

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FÍSICA



**MONTAJE DE UN ESPECTRÓMETRO CON
ESFERA INTEGRADORA PARA LA
CARACTERIZACIÓN FOTOMÉTRICA DE LEDS**

Tesis para optar el Título Profesional de
INGENIERO FÍSICO

Presentado por:

ROBERT DANIEL CHALA ESTRADA

Asesor:

Dr. Manfred Josef Horn Mutschler

Lima - Perú

2019

Agradecimiento

Agradezco a mi asesor de tesis, el Dr. Manfred Horn quien contribuyó en mí profesionalmente y gracias a su apoyo, conocimiento y críticas constructivas se logró la culminación del presente trabajo.

Al profesor, el Dr. Abel Gutarra quien aportó con ideas para mejorar el desarrollo del trabajo de investigación. Al Dr. José Díaz y la Dra. Carmen Eyzaguirre quienes, como docentes de la Facultad de Ciencias, generosamente brindaron ayuda e información en la parte óptica del montaje del equipo.

Al Mg. Fernando Oscco por todo el apoyo brindado en el Laboratorio de Fotometría de la UNI a lo largo del presente trabajo.

A mis compañeros Emmanuel Monteza y Alex Cancio con quienes compartí el Laboratorio de Fotometría y juntos formamos parte del proyecto Caracterización Fotométrica de Lámparas LED para Sistemas Pico-Fotovoltaicos, proyecto durante el cual se desarrolló el presente trabajo.

Resumen

En el Laboratorio de Fotometría de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería se ensambló un equipo para obtener el espectro radiométrico de pequeñas fuentes de iluminación LED comunes y de alta potencia. Este sistema de medición está formado por un espectrómetro USB650 y una esfera integradora de 75 mm de diámetro, ambos conectados mediante una fibra óptica. El software utilizado para la adquisición de datos fue el software OceanView 1.6.3 que es ofrecido por el fabricante del espectrómetro.

El presente trabajo se realizó en tres partes: el montaje del sistema de medición, la caracterización del sistema de medición y por último la evaluación fotométrica de LEDs. La primera parte del trabajo, el montaje del sistema de medición, consistió en separar la esfera integradora del medidor de flujo luminoso PCE-LED1, para luego diseñar y fabricar un adaptador y un soporte que conectara la fibra óptica QP-400-2-VIS-NIR a la esfera integradora, de tal manera que esta conexión se mantuviera fija y estable. Además, se implementó un procedimiento para la adquisición de datos y una hoja de cálculo para el procesamiento de datos y entrega de resultados.

La segunda parte del trabajo, la caracterización del sistema de medición, consistió en realizar una verificación y calibración de la escala de longitud de onda del espectrómetro utilizando lámparas de emisión de líneas espectrales (mercurio, sodio y cadmio). También se calibró la escala de intensidad utilizando una lámpara incandescente con un espectro radiométrico conocido (lámpara patrón con un certificado de calibración).

En la tercera y última parte del trabajo se evaluaron LEDs utilizando el sistema de medición montado y caracterizado. Los resultados obtenidos con este sistema se compararon con los resultados obtenidos con un equipo de referencia de la marca LabSphere, el cual consta de un espectrómetro, con una precisión en su escala de longitud de onda de ± 0.3 nm, y una esfera integradora de 1 metro de diámetro.

Por último, se realizó el cálculo de la incertidumbre en cada uno de los resultados obtenidos, para un nivel de confianza aproximado del 95% (factor de cobertura $k=2$). Parte del trabajo consistió en implementar una hoja de cálculo que procese los datos obtenidos con el software OceanView 1.6.3 y emita un informe de los resultados obtenidos.

Índice

Agradecimiento	I
Resumen	II
Índice	III
Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas	IX
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	3
Capítulo 2. Fundamento Teórico.....	4
2.1. Radiometría y Fotometría.....	4
2.1.1. Eficiencia Luminosa Espectral V(L)	4
2.1.2. Flujo Radiante y Flujo Luminoso	6
2.1.3. Unidades Fotométricas	7
2.2. Colorimetría	7
2.2.1. Sistema de Especificación de Color RGB	8
2.2.2. Sistema de Especificación de Color XYZ	10
2.2.3. Diagramas de Cromaticidad Uniforme.....	11
2.2.4. Descriptores de Cromaticidad.....	14
2.3. Diodos Emisores de Luz (LED)	16
2.3.1. Eficacia de la Iluminación LED	17
2.3.2. Propiedades Ópticas.....	19
2.3.3. Características Eléctricas	20
2.3.4. Características Térmicas	21
2.4. Espectrómetros	22
2.4.1. Estructura del espectrómetro	22
2.4.2. Características de un espectrómetro	24
2.4.3. Software de evaluación.....	26
2.4.4. Espectrómetro USB650 Red Tide	28
2.5. Método de la Esfera Integradora	29
2.5.1. Medición de LEDs.....	30
2.5.2. Medición de LEDs de alta potencia.....	31

