim, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2015, pp. 72 - 130.
- [68] Autonics., Gyeongsangnam-do, Korea, *Temperature controller TC4 series*, Consultado: Set. 28, 2022. [Online]. Disponible: [https://autonics.se/wp-content/uploads/2018/03/tc\\_en\\_manual\\_170905\\_he.pdf](https://autonics.se/wp-content/uploads/2018/03/tc_en_manual_170905_he.pdf)
- [69] Shenzhen Gutest Electronic Technology., China, *KPS3010DF four-digit display DC adjustable regulated*, Consultado: Set. 28, 2022. [Online]. Disponible: <https://www.wanptek.com/productinfo/116944.html>
- [70] Vishay Foil Resistors., Malvern, PA, USA, *Ultra High Precision, Surface Mount 4-Terminal Precision Resistor with Increased Power to 5W (40A max), Resistance Values from 3 mΩ to 100 mΩ, and TCR to ± 15 ppm/°C*, Consultado: Set. 28, 2022. [Online]. Disponible: <https://foilresistors.com/docs/63210/csm3637p.pdf>
- [71] FLUKE Corporation., Everett, WA, USA, *45 Dual Display Multimeter User Manual*, Consultado: Set. 28, 2022. [Online]. Disponible: <https://datasheet.octopart.com/C40-Fluke-datasheet-154734219.pdf>

- [72] Arduino®, Somerville, MA, USA, *Arduino UNO R3 Product Reference Manual*, Consultado: Set. 29, 2022. [Online]. Disponible: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
- [73] GOSSEN., Núremberg, Alemania, *MAVOLUX 5032 B USB – Technical Data*, Consultado: Set. 28, 2022. [Online]. Disponible: <https://gossen-photo.de/en/mavolux-5032-b-usb-2/>
- [74] *Red Tide USB650 Fiber Optic Spectrometer - Installation and Operation Manual*, Ocean Insight., Dunedin, FL USA, 2009, pp. 13 - 19.
- [75] Ocean Insight., Dunedin, FL USA, *OceanView 2.0 Software*, Consultado: Set. 28, 2022. [Online]. Disponible: <https://www.oceaninsight.com/products/software/acquisition-and-analysis/oceanview/>
- [76] “LS - Lamp Measurement Spheres.” [http://host.web-print-design.com/labsphere/products/integrating\\_spheres/lamp\\_measurement\\_spheres.htm](http://host.web-print-design.com/labsphere/products/integrating_spheres/lamp_measurement_spheres.htm) (consultado Oct. 9, 2022).
- [77] Labsphere., North Sutton, NH, USA, *CDS 1100 and 2100 Spectrometers*, Consultado: Oct. 9, 2022. [Online]. Disponible: [https://www.systems-eng.co.jp/dcms\\_media/other/cds1000\\_datasheet.pdf](https://www.systems-eng.co.jp/dcms_media/other/cds1000_datasheet.pdf)
- [78] “NIST: Basic Atomic Spectroscopic Data - Periodic Table.” <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/periodictable.htm> (consultado May. 19, 2022).
- [79] Cree®, Durham, NC, USA, *Product family data sheet Cree® XLamp® XP-G3 LEDs Product Description*, Consultado: Ago. 3, 2022. [Online]. Disponible: <https://www.es.lumistrips.com/amfile/file/download/file/4908/product/2961/>
- [80] Cree®, Durham, NC, USA, *Product family data sheet Cree® XLamp® XP-L LEDs Product Description*, Consultado: Set. 11, 2022. [Online]. Disponible: <https://www.es.lumistrips.com/amfile/file/download/file/4893/product/3210/>
- [81] Maxim Integrated., San Jose, CA, USA, *Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)*, Consultado: Nov. 4, 2022. [Online]. Disponible: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max6675.pdf>
- [82] S. B. Tristán Landín, “Desarrollo de un microscopio óptico digital miniaturizado”, Tesis

de Maestría, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Nuevo León, México, 2017.

- [83] “Digital camera - Working with diagrams.” <https://www.dino-lite.com/download.php> (consultado Jun. 6, 2023).
- [84] Dino-Lite., New Taipei, Taiwan, *DinoCapture 2.0 Software*, Consultado: Jun. 9, 2022. [Online]. Disponible: <https://www.dino-lite.com/download01.php>
- [85] S. Martín Fernandez, “Enseñanza de las Ciencias: Cómo funciona un microscopio electrónico de barrido”, *100cias@uned*, no. 9, pp. 151 - 155, Ene. 2006.
- [86] J. Renau-Piquer y M. Faura, “Principios básicos del microscopio electrónico de barrido”, *Centro de Investigación Hospital “La Fe”*, pp. 73 - 92, 1994.
- [87] V. D. Hodoroaba, “Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS),” en *Characterization of Nanoparticles: Measurement Processes for Nanoparticles*, 1ra ed. Elsevier, 2019, ch. 4.4, pp. 397 - 417.
- [88] “Microscopio electrónico de barrido ZEISS EVO.” <https://www.zeiss.com/microscopy/es/productos/sem-fib-sem/sem/evo.html> (consultado Nov. 1, 2023).
- [89] R. Dawson, “How significant is a boxplot outlier?”, *Journal of Statistics Education*, vol. 19, no. 2, pp. 1 - 12, 2011.
- [90] *Procedimiento OP-003 para la calibración de espectrorradiómetro*, CEM OP-003, 2011, Disponible: [https://www.cem.es/sites/default/files/op-003\\_digital\\_0.pdf](https://www.cem.es/sites/default/files/op-003_digital_0.pdf).
- [91] OSRAM SYLVANIA., Wilmington, MA, USA, *LED ColorCalculator*, Consultado: May 17, 2023. [Online]. Disponible: <https://www.osram.us/cb/tools-and-resources/applications/led-colorcalculator/index.jsp>
- [92] S. Palakurthy, S. Singh, S. Pal, y C. Dhanavantri, “Design and comparative study of lateral and vertical LEDs with graphene as current spreading layer”, *Superlattices Microstruct*, vol. 306, pp. 86 - 94, Oct. 2015.
- [93] J. Li, J. Wang, X. Yi, Z. Liu, T. Wei, J. Yan y B. Xue, “*III-Nitrides Light Emitting Diodes: Technology and Applications*”, 1ra ed. New York, NY, USA: Springer, 2016, ch. 4, pp. 36 - 38.

[94] M. R. Quispe, M. J. Horn y M. M. Gómez, "Avances en el estudio de la influencia de la temperatura de un LED blanco sobre sus características lumínicas," presentado en el XXIX Simp. Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIX - SPES), Chachapoyas, Amazonas, Perú, Nov. 14 - 28, 2022.

[95] M. R. Quispe, F. M. Oscoco, M. J. Horn y M. M. Gómez, "Influence of the temperature of a white LED on its lighting characteristics," presentado en el Peruvian Workshop on Solar Energy 2022 (JOPES 2022), Lima, Perú, May. 11 - 13, 2022, Paper 2538(2023)012009

## Anexos

Anexo 1: Detalles del circuito y de los algoritmos empleados en la monitorización de la temperatura por autocalentamiento . . . . .	1
Anexo 2: Detalles de la calibración del espectrofotómetro Ocean Optics USB 650 . . . . .	4
Anexo 3: Curvas características de los leds cree utilizados . . . . .	10
Anexo 4: Imágenes termográficas . . . . .	11
Anexo 5: Primera publicación - XXIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, 2022 . . . . .	14
Anexo 6: Segunda publicación - Journal of Physics: Conference Series, 2023 . . . . .	26

**Anexo 1: Detalles del circuito y de los algoritmos empleados en la monitorización de la temperatura por autocalentamiento**

En este anexo se ve de forma un poco más detallada al circuito de encendido y apagado del LED bajo test, al cual se le implementó el módulo MAX6675 con un termopar (FIGURA I).

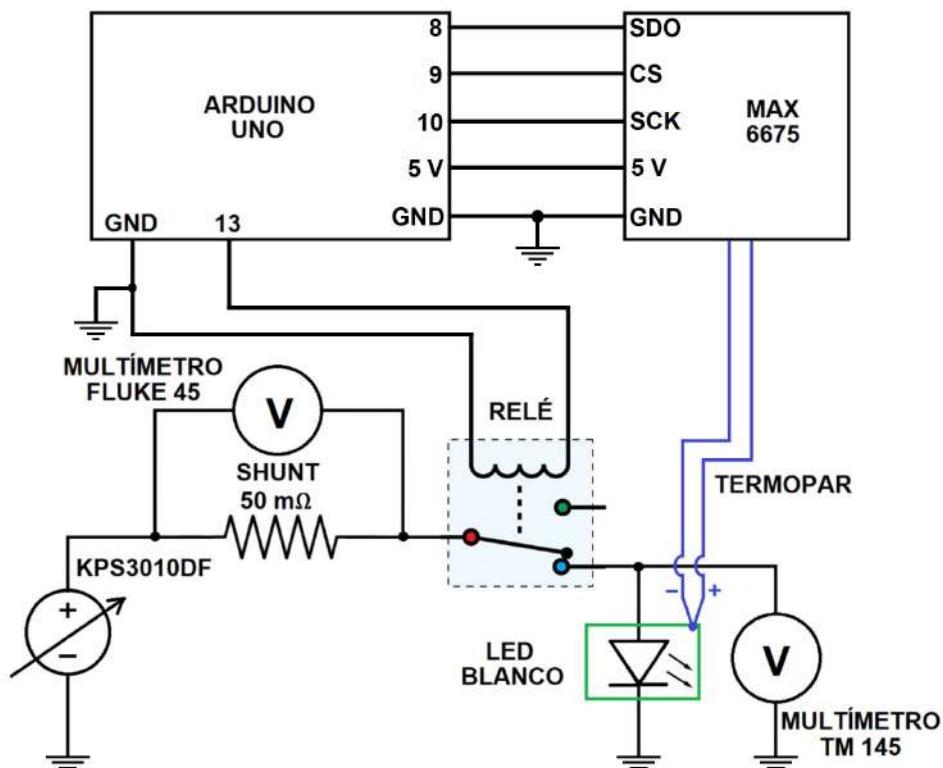


FIGURA I. Circuito encargado de la energización y monitorización del LED blanco instalado dentro de la caja oscura del DE adaptado al módulo MAX6675.

A continuación, se muestran los algoritmos utilizados en esta sección.

#### A. Algoritmo Temperatura\_Tiempo.ino

```

1 #include <GyverMAX6675.h>
2
3 #define DATA_PIN 8
4 #define CS_PIN 9
5 #define CLK_PIN 10
6
7 const int RELAY=13;
8 // Intervalos de rutina de medición
9 unsigned int ahora = 0;
```

```

10 unsigned int antes = 0;
11 unsigned int intervalo = 0;
12
13 // Intervalo de medición del MAX6675
14 unsigned int ahoraV = 0;
15 unsigned int antesV = 0;
16
17 GyverMAX6675<CLK_PIN, DATA_PIN, CS_PIN> sens;
18
19 void setup()
20 {
21     Serial.begin(9600);
22     pinMode(RELAY,OUTPUT);
23     antes = millis();
24     antesV = millis();
25 }
26 void loop()
27 {
28     ahora = millis();
29     intervalo = ahora - antes;
30     if (intervalo <= 7000)
31         // Tiempo total en milisegundos
32     {
33         if (intervalo <= 2000)
34             // Tiempo encendido en milisegundos
35         {
36             digitalWrite(RELAY,HIGH);
37         }
38         else
39         {
40             digitalWrite(RELAY,LOW);
41         }
42     }
43     else
44     {
45         antes = ahora;
46     }
47
48     ahoraV = millis();
49     if (ahoraV - antesV > 250)

```

```

50     {
51         if (sens.readTemp()) {
52             // Leyendo la temperatura
53             Serial.print(sens.getTemp());
54             // Tomamos la temperatura a través de getTemp
55             Serial.print('\n');
56         } else Serial.println("Error");
57         antesV = ahoraV;
58     }
59 }
```

CÓDIGO.I. Algoritmos de rutinas de energización y medición

## B. Algoritmo datosMAX6675.py

```

1 import serial
2 import time
3
4 archivo = open('C:\\\\Users\\\\MILNER\\\\Desktop\\\\Tesis\\\\Arduino_Temp_Tiempo\\\\
5 Temp_25°C_100mAto1000mA_2segUp5segDown_5min.txt', 'w')
6 serialArduino = serial.Serial("COM6", 9600)
7 time.sleep(0.5)
8 while True:
9     cad = serialArduino.readline().decode('ascii')
10    print(cad)
11    archivo.write(cad)
```

CÓDIGO.II. Algoritmo de almacenamiento de datos de cada rutina de medición.

## Anexo 2: Detalles de la calibración del espectrofotómetro Ocean Optics USB 650

### A. Calibración de la componente longitud de onda

Luego de la obtención de los datos suficientes para la calibración de la componente longitud de onda del espectrofotómetro se procedió al tratamiento de los mismos:

- Debido a que los datos del ruido de oscuridad son valores aleatorios se halló el valor absoluto por cada nanómetro para obtener el número de cuentas producidas por el ruido por unidad de longitud de onda, enseguida se encontraron los valores atípicos presentes en los 6510 datos (651 datos por 10 mediciones), para ello se aplicaron las ecuaciones 1 y 2, las cuales son ecuaciones estadísticas aplicadas en los diagramas de cajas y bigotes (FIGURA II) que es muy utilizada para encontrar, justamente, valores atípicos en una muestra de  $N$  datos ordenados y no agrupados.

$$IQR = Q_3 - Q_1$$

$$\begin{cases} MIN = Q_1 - 1,5 \times IQR \\ MAX = Q_3 + 1,5 \times IQR \end{cases} \quad (1)$$

Son valores atípicos aquellos que:

$$\begin{cases} P_1 < MIN \\ P_2 > MAX \end{cases} \quad (2)$$

Donde:

$Q_1, Q_3$  : primer y tercer cuartil.

$IQR$  : rango intercuartil.

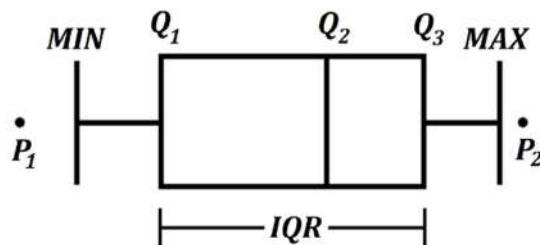


FIGURA II. Diagrama de caja y bigotes.

- Aquellos valores atípicos fueron reemplazados por la interpolación de datos contiguos.

Luego, paralelamente se aplicó el valor absoluto a los datos procedentes de los espectros las lámparas de gas, claramente solo sufrieron modificaciones las zonas donde los espectros no presentan señal alguna y donde la aleatoriedad del ruido podría presentar valores negativos. A continuación, se hizo la diferencia de las señales de los espectros de gas con los de ruido de oscuridad nanómetro a nanómetro.

- Se tomó como referencia a las tablas de los espectros de emisión de elementos químicos presentes en la página oficial del NIST. En base a comparación se eligieron los datos de la página web que estuvieran dentro del rango de  $350 \text{ nm}$  a  $1000 \text{ nm}$  ya que es el rango en el que el espectrofotómetro USB 650 trabaja.
- Se hallaron las longitudes de onda promedio por cada línea de emisión, luego se hizo el cálculo del error siguiendo el procedimiento OP-003 (Procedimiento para la calibración de espectrorradiómetros) del CEM aplicando la fórmula mostrada en la Ecuación 3.

$$e_\lambda = \lambda_m - \lambda_r + \delta\lambda_{mres} \quad (3)$$

Donde:

$e_\lambda$  : error de medición.

$\lambda_m$  : longitud de onda promedio de una línea de emisión medida.

$\lambda_r$  : longitud de onda de una línea de emisión de referencia.

$\delta\lambda_{mres}$  : corrección por resolución de la longitud de onda del espectrofotómetro.

- Por otro lado, se hallaron las incertidumbres respectivas, para ello se aplicó la ley de propagación de incertidumbres que se expresa matemáticamente en la Ecuación B4, en el procedimiento de calibración OP-003 se considera que las magnitudes están desacopladas entre ellas.

$$u^2(e_\lambda) = c_{\lambda m}^2 u^2(\lambda_m) + c_{\lambda r}^2 u^2(\lambda_r) + c_{\lambda mres}^2 u^2(\delta\lambda_{mres}) \quad (4)$$

Los factores de la forma  $c_i$  son llamados coeficientes de sensibilidad y se definen

como:

$$c_{\lambda_m} = \frac{\partial e_\lambda}{\partial \lambda_m} = 1; c_{\lambda_r} = \frac{\partial e_\lambda}{\partial \lambda_r} = -1; c_{\delta\lambda_{mres}} = \frac{\partial e_\lambda}{\partial \delta\lambda_{mres}} = 1$$

Con estas consideraciones, la Ecuación 4 queda de la siguiente forma:

$$u^2(e_\lambda) = u^2(\lambda_m) + u^2(\lambda_r) + u^2(\delta\lambda_{mres}) \quad (5)$$

Donde:

$u(e_\lambda)$  : incertidumbre combinada.

$u(\lambda_m)$  : incertidumbre debida a la falta de repetibilidad cuya distribución de probabilidad es normal y se calcula como la desviación estándar dividido por la raíz cuadrada del número de datos (Ecuación 6).

$u(\lambda_r)$  : incertidumbre debida a la calibración del patrón, para este caso como la longitud de onda del patrón es de una lámpara de emisión basada en excitaciones electrónicas entre estados atómicos; su contribución es despreciable por lo que se puede prescindir de ella.

$u(\delta\lambda_{mres})$  : incertidumbre asociada a la resolución del espectrofotómetro a ser calibrado cuya distribución es rectangular y se calcula como  $\pm 0,5$  veces el último dígito del instrumento, dividido por raíz de tres (Ecuación 7).

$$u(\lambda_m) = s(\lambda_m)/\sqrt{n} \quad (6)$$

$$u(\delta\lambda_{mres}) = (\pm 0,5 \times res)/\sqrt{3} \quad (7)$$

- Finalmente se halló la incertidumbre expandida que consiste en multiplicar la incertidumbre combinada por el factor de cobertura  $k$  (Ecuación 8) que puede tomar el valor  $k = 2$  valiéndose de lo dicho por el procedimiento OP-003 del CEM que al citarlo dice lo siguiente: *Si se asume una distribución normal para el mesurando y la incertidumbre combinada es menor que el 5%*

bre típica asociada a la estimación de salida tiene la suficiente fiabilidad, de utilizar un factor de cobertura  $k = 2$ ; teniéndose así una probabilidad de cobertura de, aproximadamente, un 95%.

$$U = k \times u(e_\lambda) \quad (8)$$

Tanto los datos obtenidos de la página del NIST, así como los datos experimentales y los cálculos realizados para esta calibración son reportados en las TABLAS I y II.

TABLA I

Resultados de la calibración de la componente longitud de onda del espectrofotómetro Ocean Optics USB 650. Para el H<sub>2</sub>, He y Ne.

Lámparas de emisión	Longitud de onda		Error (nm)	Incertidumbre (nm)
	de referencia del NIST (nm)	experimental (nm)		
H <sub>2</sub>	486,1362	485,0	-1,1361	± 0,58
	656,2852	655,0	-1,2852	± 0,58
	388,8649	388,0	-0,8649	± 0,58
	447,1479	446,0	-1,1479	± 0,58
	501,5678	500,0	-1,5678	± 0,58
He	587,5640,	586,0	-1,5640	± 0,58
	667,8152	666,0	-1,8152	± 0,58
	706,5177	705,0	-1,5177	± 0,58
	728,1350	727,0	-1,1350	± 0,58
	585,2488	584,0	-1,2488	± 0,58
Ne	588,1895	587,0	-1,1895	± 0,58
	640,2248	639,0	-1,2248	± 0,58
	659,8953	658,0	-1,8953	± 0,58
	692,9467	692,0	-0,9467	± 0,58
	703,2413	702,0	-1,2413	± 0,58
	717,3938	716,0	-1,3938	± 0,58
	723,5188	723,0	-0,5188	± 0,58

TABLA II

Resultados de la calibración de la componente longitud de onda del espectrofotómetro Ocean Optics USB 650. Para el Ar y Hg.

Lámparas de emisión	Longitud de onda de referencia del NIST	Longitud de onda experimental	Error	Incertidumbre
	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
Ar	696,5431	695,0	-1,5431	± 0,58
	706,7218	705,0	-1,7218	± 0,58
	714,7042	713,0	-1,7042	± 0,58
	727,2936	726,0	-1,2936	± 0,58
	738,3980	737,0	-1,3980	± 0,58
	750,3869	750,0	-1,3869	± 0,58
	763,5106	762,0	-1,5106	± 0,58
	772,3761	771,0	-1,3761	± 0,58
	794,8176	794,0	-0,8176	± 0,58
	800,6157	800,0	-0,6157	± 0,58
	810,3693	810,0	-0,3693	± 0,58
	826,4522	825,0	-1,4522	± 0,58
	842,4648	841,0	-1,4648	± 0,58
	852,1442	851,0	-1,1442	± 0,58
Hg	866,7944	866,0	-0,7944	± 0,58
	912,2967	911,0	-1,2967	± 0,58
	922,4499	922,0	-0,4499	± 0,58
	366,3279	367,0	-0,6721	± 0,58
	404,6563	404,1	-0,5563	± 0,61
	435,8328	435,0	-0,8328	± 0,58
	546,0735	545,0	-1,0735	± 0,58
	576,9598	576,0	-0,9598	± 0,58
	579,0663	578,0	-1,0663	± 0,58
	794,4555	794,0	-0,4555	± 0,58

### B. Calibración de la componente intensidad radiométrica

A continuación, se tiene el proceso de análisis de esta sección:

- Se realizaron diez mediciones del espectro de cada LED por medio del espectrofotómetro Ocean Optics implementado en el DE, luego se sustrajo el ruido de oscuridad (previamente empleado junto al análisis de cajas y bigotes aplicado en los resultados de la calibración en la componente longitud de onda ya discutido).
- Por otro lado, se obtuvieron los espectros de los mismos LEDs con la esfera inte-

gradora a las mismas condiciones eléctricas de corriente (100 mA) y de temperatura ambiente muy próxima a los 25 °C.

- Como la data proporcionada por la esfera integradora es absoluta, entonces permite obtener la sensibilidad del espectrofotómetro nanómetro a nanómetro asociado a cada uno de los tres LEDs CREE. Para ello se aplica una variante de la Ecuación 4 del Marco Teórico, la cual se muestra en la Ecuación 9.

$$S(\lambda) = \frac{\Phi_{e,\lambda}(\lambda)}{I(\lambda)} \quad (9)$$

Donde:

$S(\lambda)$  : sensibilidad del espectrómetro nanómetro a nanómetro [ $W \cdot nm^{-1} \cdot Cuentas^{-1}$ ].

$\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$  : densidad de flujo mostrada por el espektorradiómetro de la esfera integradora [ $W \cdot nm^{-1}$ ].

$I(\lambda)$  : intensidad mostrada por el espectrómetro [Cuentas].

Se aplica la función  $S(\lambda)$  asociada a cada LED a sus espectros respectivos, los cuales fueron obtenidos a diferentes niveles de intensidad de corriente eléctrica y de temperatura.

**Anexo 3: Curvas características de los leds cree utilizados**

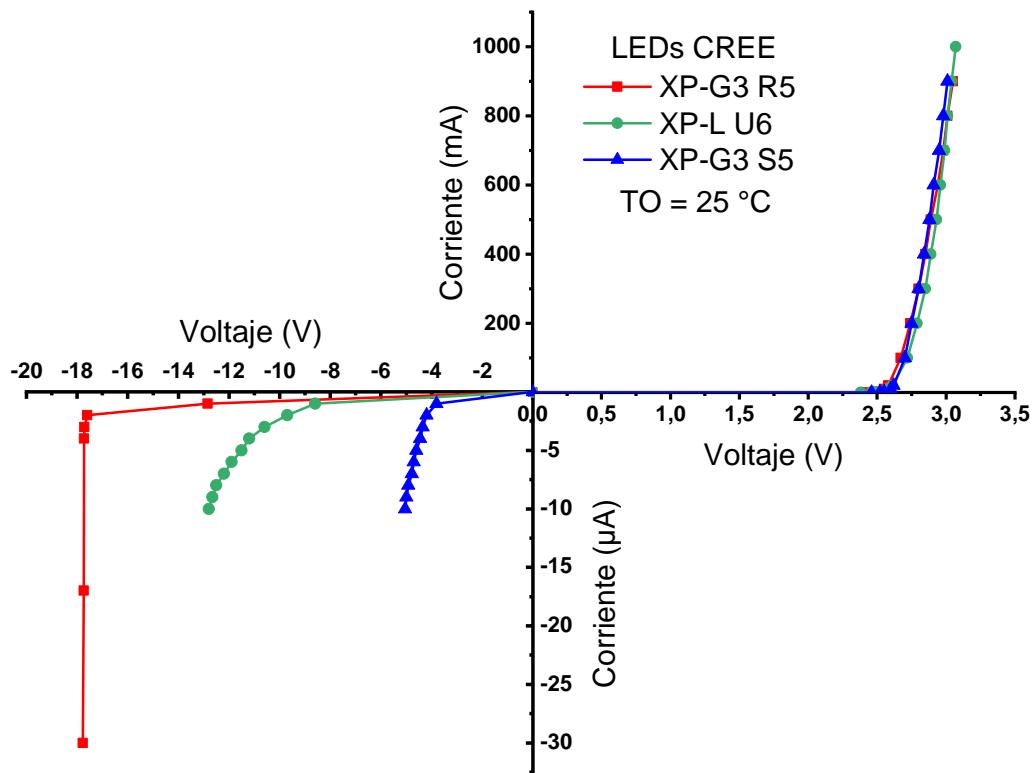


FIGURA III. Curva característica de los LEDs CREE bajo una TO de 25 °C.