2.5.3.	Cantidades Relacionadas a la Distribución Espectral.....	31
Capítulo 3.	Procedimiento Experimental	34
3.1.	Montaje del sistema de medición	34
3.1.1.	Diseño del adaptador de fibra óptica y el soporte de la esfera PCE-LED 1 35	
3.1.2.	Configuración de la medición.....	37
3.1.3.	Implementación de una Hoja de Cálculo para el procesamiento de datos	38
3.2.	Medición del ruido de oscuridad en el nuevo sistema.....	38
3.3.	Calibración de la escala de longitud de onda	40
3.3.1.	Procedimiento para la calibración de la escala de longitud de onda	40
3.3.2.	Adquisición y tratamiento de datos	41
3.4.	Calibración de la escala de intensidad.....	42
3.4.1.	Procedimiento para la calibración de la escala de intensidad.....	43
3.4.2.	Adquisición y tratamiento de datos	44
3.5.	Evaluación de un LED blanco de alta potencia.....	44
3.5.1.	Evaluación en el equipo LabSphere usando el método 4π	46
3.5.2.	Evaluación en el equipo LabSphere usando el método 2π	47
3.5.3.	Evaluación en el nuevo sistema de medición	48
3.6.	Evaluación de un LED verde de alta potencia	49
Capítulo 4.	Resultados.....	50
4.1.	Nuevo Sistema de Medición	50
4.2.	Ruido de oscuridad obtenido.....	51
4.3.	Resultados de la calibración de la escala de longitud de onda.....	52
4.4.	Resultados de la calibración de la intensidad.....	55
4.5.	Resultados de la evaluación de un LED blanco de alta potencia	58
4.5.1.	Resultados obtenidos en el equipo LabSphere empleando el método de medición 4π	58
4.5.2.	Resultados obtenidos en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π	59
4.5.3.	Resultados obtenidos en el nuevo sistema de medición	60
4.6.	Resultados de la evaluación de un LED verde de alta potencia.....	61
4.6.1.	Resultados obtenidos empleando el equipo LabSphere.....	62
4.6.2.	Resultados obtenidos empleando el nuevo sistema de medición	63
Capítulo 5.	Discusiones.....	64
5.1.	Cálculo del Ruido de Oscuridad Promedio	64

5.2.	Calibración de la escala de longitud de onda	65
5.3.	Calibración de la escala de intensidad.....	69
5.3.1.	Incertidumbre de medición en la calibración de la escala de intensidad ..	69
5.4.	Evaluación de un LED blanco de alta potencia.....	73
5.5.	Evaluación de un LED verde de alta potencia	75
5.6.	Análisis del flujo luminoso y la temperatura del LED	75
Capítulo 6.	Conclusiones.....	77
Bibliografía.....		78
Anexo A	Características de la Fibra Óptica QP400-2-VIS-NIR	80
Anexo B	Certificado de Calibración de la Lámpara SCL-050	81
Anexo C	Nuevo sistema de medición.....	82
Anexo D	Algunos espectros radiométricos obtenidos con el nuevo sistema de medición	