#### Anexo 4: Imágenes termográficas

Con ayuda de la cámara termográfica Sonel KT-200, se tomaron las siguientes imágenes de los LEDs CREE XP-G3 R5, XP-L U6 y XP-G3 S5; bajo la TO de 25 °C y corrientes de 0 mA, 100 mA, 350 mA y 600 mA.

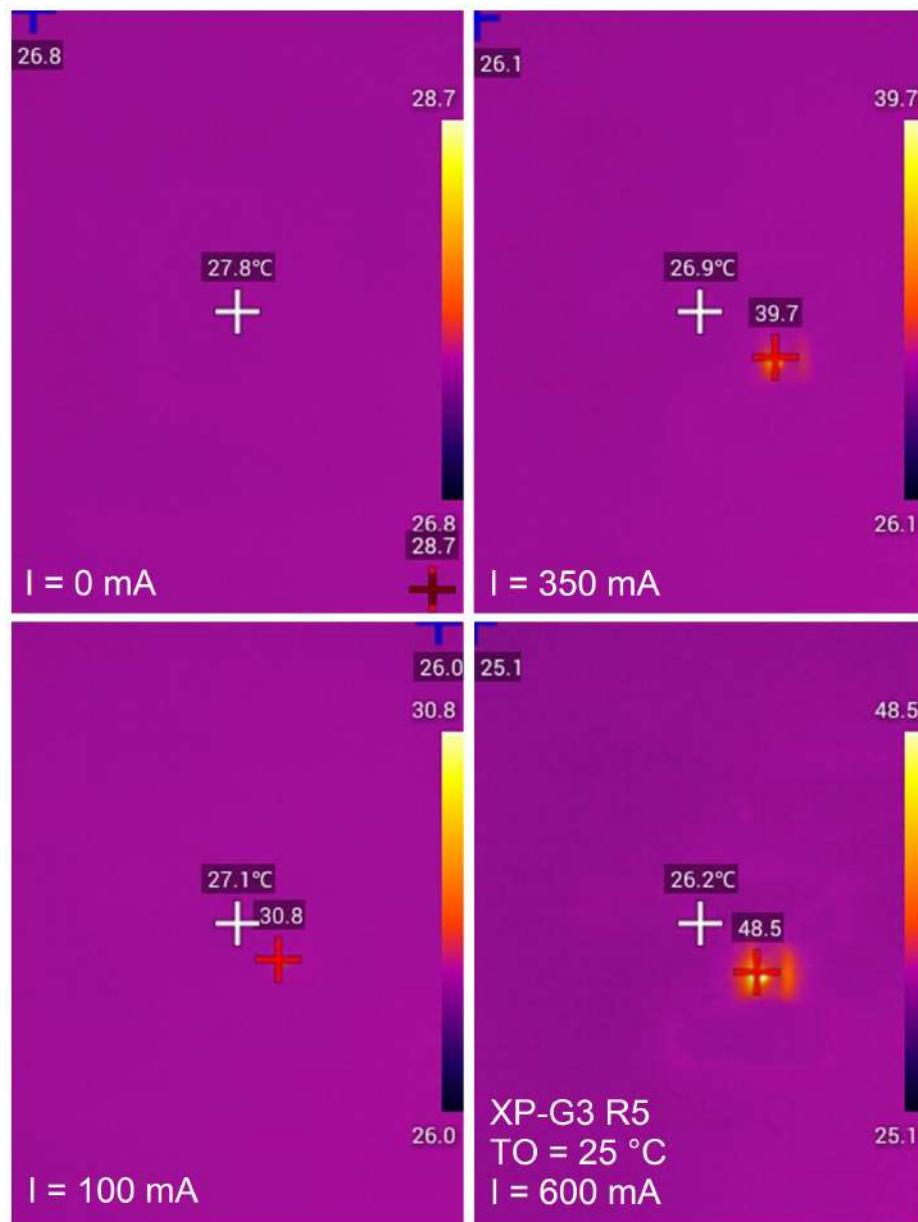


FIGURA IV. Imágenes termográficas del LED CREE XP-G3 R5, TO de 25 °C.

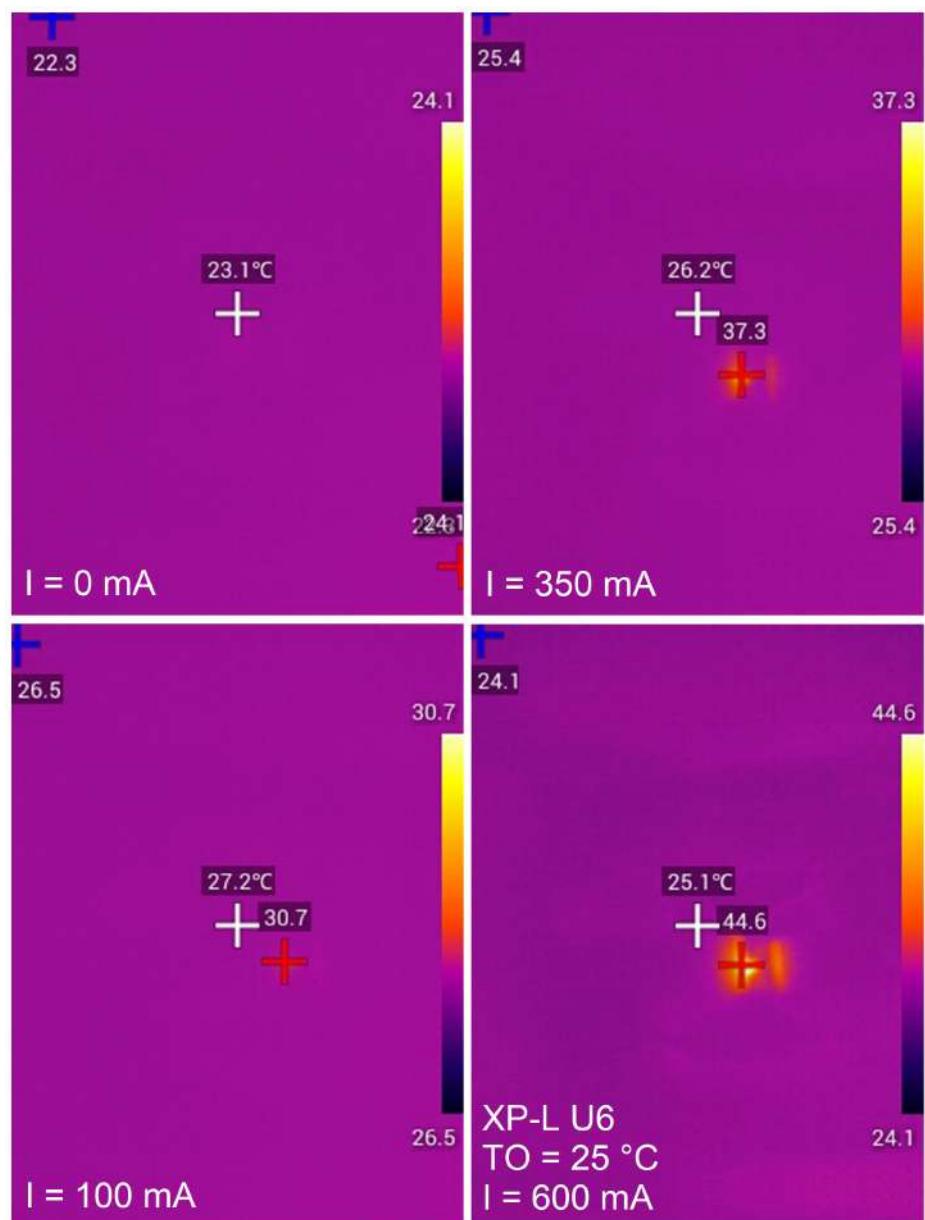


FIGURA V. Imágenes termográficas del LED CREE XP-L U6, TO de 25 °C.

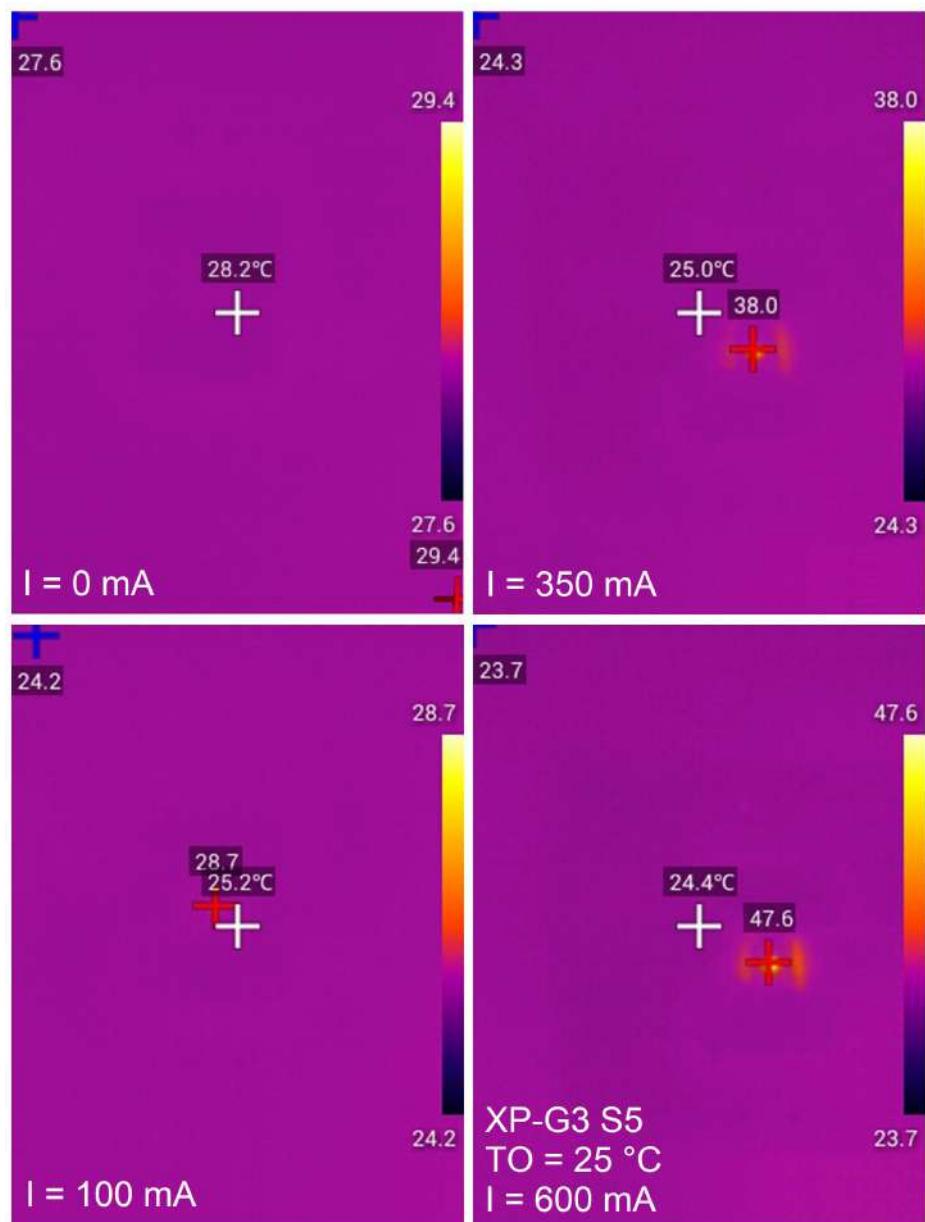


FIGURA VI. Imágenes termográficas del LED CREE XP-G3 S5, TO de  $25^\circ\text{C}$ .

**Anexo 5: Primera publicación - XXIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, 2022**

***Avances en el estudio de la influencia de la temperatura de un LED blanco sobre sus características lumínicas***

## **AVANCES EN EL ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE UN LED BLANCO SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS LUMÍNICAS**

**Milner Rene Quispe Montesinos** – milner.quispe.m@uni.pe

**Manfred Josef Horn Mutschler** – mhorn@uni.edu.pe

**Mónica Marcela Gómez León** – mgomez@uni.edu.pe

Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ciencias  
Lima, Perú

13 Eficiencia Energética (EE)

**Resumen.** Este trabajo de investigación explora una serie de métodos para determinar la influencia de la temperatura sobre las características luminicas de LEDs. Se determinó las curvas características de diferentes LEDs blancos de potencia y su eficacia ( $lm/W$ ) en el rango de 10 °C a 95 °C. Adicionalmente se realizaron análisis morfológicos y elementales de los fósforos de los LEDs con SEM y EDS, encontrándose C, O y Si, entre otros elementos con sus respectivos porcentajes en masa.