Índice de Figuras

Figura 1: CMFs $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ y $b(\lambda)$ del sistema de color RGB CIE 1931 [16].	8
Figura 2: Diagrama de cromaticidad para el sistema de especificación de color RGB de acuerdo a la CIE 1931 [16].	9
Figura 3: CMFs $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ y $z(\lambda)$ en el sistema de color XYZ CIE 1931 [16].	10
Figura 4: Diagrama de cromaticidad del sistema de color XYZ CIE 1931 [17].	11
Figura 5: Elipses de MacAdam en el diagrama de cromaticidad xy [17].	12
Figura 6: Elipses de MacAdam en el diagrama de cromaticidad uv [16].	13
Figura 7: Elipses de MacAdam en el diagrama de cromaticidad u'v' [16].	13
Figura 8: Longitud de onda dominante y pureza de excitación.	15
Figura 9: Curva de Planck y líneas de isotemperatura en el diagrama de cromaticidad uv [16].	15
Figura 10: Principio de funcionamiento de un LED [18].	16
Figura 11: Diagrama esquemático de (a) un LED convencional y (b) un LED de alta potencia [2].	18
Figura 12: Distribuciones espaciales de intensidad luminosa típicas de diferentes LEDs [19].	19
Figura 13: Distribuciones de potencia espectral relativa de LEDs típicos [19].	20
Figura 14: Dependencia de las propiedades ópticas de un LED de alta potencia en función de su temperatura de juntura [21].	22
Figura 15: Estructura del sistema óptico de un espectrómetro típico [22].	23
Figura 16: Definición de ancho total a la mitad del máximo (FWHM) [22].	25
Figura 17: Efectos de la temperatura sobre la señal de salida de un espectrómetro [22].	26
Figura 18: Diagrama de conexión de un espectrómetro a la PC [22].	27
Figura 19: Recorrido de un haz de luz en el interior del espectrómetro USB650 Red Tide [25].	29
Figura 20: Geometría recomendadas para la medición del flujo luminoso total: (a) Para todo tipo de LEDs, (b) para LEDs que no tienen emisión hacia atrás [19].	30
Figura 21: Medición del flujo luminoso total de LEDs de alta potencia utilizando esferas de (a) un solo puerto y (b) de dos puertos [21].	31

Figura 22: Distribución espectral relativa típica de un LED con sus valores característicos [19].	32
Figura 23: (a) Equipo PCE-LED 1 en condiciones de operación normal y (b) esfera integradora separada del fotodetector y cableado eléctrico.	34
Figura 24: Diagrama esquemático de la esfera integradora PCE-LED 1 [27].....	35
Figura 25: Medidas y proyecciones ortogonales del adaptador de conexión para la fibra óptica.	36
Figura 26: Esquema de la nueva base y soporte de la esfera integradora PCE-LED 1 ..	36
Figura 27: Diagrama esquemático para la medición de LEDs.	37
Figura 28: Diagrama de flujo del algoritmo de procesamiento de datos.	39
Figura 29: Diagrama de medición para la calibración de la escala de longitud de onda.	40
Figura 30: Diagrama de medición para la calibración de la intensidad.....	43
Figura 31:Diagrama esquemático del LED de alta potencia evaluado.....	45
Figura 32: Tres posiciones de evaluación del LED de alta potencia en el método de medición 4π	47
Figura 33: Sistema de medición montado empleando la esfera integradora PCE-LED 1 y el espectrómetro USB650.....	50
Figura 34: Ruido de oscuridad obtenido en el sistema de medición montado en 10 distintas mediciones.	51
Figura 35: Espectro de líneas de emisión del Hg obtenido con el sistema montado y el software OceanView 1.6.3.....	52
Figura 36: Espectro de líneas de emisión del Cd obtenido con el sistema montado y el software OceanView 1.6.3.....	53
Figura 37: Espectro de líneas de emisión del Na obtenido con el sistema montado y el software OceanView 1.6.3.....	54
Figura 38: Espectro de intensidad relativa obtenido al evaluar la lámpara patrón IL3 con el sistema de medición montado.....	55
Figura 39: Ruido de oscuridad obtenido al evaluar la lámpara patrón IL3 en el sistema de medición montado.	56
Figura 40:Comparación de las curvas espectrales obtenidas con el equipo de referencia LabSphere, y el sistema de medición montado.	57
Figura 41: Sensibilidad normalizada a la unidad del espectrómetro USB650 en el nuevo sistema de medición.....	57