**Palabras-clave:** Fotometría, Espectrofotometría, LED blanco, Variación de temperatura, SEM

### **1. INTRODUCCIÓN**

La evolución tecnológica de los materiales del estado sólido ha permitido el desarrollo de los diodos como la base para los diodos emisores de luz (LED), que fueron mejorando en su proceso de fabricación pasando del LED rojo hasta el LED azul, lo que permitió el desarrollo del LED blanco, logrando así posicionarse como protagonista en el mercado de la iluminación a nivel mundial debido a su buen rendimiento frente a su bajo consumo energético. Esto es muy notorio sobre todo en países en vías de desarrollo (Ajinkya S. K. et al., 2020).

Algunas de las técnicas reportadas en este trabajo de investigación ya habían sido planteadas y aplicadas en el Laboratorio de Fotometría de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú (Salazar R, J & Horn M, M, 2017), las cuales consistían en mostrar los cambios fotométricos y espectrométricos producidos por la variación de la temperatura en un LED blanco. Ahora se muestran los avances realizados en cada una de ellas. Por otro lado, se presentan nuevas propuestas que están en desarrollo y que apuntan a robustecer los resultados ya vistos anteriormente, las cuales consisten en el estudio de la composición química elemental del fósforo fluorescente que recubre al semiconductor ya que este cumple la función de reemitir radiación visible (Bairong H. et al., 2015) de longitudes de onda más largas que la emitida por el semiconductor, así como también al semiconductor mismo. Adicionalmente, se estudia la morfología de la superficie semiconductora y de la sustancia fluorescente por medio de análisis SEM-EDS (Pradeep K. B. et al., 2022).

### **2 METODOLOGÍA**

En este trabajo de investigación se estudió LEDs blancos de alta potencia:

- a) LEDs blancos de la marca CREE, modelos XP-L U6 y XP-G3 S5, cuyas temperaturas de color correlacionadas (CCT) son de 3000 K y 6000 K respectivamente (Llamaremos a estos dispositivos como LED A y LED B respectivamente) (Fig. 1a).
- b) LEDs blancos de alta potencia, sin marca (Fig. 1b), los cuales fueron identificados como LED 1, LED 2, LED 3, LED 4, LED 5 y LED 6, los cuales fueron destinados también al estudio de sus propiedades morfológicas y de su composición química elemental, para determinar las posibles sustancias de las que están compuestos los semiconductores y sus respectivas sustancias fluorescentes.

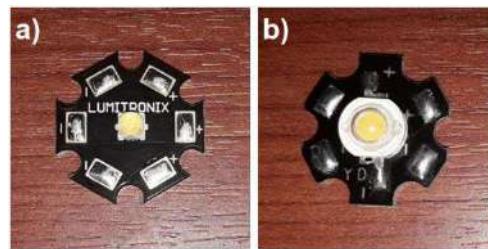


Figura 1. LEDs blancos: (a) CREE XP-L U6 de 3000K y XP-G3 R5 de 6000K; (b) LEDs blancos sin marca

Para el estudio de sus propiedades lumínicas en función de la temperatura se utilizó un dispositivo experimental diseñado y construido en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. Por otro lado, se hizo uso de una esfera integradora y espectrómetro, con la que se determinaron el flujo luminoso y la eficacia lumínosa de cada uno de estos LEDs.

## 21 Dispositivo experimental (DE)

Las propiedades lumínicas de los LEDs fueron determinadas mediante el uso de un dispositivo experimental (Fig.2) el cual incluye una caja de madera de paredes interiores recubiertas de una tela de pana de color negro con el propósito de evitar la reflexión de la luz. Esta cavidad, en forma de paralelepípedo de dimensiones 15 cm x 15 cm x 30 cm, está sellada por dos tapas (15 cm x 15 cm) ubicadas en dos de sus caras opuestas. Una de estas tapas contiene al sensor de un luxómetro Gossen y ubicado aproximadamente a un centímetro por debajo de este sensor se encuentra la entrada a una fibra óptica perteneciente a un espectrofotómetro Ocean Optics Red Tide USB650. En la tapa opuesta se encuentra una platina de aluminio, que sirve de soporte del LED, y un termopar para medir la temperatura en la superficie de la platina. En la cara exterior de esta platina se encuentra un arreglo de cuatro celdas Peltier, conectadas eléctricamente en serie, que permiten, con un controlador digital de temperatura, fijar la temperatura de la platina en el rango de 0 °C – 100 °C. La otra cara de las celdas de Peltier está unida a un disipador de calor con un ventilador para la refrigeración del sistema. Cabe mencionar que estos dispositivos se encuentran unidos por medio de una pasta térmica de alta calidad para garantizar un buen contacto térmico entre los elementos mencionados.

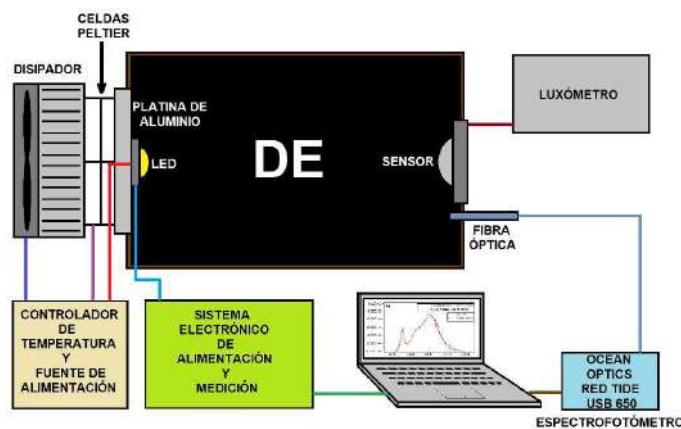


Figura 2. Esquema de elementos que componen al DE.

**Electrónica asociada al LED.** El LED está montado en un circuito electrónico el cual permite su energización y la medición de sus parámetros eléctricos asociados. El dispositivo de alimentación es una fuente de tensión y corriente regulables Wamptek KPS3010DF, una resistencia shunt de 50 mohm que se encuentra conectada a un multímetro Fluke 45 para poder tener registro del pequeño voltaje que se encuentra en sus extremos. Conectado en paralelo al LED se tiene un multímetro TM 45 para medir la caída de tensión en el LED. Finalmente, se tiene un relé que es activado y desactivado por medio de un microcontrolador Arduino UNO (Fig. 3) que mantiene al circuito cerrado por dos segundos y luego lo mantiene abierto por cinco segundos de manera periódica, esto con la finalidad de evitar a medida de lo posible el autocalentamiento del diodo bajo evaluación (Se J. O. y Jaehée C., 2017).

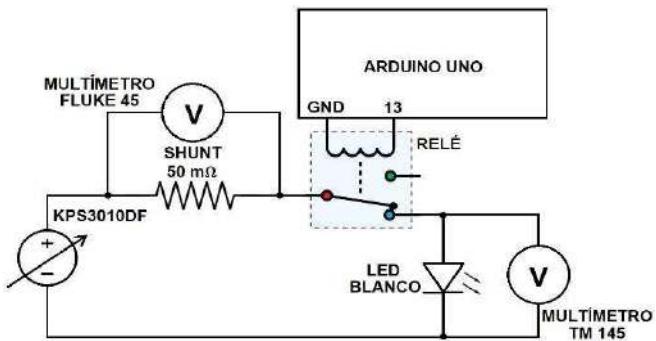


Figura 3. Sistema electrónico de alimentación y medición en el DE.

## 22 Uso del DE

Para la toma de datos con el DE se encendieron todos los instrumentos mencionados en la electrónica asociada al LED, además de un regulador térmico Autonics TC4 y se esperó un tiempo prudente de treinta minutos para la estabilización de los mismos, se configuró al regulador térmico a una temperatura deseada: 10 °C, 25 °C, 50 °C, 75 °C o 95 °C. Al llegar a la temperatura adecuada y alcanzar la estabilidad térmica, se reguló la tensión suministrada al LED y se tomó lecturas de los voltajes en los multímetros. De manera simultánea se tomó lectura del luxómetro y se hizo la captura de los datos espectrales mostrados por el software Ocean View que controla al espectrómetro Ocean Optics.

## 23 Uso de la esfera integradora

El DE nos ofrece la posibilidad de obtener datos de las propiedades lumínicas relativas a diferentes temperaturas. Estas mediciones se complementaron con mediciones radiométricas y fotométricas absolutas a temperatura ambiental, con el uso de una esfera integradora Labsphere LMS-400 de un metro de diámetro, con la que se cuenta en el Laboratorio de Fotometría de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, la cual se encuentra calibrada con una lámpara patrón cuyo flujo luminoso es conocido. El equipo que trabaja a la par con la esfera integradora está constituido por una fuente de alimentación LPS-100 0307 para una lámpara auxiliar y un espectrómetro Labsphere CDS 1100 que se encuentra conectado por medio de una fibra óptica a la esfera. Para el control de este espectrómetro se hace uso del software Light MtrX (Fig. 4).

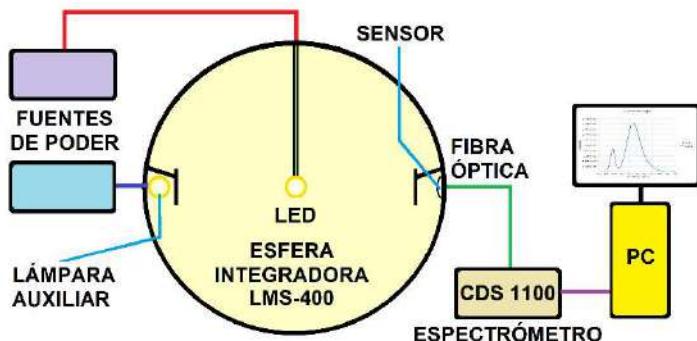


Figura 4. Esquema de elementos que componen a la esfera integradora.

**Diseño y montaje de un sistema de sujeción para un LED de alta potencia.** Para poder tener una estabilidad mecánica del LED de alta potencia dentro de la esfera integradora y también para la implementación de un termopar junto al LED fue necesario el diseño de un sistema de sujeción para el diodo. Para ello se tomó como base un encapsulado E27 de una lámpara LED sobre la cual se armó un arreglo de piezas que fueron diseñadas en el software SolidWorks y que fueron materializados con impresión 3D (Fig. 5).

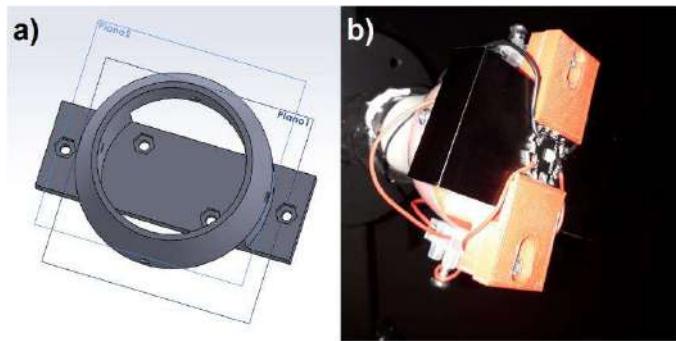


Figura 5. (a) Diseño del soporte en SolidWorks, (b) Montaje del diseño en un encapsulado E27.

**Modo de uso de la esfera integradora.** Teniendo el diseño mecánico listo, este fue instalado en el interior de una esfera integradora procurando que el LED se encuentre en el centro geométrico de la esfera, adicional a ello se colocó un termopar con el que se pudo monitorizar la temperatura de operación del LED.

A continuación, se conectó el LED a un sistema de alimentación y de medición constituido por los mismos instrumentos empleados en el DE a excepción del relé y el microcontrolador Arduino UNO (Fig. 6), ya que para esta parte del estudio se requiere que el LED esté encendido de manera continua durante el test del mismo.

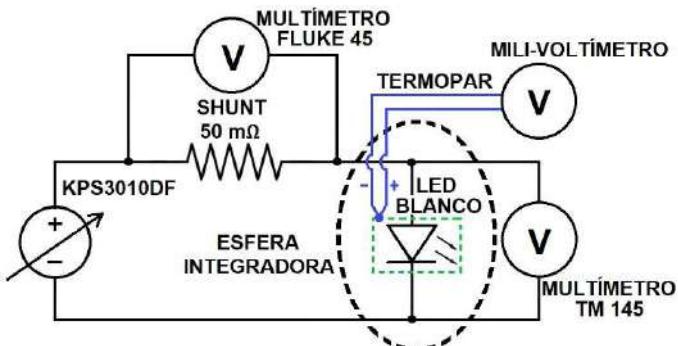


Figura 6. Sistema electrónico de alimentación y medición en la esfera integradora.

Luego de haber hecho las conexiones ópticas y eléctricas correspondientes, se mantuvo encendida la lámpara auxiliar por treinta minutos, para después proceder con la caracterización de la esfera integradora con ayuda de esta lámpara mientras que el LED se encontraba apagado. Luego de la caracterización de la esfera se apagó la lámpara auxiliar y se encendió el LED para proceder con las mediciones de los parámetros lumínicos por medio del software Light MtrX bajo las condiciones de corriente en polarización directa  $I_F$  de 100 mA, 200 mA, 300 mA, 400 mA, 500 mA y 600 mA.

Los procedimientos aplicados con el DE, así como con la esfera integradora se realizaron tanto para el LED A como para el LED B.

#### 24 Preparación de muestras para el análisis morfológico y elemental de los LEDs

Los LEDs bajo análisis por medio del uso de un microscopio electrónico de barrido (SEM) fueron preparados bajo los criterios descritos a continuación:

Los LEDs 1, 2 y 3 solo fueron despojados de sus cubiertas protectoras de plástico y de sus respectivas cúpulas de gel que actuaban como lentes convergentes.

Los LEDs 4 y 5 fueron despojados de su protección plástica, lentes de gel y fósforo fluorescente dejando al descubierto a los semiconductores.

Finalmente, el LED 6 fue expuesto a una tensión eléctrica por encima de los 5 V para deteriorarlo por sobrecarga, luego al igual que los LEDs 4 y 5 se le despojó de todo lo que estaba por encima del semiconductor dejando a este último al descubierto.

El LED 3 fue analizado en el SEM de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, mientras que los otros cinco LEDs fueron enviados al CIMAV – Chihuahua – México para ser analizados por el SEM que se encuentra en sus instalaciones.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1 Análisis eléctrico de los LEDs

El uso del DE permite realizar análisis lumínicos y análisis eléctricos de los LEDs a diferentes temperaturas y por medio de ello hacer estudios sobre la forma del funcionamiento de estos dispositivos bajo diferentes condiciones térmicas.

Al alimentar a ambos LEDs con diferentes valores de tensión y corriente se pudo obtener las curvas características de los mismos a diferentes temperaturas, así como se observa en la Fig. 7, observándose un desplazamiento de las curvas con el aumento de la temperatura, observándose que las corrientes comienzan a ser significativas entre los 2,4 V y 2,5 V para el caso del LED A (Fig. 7a), mientras que para el LED B (Fig. 7b) las corrientes comienzan a ser significativas entre los 2,45 V y los 2,55 V, viendo que para los mismos valores de corriente la tensión aumenta. En particular, en las curvas correspondientes al LED A se observa un menor estrechamiento entre las curvas que para el caso del LED B.

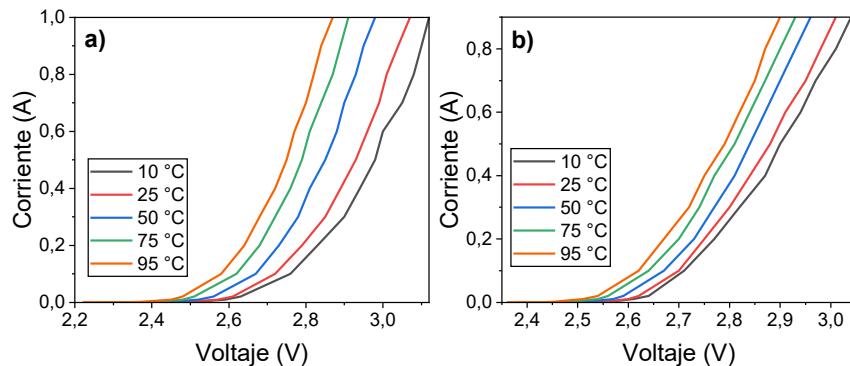


Figura 7. Curvas características experimentales a diferentes temperaturas de operación  
(a) LED A: CREE XP-L U6 de 3000K, (b) LED B: CREE XP-G3 R5 de 6000K.

En la Fig. 8 se describe la variación de la resistencia asociada a los LEDs respecto a la potencia eléctrica para diferentes temperaturas de operación: se observa un desplazamiento de las curvas de derecha a izquierda con el aumento de la temperatura lo que conlleva que para un mismo valor de resistencia o de potencia eléctrica, al aumentar un factor el otro disminuye. Además, para potencias muy bajas los valores de la resistencia se tornan bastante elevados y estos van disminuyendo drásticamente conforme la potencia va creciendo, dándose finalmente que para potencias altas la resistencia disminuya considerablemente. Para el LED A se observa que para potencias cercanas a 3 W la resistencia se approxima a 3  $\Omega$ , mientras que en el LED B cuando la potencia es de 2,6 W aproximadamente; la resistencia se aproxima a 3,2  $\Omega$ .

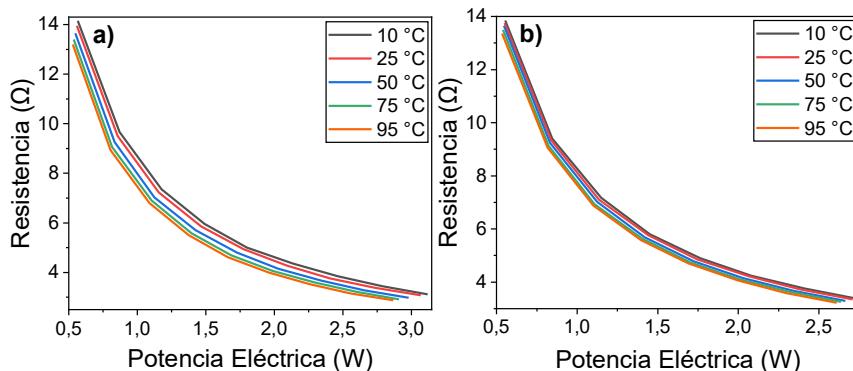


Figura 8. Relación entre la resistencia y la potencia eléctrica a diferentes temperaturas de operación (a) LED A: CREE XP-L U6 de 3000K, (b) LED B: CREE XP-G3 R5 de 6000K.

Al hacer un contraste de la potencia eléctrica con la temperatura para valores de corriente constante (Fig. 9) se observa un comportamiento bastante uniforme en las curvas, adicionalmente se aprecia un sutil decremento de la pendiente en las curvas con el aumento de la temperatura a medida que se incrementa la corriente. En contraste, para corrientes bajas la potencia se mantiene prácticamente constante con el incremento de la temperatura.

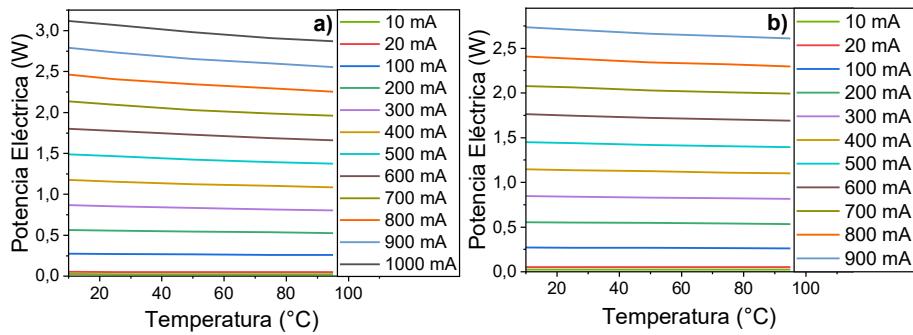


Figura 9. Relación entre la potencia eléctrica y la temperatura de operación a diferentes corrientes en polarización directa (a) LED A: CREE XP-L U6 de 3000K, (b) LED B: CREE XP-G3 R5 de 6000K.

### 3.2 Análisis fotométrico de los LEDs

El uso del DE en conjunto con la esfera integradora nos permitió el poder determinar las características lumínicas de los LEDs y ver como estas cambian bajo diferentes condiciones de temperaturita de operación, llegando a observar la estrecha relación que hay entre ellas.

El flujo luminoso expresado en lumen (lm) presenta una disminución de su magnitud con el incremento de la temperatura acentuándose esta característica para condiciones de altas corrientes, pero siendo casi despreciable para corrientes bajas. Se observa también que el flujo luminoso es bastante lineal respecto a la temperatura, así como se observa en la Fig. 10, adicionalmente a ello se puede ver que el LED B (Fig. 10b) presenta mayor flujo luminoso que el LED A (Fig. 10a) bajo las mismas condiciones de temperatura y corriente.

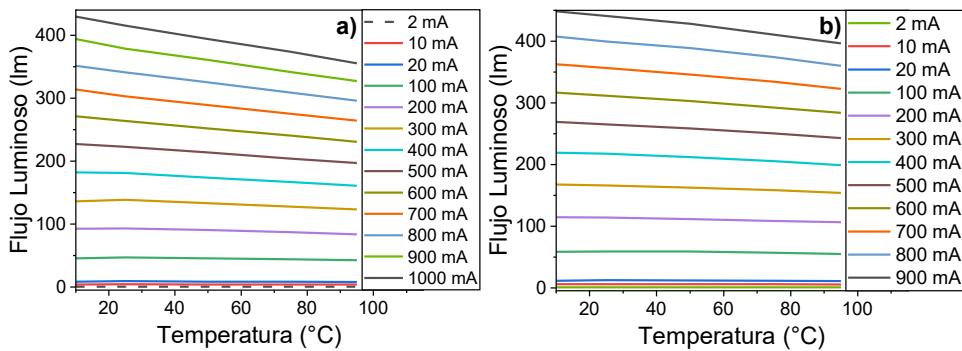


Figura 10. Relación entre el flujo luminoso y la temperatura de operación a diferentes corrientes en polarización directa (a) LED A: CREE XP-L U6 de 3000K, (b) LED B: CREE XP-G3 R5 de 6000K.

Por otro lado, la eficacia luminosa del LED, que es el flujo luminoso entre la potencia eléctrica consumida, expresada en lumen por vatio (lm/W), fue analizada en relación con la corriente que circula a través de los LEDs bajo condiciones de temperatura constantes. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la Fig. 11. Se puede observar que la eficacia aumenta de manera muy abrupta para corrientes muy bajas, llegando aproximadamente a los 180 lm/W para el caso del LED A (Fig. 11a) y aproximadamente a los 260 lm/W para el caso del LED B (Fig. 11b), inmediatamente se produce un descenso bastante lineal de esta magnitud, llegando a un intervalo de entre 125 lm/W a 150 lm/W para una corriente de 1 A para el LED A. Por parte del LED B también se produce un descenso de la eficacia hasta llegar a un intervalo aproximado de 160 lm/W a 175 lm/W para una corriente de 0,9 A.

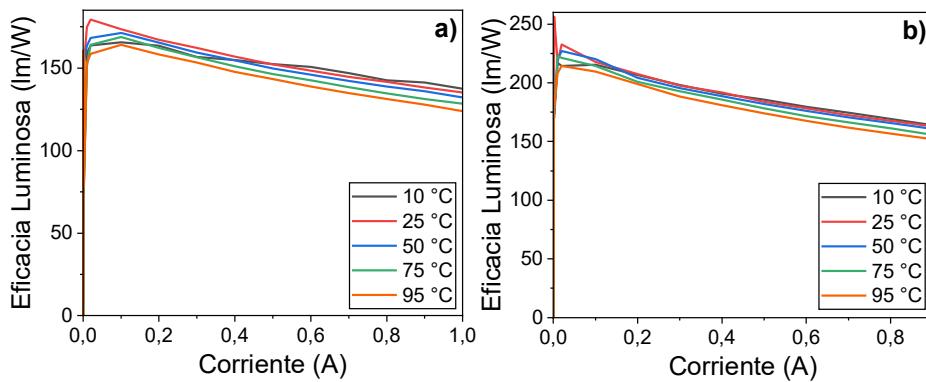


Figura 11. Relación entre la eficacia luminosa y la corriente en polarización directa a diferentes temperaturas de operación (a) LED A: CREE XP-L U6 de 3000K, (b) LED B: CREE XP-G3 R5 de 6000K.

Luego, al hacer el análisis de la eficacia luminosa respecto a la variación de la temperatura para corrientes constantes (Fig. 12) se puede observar un desplazamiento ascendente de las curvas para el aumento de las corrientes pequeñas (2 mA, 10 mA y 20 mA), y a partir de los 100 mA de corriente se ve que el desplazamiento de las curvas es descendente.

En el LED A (Fig. 12a) se observa que la pendiente de la curva correspondiente a los 2 mA es netamente positiva, luego para las curvas pertenecientes a 10 mA y 20 mA hay un aumento de la eficacia desde los 160 lm/W hasta los 180 lm/W, llegando a este punto a una temperatura de 25 °C, a continuación, se observa una caída de la eficacia entre los 150 lm/W a 160 lm/W, de igual manera se observa un comportamiento similar para las curvas correspondientes a los 100 mA, 200 mA, 300 mA y 400 mA siendo los 25 °C el punto de inflexión entre el aumento y descenso de la eficacia luminosa, mientras que para las demás curvas comprendidas entre los 500 mA hasta los 1000 mA se ve netamente un descenso de la eficacia.