Figura 42: Espectro radiométrico de un LED blanco de alta potencia obtenido en el equipo LabSphere empleando el método de medición 4π	58
Figura 43: Espectro radiométrico de un LED blanco de alta potencia obtenido en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π	59
Figura 44: Espectro radiométrico del LED blanco de alta potencia obtenido con el nuevo sistema de medición.....	60
Figura 45: Espectro radiométrico de un LED verde de alta potencia obtenido en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π	62
Figura 46: Espectro radiométrico del LED verde de alta potencia obtenido con el nuevo sistema de medición.....	63
Figura 47: Gráfico de barras correspondiente al número de longitudes de onda en función al número de cuentas que realizaron.....	65
Figura 48: Error e incertidumbre en función de la longitud de onda obtenidos en el nuevo sistema de medición.....	68
Figura 49: Flujo luminoso en función de la temperatura del disipador para el caso de un LED verde de alta potencia medido con el equipo LabSphere.....	76
Figura 50: Atenuación espectral de la fibra óptica QP400-2-VIS-NIR [29].	80
Figura 51: Certificado de calibración de la lámpara patrón de trabajo SCL-050.	81
Figura 52: Nuevo sistema de medición, vista superior.....	82
Figura 53: Nuevo sistema de medición, vista frontal.	82
Figura 54: Espectros radiométricos relativos obtenidos de distintos LEDs de alta potencia evaluados en el nuevo sistema de medición.	83

Índice de Tablas

Tabla 1: Cantidades, unidades y símbolos usados en Radiometría y Fotometría [13].	4
Tabla 2: Comparación de eficacia luminosa y tiempo de vida entre productos LED y productos de iluminación convencional [3].....	18
Tabla 3: Especificaciones técnicas del espectrómetro USB650 Red Tide [25].....	29
Tabla 4: Características de la esfera integradora PCE-LED 1 [27].	35
Tabla 5: Equipos utilizados en la configuración de medición.	37
Tabla 6: Líneas espectrales de emisión de algunos elementos (longitudes de onda en nanómetros) [28].....	42
Tabla 7: Especificaciones del equipo LabSphere empleado como referencia.	45
Tabla 8: Condiciones de medición del LED blanco de alta potencia en el equipo LabSphere empleando el método de medición 4π	47
Tabla 9: Condiciones de medición del LED blanco de alta potencia en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π	48
Tabla 10: Condiciones de medición del LED blanco de alta potencia en el nuevo sistema de medición.....	49
Tabla 11: Condiciones de medición del LED verde de alta potencia.	49
Tabla 12: Máximos de intensidad obtenidos para la primera línea de emisión de referencia de la lámpara espectral de Hg.	53
Tabla 13: Resultados de la calibración de la escala de longitud de onda empleando la lámpara de emisión de líneas espectrales de Hg.....	53
Tabla 14: Resultados de la calibración de la escala de longitud de onda empleando la lámpara de emisión de líneas espectrales de Cd.....	54
Tabla 15: Resultados de la calibración de la escala de longitud de onda empleando la lámpara de emisión de líneas espectrales de Na.	55
Tabla 16: Resultados de la evaluación del LED blanco de alta potencia en el equipo LabSphere empleando el método de medición 4π	59
Tabla 17: Resultados de la evaluación del LED blanco de alta potencia en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π	60
Tabla 18: Resultados de la evaluación del LED blanco de alta potencia en el nuevo sistema de medición.....	61

Tabla 19: Resultados de la evaluación del LED verde de alta potencia en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π	62
Tabla 20: Resultados de la evaluación del LED verde de alta potencia en el nuevo sistema de medición.....	63
Tabla 21: Distribución de frecuencias del número de valores de longitudes de onda en función del número de conteos que realizaron.	64
Tabla 22: Contribución a la incertidumbre combinada en la calibración de la longitud de onda de un espectrómetro [23].	67
Tabla 23: Resultados de la calibración de la escala de longitud de onda del espectrómetro USB650 en el nuevo sistema de medición.	68
Tabla 24: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de intensidad de un espectrómetro [23].	72
Tabla 25: Resultados de la calibración de la escala de intensidad del espectrómetro USB650 en el nuevo sistema de medición.	73
Tabla 26: Comparación de resultados obtenidos para el LED blanco de alta potencia..	74
Tabla 27: Comparación de los resultados obtenidos para el LED verde de alta potencia.	75
Tabla 28: Flujo luminoso obtenido para diferentes valores de la temperatura del disipador en un LED verde de alta potencia.....	76
Tabla 29: Especificaciones de la fibra óptica QP400-2-VIS-NIR [29].	80

Capítulo 1.