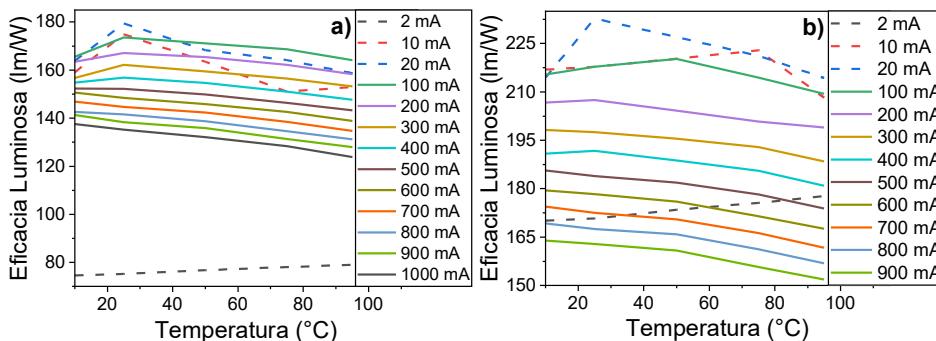


Figura 12. Relación entre la eficacia luminosa y la temperatura de operación a diferentes corrientes en polarización directa (a) LED A: CREE XP-L U6 de 3000K, (b) LED B: CREE XP-G3 R5 de 6000K.

En el LED B (Fig. 12b) se observa una notable diferencia respecto al LED A que consiste en que la variación de la eficacia luminosa en el LED B para la corriente de 2 mA se da desde los 170 lm/W hasta los 180 lm/W, mientras que en el LED A la variación se da solo desde los 75 lm/W hasta los 80 lm/W, notándose un evidente alejamiento de la curva de 2 mA respecto de las demás. Otro punto a notar es que la eficacia luminosa del LED B es superior al del LED A bajo las mismas condiciones de temperatura y corriente.

### 3.3 Análisis espectrométrico de los LEDs

Al hacer uso del espectrofotómetro junto con el DE y por medio del software Ocean View se obtienen los espectros de los LEDs. Sin embargo, las intensidades que estas muestran no están en unidades absolutas. Con la finalidad de poder convertirlas a unidades absolutas se hace uso de la esfera integradora, cuyas mediciones muestran a estas intensidades como flujo radiante por cada nanómetro dentro del espectro entre los 350 nm y 850 nm en unidades de W/nm.

Para el fin descrito se procedió a realizar un ajuste y una calibración de los espectros procedentes del análisis espectrofotométrico de los LEDs A y B tomando como patrones a los espectros de los mismos LEDs obtenidos con la esfera integradora, dando como resultado a los espectros mostrados en la Fig. 13. Las condiciones bajo las cuales estos datos han sido recolectados fue a una temperatura de 25 °C y 100 mA de corriente eléctrica en polarización directa.

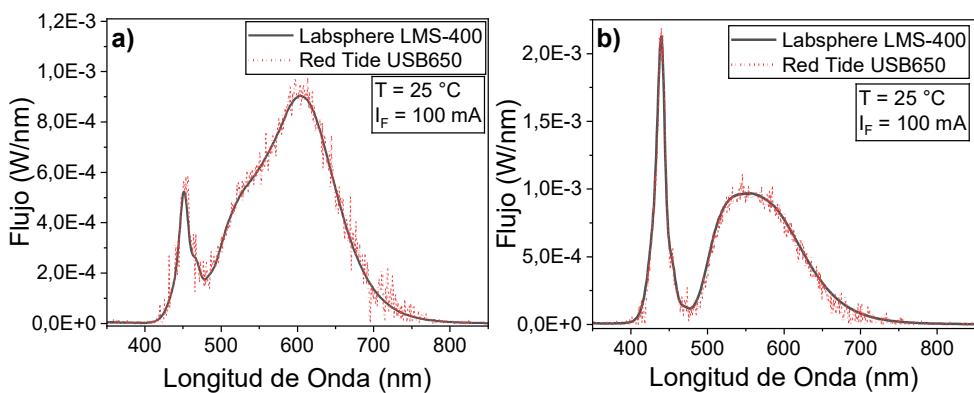


Figura 13. Espectros ajustados y calibrados desde los 350 nm hasta los 850 nm bajo condiciones de temperatura y corrientes constantes (a) LED A: CREE XP-L U6 de 3000K, (b) LED B: CREE XP-G3 R5 de 6000K.

### 34 Análisis morfológico y elemental de los LEDs

**Análisis morfológico.** Básicamente se disponen de dos tipos de muestras, aquellas que tienen el fósforo fluorescente de los cuales se quiere conocer a más profundidad la composición de esta sustancia (LEDs 1, 2 y 3) y, por otro lado, se tienen a aquellas muestras que fueron despojadas del fósforo fluorescente dado que el semiconductor se encuentra expuesto (LEDs 4, 5 y 6). Para conocer la morfología de estos tipos de muestra se tomó imágenes de las mismas a tres niveles de acercamiento: a simple vista, por medio de un microscopio digital y por medio de un microscopio electrónico de barrido (SEM).

En la Fig. 14 se muestra a un LED con fósforo fluorescente a tres niveles de acercamiento. En el primer nivel (Fig. 14a) se ve al LED que fue retirado de su cúpula plástica protectora y de su lente a base de gel, mientras que en el segundo nivel (Fig. 14b) se puede observar que este disco amarillento que se vio en el primer nivel de acercamiento en realidad es un coloide formado por una especie de gel dentro del cual se encuentran suspendidas pequeñas partículas de tono amarillento, las cuales vendrían a ser la sustancia fluorescente. Por último, en el tercer nivel (Fig. 14c) se observan zonas lisas y otras accidentadas debido probablemente al proceso mecánico de extracción del lente cobertor, aquí no es posible notar a las partículas en suspensión.

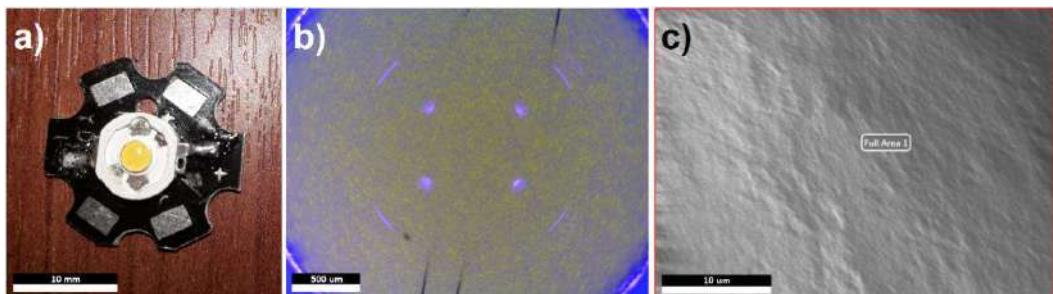


Figura 14. Apreciación del fósforo fluorescente de un LED blanco (a) Imagen ordinaria (b) Imagen proporcionada por un microscopio digital (c) Imagen proporcionada por el SEM del CIMAV.

Para el caso de los LEDs que quedaron únicamente con el semiconductor también se obtuvieron imágenes a los mismos tres niveles de acercamiento. En el primer nivel (Fig. 15a) se observa a un LED despojado de cualquier tipo de sustancia por encima del semiconductor, mientras que en el segundo nivel (Fig. 15b) se observa al semiconductor junto con una serie de surcos que vendrían a ser parte de los hilos conductores que en conjunto forman una pequeña tarjeta rectangular. Finalmente, en el tercer nivel (Fig. 15c) se puede ver parte del semiconductor junto a una barra de conductora, como era de esperarse se pueden ver muchas imperfecciones en la superficie debido al proceso mecánico de extracción de las sustancias depositadas sobre el semiconductor.

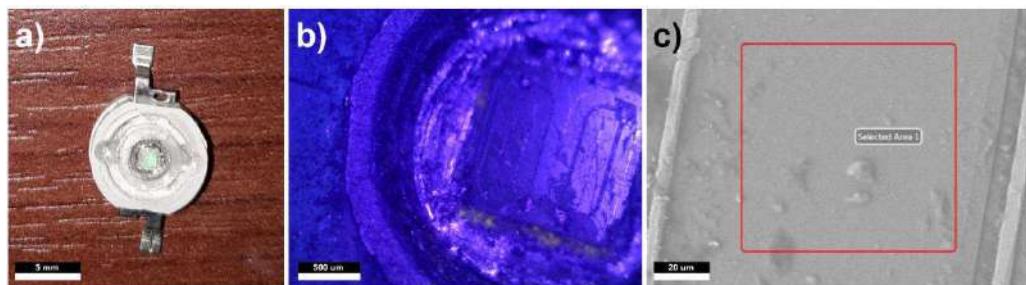


Figura 15. Apreciación del semiconductor de un LED blanco (a) Imagen ordinaria (b) Imagen proporcionada por un microscopio digital (c) Imagen proporcionada por el SEM del CIMAV.

**Análisis elemental.** Este proceso se realizó por medio de un análisis EDS (Energy Dispersive Spectroscopy). Los resultados obtenidos muestran una serie de elementos químicos presentes tanto en el fósforo fluorescente, así como en el semiconductor.

En la Fig. 16a se muestra el resultado del análisis EDS para el LED 1 en el que se han encontrado C, O, Si y Zn en porcentajes en masa de 54,50 %, 39,50 %, 5,98 % y 0,02 % respectivamente. Mientras que en la Fig. 16b se muestra el resultado del análisis EDS para el LED 4, para este caso se encontró O, Ga, Zn e In en los porcentajes en masa de 26,96 %, 36,72 %, 18,12 % y 18,10 % respectivamente.

Tanto esta información como la correspondiente a los otros LEDs analizados se encuentra en la Tab. 1.

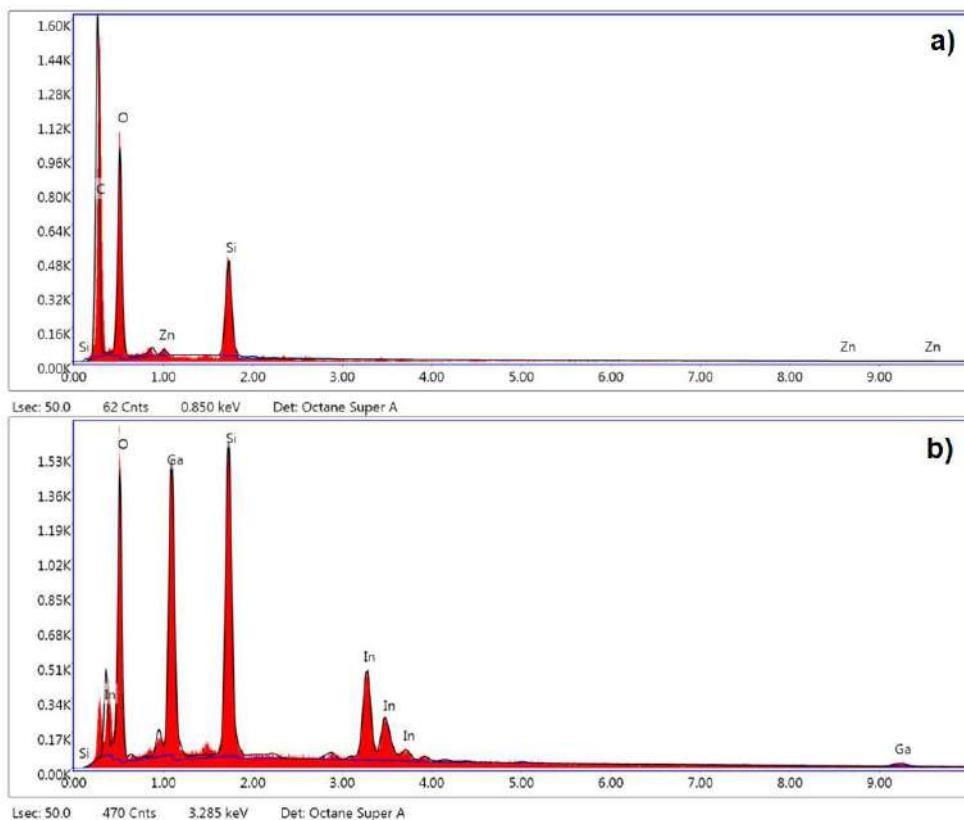


Figura 16. Elementos químicos encontrados luego del análisis EDS (a) LED 1(b) LED 4.

Tabla 1. Porcentajes en masa de los elementos químicos encontrados en los seis LEDs sin marca.

ELEMENTO QUÍMICO	PORCENTAJE EN MASA (%)					
	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4	LED 5	LED 6
C	54,50	50,56	45,60	---	---	43,28
O	39,50	42,68	19,60	26,96	22,58	29,86
Al	---	---	10,60	---	---	1,06
Si	5,98	6,77	21,90	18,12	7,28	25,80
Ca	---	---	0,20	---	---	---
Ti	---	---	0,20	---	---	---
Ni	---	---	1,50	---	---	---
Zn	0,02	---	---	---	---	---
Ga	---	---	---	36,72	52,65	---
Ag	---	---	0,30	---	---	---
In	---	---	---	18,20	17,55	---

#### 4. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis fotométrico, el flujo luminoso va en aumento con la corriente para una temperatura constante, sin embargo, la eficacia luminosa bajo la misma condición de temperatura constante solo aumenta en caso de aplicarse bajas corrientes ya que a partir de los 100 mA hasta los 900 mA o 1000 mA este parámetro disminuye de manera particular con una variación de 50 lm/W o 70 lm/W, dependiendo de cada LED.

En base a lo realizado en este trabajo de investigación, lo más recomendable para la calibración de un espectrofotómetro utilizando un LED de alta potencia y una esfera integradora como instrumento patrón es realizar las mediciones con el instrumento bajo calibración (IBC) a temperatura ambiente (25 °C) y al LED energizado con una corriente baja de aproximadamente 100 mA, a fin de evitar el autocalentamiento del LED y el corrimiento al rojo del espectro, estableciendo así las condiciones adecuadas de los flujos radiométricos medidos por la esfera integradora como mesurandos (CEM, 2008).

Según el análisis elemental del fósforo fluorescente existe la posibilidad que la sustancia de la que esté hecho este material pertenezca a la categoría de los ortosilicatos alcalinotérreos activados por iones de Eu y Ce (Tran Q. K. et al., 2015) debido a la presencia recurrente de Si y O ya que la estructura básica de estos compuestos presenta una estructura similar a  $(\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba})_2\text{SiO}_4:(\text{Eu}^{2+}, \text{Ce}^{3+})$ . Puede que haya una baja concentración de iones  $\text{Eu}^{2+}$  o  $\text{Ce}^{3+}$  por lo que no pudieron ser detectados durante el análisis. Respecto al análisis elemental de los semiconductores al haberse encontrado de forma recurrente In, Ga y un poco de Al, puede este material esté compuesto por InGaN, presente en los pozos cuánticos, AlGaN y GaN como semiconductores tipo p y tipo n, finalmente, como sustrato al SiC (Nicola R. et al., 2022).

#### Agradecimientos

Al profesor Francisco Paraguay Delgado, por su apoyo con el análisis de muestras por medio del SEM del CIMAV en Chihuahua – México ya que la información recibida por su persona fue clave para la realización de este trabajo.

A los profesores Clemente Luyo Caycho y Robert Paria Sena, por su apoyo complementario en el análisis morfológico y elemental de muestras por medio del SEM de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

#### REFERENCIAS

- Ajinkya Shrish Kamat, Radhika Khosla & Venkatesh Narayananamurti, 2020, Illuminating homes with LEDs in India: Rapid market creation towards low-carbon technology transition in a developing country, Energy Research & Social Science, V. 66.
- Bairong He, Han Nie, Long Chen, Xiaoding Lou, Rongrong Hu, Anjun Qin, Zujin Zhao, & Ben Zhong Tang, 2015, High Fluorescence Efficiencies and Large Stokes Shifts of Folded Fluorophores Consisting of a Pair of Alkenyl-Tethered,  $\pi$ -Stacked Oligo-p-phenylenes, Organic Letters, V. 17, Issue 24, pp. 6174-6177.
- Centro Español de Metrología (CEM), 2008, Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM), pp. 51-52.
- Nicola Roccato, Francesco Piva, Carlo De Santi, Matteo Buffolo, Camille Haller, Jean-François Carlin, Nicolas Grandjean, Marco Vallone, Alberto Tibaldi, Francesco Bertazzi, Michele Goano, Giovanni Verzellesi, Gaudenzio Meneghesso, Enrico Zanoni & Matteo Meneghini, 2022, Modeling the electrical characteristic of InGaN/GaN blue-violet LED structure under electrical stress, Microelectronics Reliability.
- Pradeep Kumar Badapalli, Raghu Babu Kottala, M.Rajasekhar, M.Ramachandra & C.Krupavathi, 2022, Modeling of comparative studies on surface micro morphology of Aeolian, River, Lake, and Beach sand samples using SEM and EDS/EDAX, V. 50, Part 5, pp. 655-660.
- Salazar R, J & Horn M, M, 2017, Caracterización de dispositivos Peltier y lámparas LED en función de la temperatura,

XXIV Simposio de Energía Solar y del Ambiente (XXIV-SPES), Huaraz.  
Se Joon Oh & Jaehee Cho, 2017, Junction temperature rise due to self-heating effects in GaInN blue light-emitting diodes, Thin Solid Films, V. 641, pp. 8-11.  
Tran Quoc Khanh, Peter Bodrogi, Quang Trinh Vinh & Holger Winkler, 2015, LED Lighting, Wiley-VCH, pp. 72-89.

## **ADVANCES IN THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE OF A WHITE LED ON ITS LIGHT CHARACTERISTICS**

**Abstract.** This research work explores a series of methods to determine the influence of temperature on the light characteristics of LEDs, adding a microcontroller to achieve intermittent energization of the LEDs in order to avoid self-heating, with the operating temperatures corresponding to the range 10°C to 95°C. On the other hand, the adjustment and calibration of the spectra provided by the spectrophotometer used has been carried out, taking spectra expressed in absolute units as measurement standards. Finally, morphological and elemental analyzes of high-power white LEDs were carried out, finding C, O, Si, among other elements with their respective mass percentages.

**Keywords:** Photometry, Spectrophotometry, White LED, Temperature variation, SEM.

**Anexo 6: Segunda publicación - Journal of Physics: Conference Series, 2023**

***Influence of the temperature of a white LED on its lighting characteristics***

PAPER • OPEN ACCESS

## Influence of the temperature of a white LED on its lighting characteristics

To cite this article: M R Quispe *et al* 2023 *J. Phys.: Conf. Ser.* **2538** 012009

View the [article online](#) for updates and enhancements.

### You may also like

- [High quality nitride semiconductors grown on novel ScAlMoO<sub>4</sub> substrates and their light emitting diodes](#)  
Akio Ueta, Hiroshi Ohno, Naoto Yanagita et al.

- [III–V Light-Emitting Diodes on Silicon by Hydrogel-Mediated Wafer Bonding](#)  
Kosuke Nishigaya and Katsuaki Tanabe

- [Analysis of stress-induced inhomogeneous electroluminescence in GaN-based green LEDs grown on mesh-patterned Si \(111\) substrates with n-type AlGaN layer](#)  
Quan-Jiang Lv, , Yi-Hong Zhang et al.

## Influence of the temperature of a white LED on its lighting characteristics

**M R Quispe<sup>1</sup>, F M A Oscco<sup>2</sup>, M J Horn<sup>1</sup> and M M Gómez<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, Peru

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica del Perú, Calle Natalio Sánchez N° 125, Urb. Santa Beatriz Lima 01, Peru

Email: milner.quispe.m@uni.pe

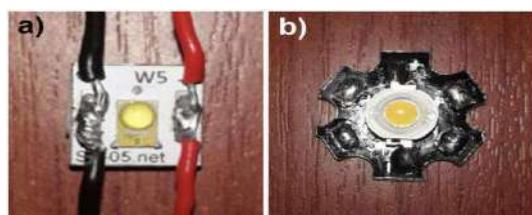
**Abstract.** The influence of the temperature of two white LEDs, a good brand and one of unknown brand, on their characteristic curves and their light properties was experimentally evaluated in the range from 10 °C to 95 °C. The measurements show that the luminous efficacy decreases with increasing temperature, specially of the LED of unknown brand. In addition, a small redshift could be observed of the blue peak of their respective spectra, as well as changes in their correlated color temperatures (CCT).

### 1. Introduction

Today, LED lighting (Light Emitting Diode) has positioned itself in the market well above other electric lighting technologies, to cite as an example the case of India where in the last decade the marketing of LED lamps is dominating over other lighting technologies [1], mainly due to its high luminous efficacy and long lifetime. Of course, this does not imply that the operation of the LEDs is perfect, since there are also energy losses in the form of heat that directly results in an increase in the operating temperature of the diode, influencing its lifetime [2], its efficacy and the color of its light [3]. The increase of the temperature of the PN junction occurs as a consequence of the electric current that circulates through the diode, contributing to the Joule effect that is generated in the internal resistance of the LED, as well as the appearance of non-radiative recombinations in the PN junction of the semiconductor [4].

### 2. Methodology

In the present work, the effect of temperature on two white LEDs was studied: a Luxeon SP-05-W5 LED (Figure 1a), with a nominal CCT of 5650 K, and a 3W warm white LED, unbranded, which has been labeled as LED 1 (Figure 1b).



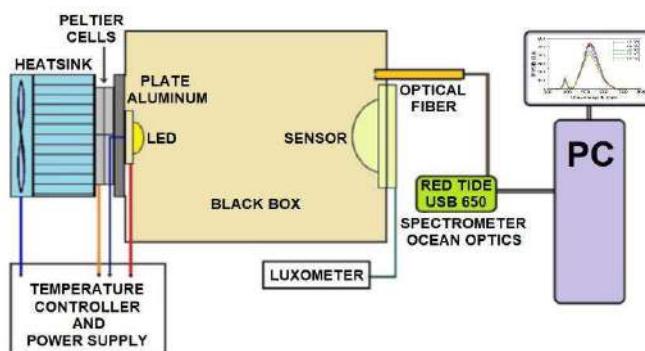
**Figure 1.** (a) Luxeon SP-05-W5 LED (b) LED 1.



Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](#). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

### 2.1. Black Box

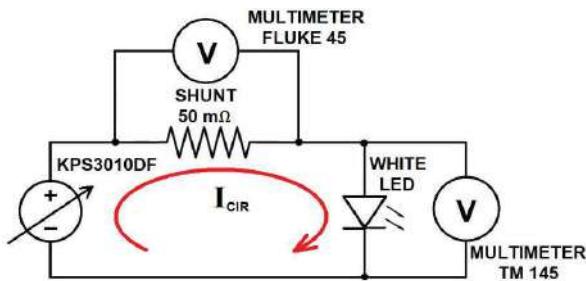
In order to study the luminous properties of a LED as a function of temperature, a device designed and built in the Photometry Laboratory of the Faculty of Sciences of the National University of Engineering was used (Figure 2), supplemented with measurements of luminous flux and luminous efficacy with an integrating sphere. The device has the form of a box, whose inner walls are black in order to avoid light reflection. The dimensions of the inner parallelepiped of the box are 15 cm x 15 cm x 30 cm. A cooling-heating system is embedded on one of the lids of the box, which consists of an aluminum plate that is attached to an arrangement of four Peltier cells with a heatsink, provided with a cooler. The junctions between each of these elements are provided with thermal paste to improve the thermal conductivity between the parts, as well as between the LED and the inner side of the aluminum plate where a thermocouple is included, with which the operating temperature of the LED is monitored.



**Figure 2.** Basic structure of the black box and its components.

The other lid, which is located at the opposite end to the LED, contains the sensor of a luxmeter (Gossen brand), as well as the optical fiber input of a spectrometer (Ocean Optics brand, model Red Tide USB650). This last instrument is controlled by the Ocean View software.

**2.1.1. LED electrical circuit.** To energize the LED, an electric circuit (Figure 3) was assembled, including the instruments to measure the voltages at the LED and at the shunt resistance ( $50 \text{ m}\Omega$ ). The power supply used was a Wamptek KPS3010DF adjustable current and voltage source, and the voltage at the LED was measured with a TM-145 multimeter and the voltage at the shunt with a FLUKE 45 multimeter.



**Figure 3.** Power supply circuit and measurement of the voltages at the white LED and at the shunt resistor.

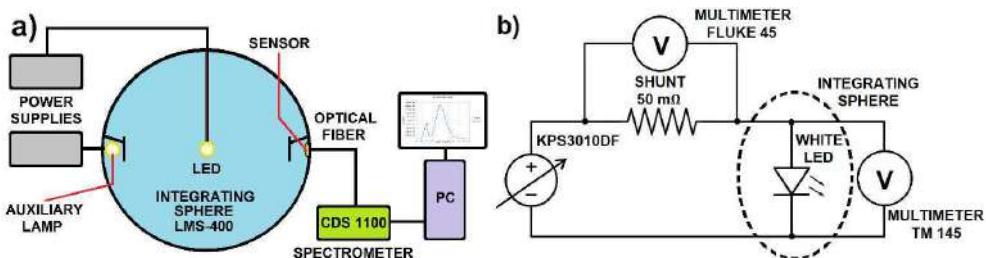
### 2.2. Working mode with the black box

The temperature of the aluminum plate, to which the LED is attached, was controlled by means of a digital Autonics TC4 thermal regulator. Once the thermal stability of the LED was reached, the voltage

for the diode was regulated, the next step was to record the readings of the voltage drops in both multimeters, as well as the readings of the luxmeter and the spectral data captured with the Ocean Optics spectrometer and software.

### 2.3. Working mode with the integrating sphere

In order to obtain absolute spectrometric data, color temperature and total luminous flux of each LED at room temperature, a Labsphere LMS-400 integrating sphere of one meter in diameter was used, while a CDS 1100 spectrometer was controlled by means of the Light MtrX Application software.



**Figure 4.** Integrating sphere (a) General diagram (b) Power supply and voltage measurement circuit at the white LED and at the shunt resistor.

The mode of operation consisted of mounting the LED inside the sphere connecting the terminals of the diode with the internal terminals of the sphere by means of cables long enough in such a way that the LED is located in the geometric center of the sphere (Figure 4a). Then the connections were made between the adjustable source, the bench multimeter, the shunt resistor and the external terminals of the integrating sphere, resulting in a circuit similar to the one used in the electrical system of the black box (Figure 4b), thereby energizing the diode and controlling the current flowing through the LED. On the other hand, the auxiliary lamp of the sphere was connected to a constant current source and the optical fiber coming from the sensor of the sphere was connected to a CDS 1100 spectrometer (Figure 4a).

At an ambient temperature of 25 °C and having made all the optical and electrical connections, the integrating sphere was characterized together with the entire cable system and physical support of the LED with the help of the auxiliary lamp and the Light MtrX software. Then the auxiliary lamp was turned off and the electronic circuit of the diode (Figure 4b) was put into operation together with the spectrometer. Through the software, the data of the aforementioned parameters was captured for the current levels of 75 mA (Luxeon LED) and 100 mA (LED 1). It should be noted that the integrating sphere had been calibrated previously with certified lamps.

## 3. Results and discussions

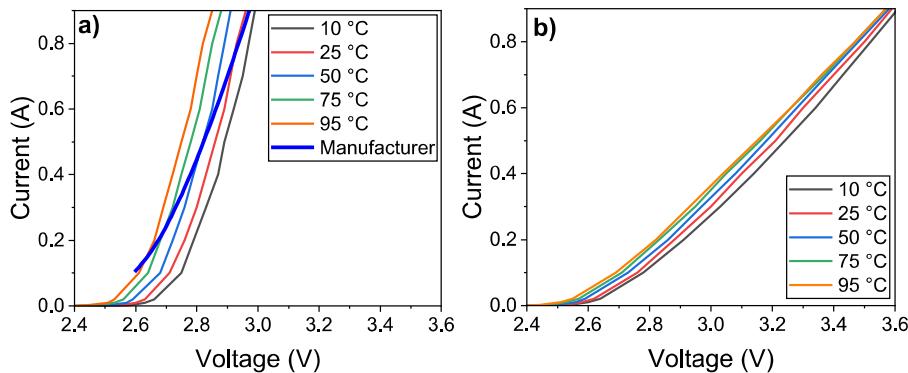
### 3.1. Characteristic curves of LEDs

The measured characteristic curves of the LEDs, that is the relationship between the voltage and the current of the LEDs, correspond to the equation (1) of the characteristic curve of a rectifier diode [5].

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV_j}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$I_0$  is the saturation current,  $V_j$  is the PN junction voltage and  $n$  is the ideal diode factor [5]. As an initial analysis, these curves were obtained experimentally for the Luxeon LED (Figure 5a) and LED1 with the setup of the black box (Figure 5b), at different temperatures of the LED between 10 °C and 95°C, observing that, as the operating temperature of the LEDs increased, the curves retracted.

Also included in figure 5a is the characteristic curve of the LED Luxeon SP-05-W5 at 25 °C from the manufacturer's manual (<https://www.luxeonstar.com/assets/downloads/ds61.pdf>), differing from our measured curve at 25 °C, but coinciding at 2.9 V, the typical operating voltage of the LED, according to the manufacturer.

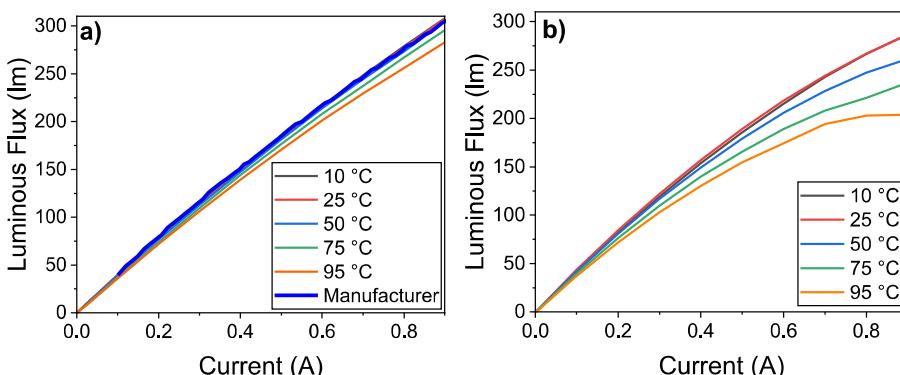


**Figure 5.** Experimental characteristic curves at different operating temperatures (a) Luxeon LED SP-05-W5 (b) LED 1.

As can be seen the characteristic curves of LED 1 (Figure 5b) show a similar behavior as the Luxeon LED, but depend less of the operating temperature.

### 3.2. Photometric results

At constant temperature, the luminous flux of the Luxeon LED has an almost linear relationship with the electric current (Figures 6a) and as the temperature increases, the slopes of the graphs decrease. The curve at 25 °C coincides with the curve deduced from the data provided by the manufacturer.

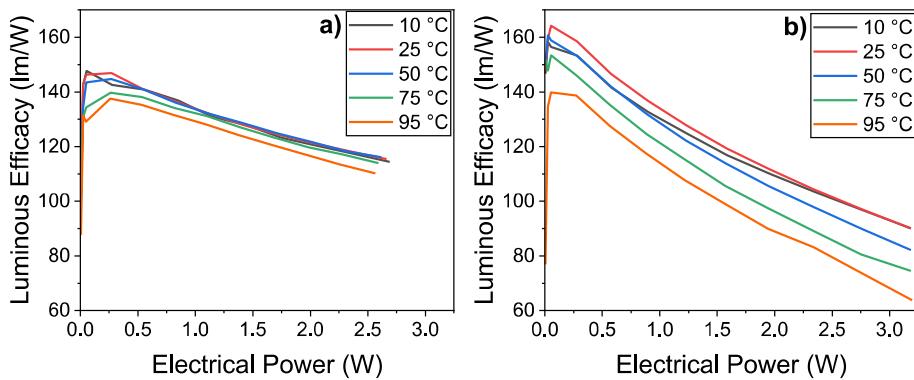


**Figure 6.** Relationship between Luminous Flux and Current at different operating temperatures (a) Luxeon LED SP-05-W5 (b) LED 1.

In the case of LED 1, the way in which current and luminous flux are related is linear till 0.2 A (Figures 6b), but as the current increases further to values greater than 0.2 A, a decrease in the slopes of the curves is observed, so linearity is lost. This characteristic is more accentuated for the 95 °C curve.

Figure 7 shows the luminous efficacy as a function of the electrical power. The Luxeon LED curves (Figure 7a) show the accelerated increase in luminous efficacy from 95 lm/W to 136 lm/W or 147 lm/W for a power range of 0 W to 0.05 W, depending on the temperature of the LED. Then there is a slowdown

in the rate of change of luminous efficacy, in some cases increasing and in others decreasing between 0.05 W and 0.28 W. Then, for power values from 0.28 W to 2.7 W the luminous efficiency decreases notably in an almost linear fashion until reaching values between 110 lm/W and 116 lm/W for different temperatures, being noteworthy that at higher temperatures the luminous efficacy is lower.

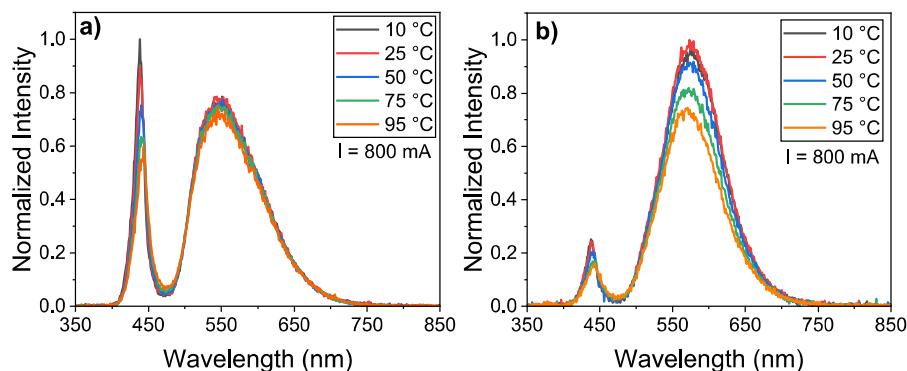


**Figure 7.** Relationship between Luminous Efficacy and Electrical Power at different operating temperatures (a) Luxeon LED SP-05-W5 (b) LED 1.

In the case of LED 1 (Figure 7b) an increase in luminous efficacy is also observed from 86 lm/W to 140 lm/W or 164 lm/W, for the range from 0 W to 0.05 W depending on the temperature, then there is a slowdown in the rate of change of luminous efficacy between 0.05 W and 0.4 W. From there, a decrease in luminous efficacy can be observed almost linearly for each of the curves at different operating temperatures of LED 1, but with quite lower efficacies as the Luxeon LED, specially at higher temperatures.

### 3.3. Spectrometric results

By making use of the black box in conjunction with the Ocean spectrometer Optics, the spectrometric curves are obtained at a constant current and at different operating temperatures for the Luxeon LED and LED 1 (Figure 8). It can be observed how the intensities in the spectrum decrease with the increase in temperature. On the other hand, it is seen how the peak of the blues, between 440 nm and 450 nm, moves towards longer wavelengths, that is, a red-shift is observed with the increase in temperature [6].



**Figure 8.** Spectra at different operating temperatures, from 350nm to 850nm. (a) spectra of Luxeon LED SP-05-W5 (b) spectra of LED 1.

Using the OSRAM Color Calculator, it was possible to determine the correlated color temperatures (CCT) of the LEDs analyzed in this work: With increasing temperature from 10°C to 95 °C, the CCT of the Luxeon LED shows a small decrease of about 97 K, while the CCT of LED 1 increases 240 K, from 3318 K to 3558 K.

#### 4. Conclusions

According to the results obtained regarding the characteristic curve of the white LEDs studied, it was possible to observe that under different temperature conditions and for the same amounts of current, the Luxeon LED uses less electrical voltage than the unbranded LED, which implies less electrical power consumed by the Luxeon LED. Additionally, the characteristic curve provided by the manufacturer at 25 °C does not fully coincide with the corresponding experimental curve at 25 °C. On the other hand, it can be observed how the luminous flux of the Luxeon LED is practically invariant under the different operating temperatures throughout the different currents applied, also seeing how the curve provided by the manufacturer fits almost perfectly with the experimental curve. On the contrary, the unbranded LED shows how the luminous flux is negatively affected by the increase of temperature together with the increase of current. Likewise, the moderate decrease in luminous efficacy of only about 30 lm/W can be seen when the electrical power increases for different temperature conditions, in contrast to the unbranded LED, which presents a decrease in its luminous efficacy of about 100 lm/W, which makes evident the poor performance of the latter under conditions of high temperatures and currents. Finally, a red shift occurs in the spectrum of both LEDs when the operating temperature increases for the same current conditions of 800 mA, but noting a decrease in the CCT of the Luxeon LED of only 97 K, which is visually practically imperceptible, while the unbranded LED experiences a decrease in its CCT of 240K, which hardly goes unnoticed.

#### References

- [1] Ajinkya SK, Radhika K and Venkatesh N 2020 Illuminating homes with LEDs in India: Rapid market creation towards low-carbon technology transition in a developing country *Energy Res. & Soc. Sci.* 101488.
- [2] Mesfin SI, Zhou J, Winco KY and Jiajie F 2021 Bayesian based lifetime prediction for high-power white LEDs *Espert Sys. with Apps.* 115627.
- [3] E Ozuturk 2021 A system and a method to measure the junction temperature of LEDs *Optik* 166655.
- [4] Anton A, Jean PL, Grigory O, Kumar A and Genevieve M 2020 Dynamic response-based LEDs health and temperature monitoring *Meas.* 107599.
- [5] Se JO and Jaehee C 2017 Junction temperature rise due to self-heating effects in GaInN blue light-emitting diodes *Thin Solid Films* **641** 8-11
- [6] Emin T, Ayhan Y, Cenk A and Kadir T 2020 Red-shift effect in multi-color LEDs based visible light communication *Optics Comms.* 125451.