Introducción

La tecnología de iluminación de estado sólido se ha incrementado exponencialmente en los últimos 10 años, y a pesar de que se encuentra en sus primeros años de desarrollo, esta tecnología ofrece una amplia oportunidad para mejorar la eficiencia lumínica. La tecnología de estado sólido tiene el potencial para generar un impacto positivo sobre el medio ambiente, la horticultura, el transporte, la salud humana, la productividad, entre otras. Las fuentes de iluminación obtenidas a partir de diodos emisores de luz, conocidos como LED de sus siglas en inglés “*light emitting diode*”, tienen características esenciales que otras fuentes de iluminación no tienen como por ejemplo un control espectral en el rango visible, un control de su intensidad y un control de su distribución óptica [1].

Debido a que los LEDs emiten luz en pequeñas porciones del espectro visible, éstas tienden a ser más eficientes que otras fuentes de iluminación como las incandescentes o fluorescentes, por lo que su alta eficacia hace que sea la mejor opción en la actualidad. Además de su alto rendimiento y bajo consumo eléctrico estas fuentes de iluminación presentan un mayor tiempo de vida, la cual representa un mayor tiempo de trabajo por el mismo consumo eléctrico que otras fuentes de iluminación [2].

Con esta revolución de las fuentes de iluminación convencionales a iluminación LED se concluye que ésta es la más eficiente en la actualidad y con espacio para mejorar mucho más en los siguientes 15 años. En la última década, las fuentes de iluminación LED que emiten radiación en el espectro visible de color blanco frío mejoraron de una eficacia luminosa de 25 lm/W a 160 lm/W, y se espera en un corto plazo de tiempo obtener una eficacia de 255 lm/W, y para largo plazo obtener niveles de eficiencia de hasta 330 lm/W [3].

A este gran ahorro energético que ofrecen los LEDs y que va de la mano del ahorro económico, se le añade que los costos de adquisición de estos productos de iluminación han disminuido hasta el punto que pueden ser competitivos con otros productos de iluminación convencional teniendo en su totalidad un ahorro en su costo inicial y un ahorro durante todo su ciclo de vida [3].

1.1. Antecedentes

El aumento en la demanda de la tecnología LED tuvo como consecuencia el surgimiento de diversos fabricantes con lo cual la eficiencia y calidad de estas fuentes de iluminación varía de un fabricante a otro. Este incremento en el mercado causó eventualmente productos ineficaces y de mala calidad con lo que las pruebas de evaluación

de estas fuentes de iluminación desempeñan un rol importante en el mantenimiento de la eficiencia y la calidad [1].

A nivel mundial, gran parte del consumo total de energía eléctrica es para la iluminación, por lo que la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía que sean más económicas son temas importantes en la actualidad. Una de estas nuevas alternativas son los módulos fotovoltaicos, los cuales utilizan la energía radiante del sol para ser convertida en energía lumínica. Estos módulos fotovoltaicos, sobre todo los módulos picro-fotovoltaicos, emplean como fuente de iluminación a las lámparas LED por ser altamente eficientes [4].

En el año 2016, en Bangladesh se utilizó los sistemas de energía solar como una solución al problema energético de su país, por lo que las fuentes de iluminación utilizadas en estos sistemas solares fueron las lámparas LED. La variedad de mercado para ésta tecnología de iluminación conlleva a productos de distintas calidades y características. Debido a los altos costos económicos que implica tener un laboratorio de evaluación de lámparas LED, la Universidad de BRAC en ese país, desarrolló un método para la medición del flujo luminoso empleando un sistema de bajo costo y de fácil construcción con resultados exitosos [5].

Por otro lado, en los últimos años con toda esta revolución tecnológica en iluminación de estado sólido, surgieron estudios relacionados a obtener mejores resultados en las evaluaciones de lámparas LED como por ejemplo el desarrollo en la metodología del cálculo de incertidumbre para los datos obtenidos con espectro-radiómetros en dispositivos fotovoltaicos [6], procedimientos de calibración de espectro-radiómetros, influencia de la distribución radiométrica de un LED sobre la respuesta de salida en un fotómetro [7], influencia de los encapsulados de los chips LED sobre su potencia óptica [8], desarrollo de sistemas para la medición de potencia total de LEDs y su corrección en las coordenadas de cromaticidad [9, 10], una esfera integradora diseñada especialmente para medir el flujo radiante de LEDs [11], etc.

En el año 2016, en el Laboratorio de Fotometría de la Universidad Nacional de Ingeniería, como parte de una tesis de maestría se realizó una evaluación de todos los equipos con los que contaba el laboratorio, obteniéndose para el medidor de flujo luminoso PCE-LED 1 correcciones aproximadas del 100% en todas sus mediciones [12]. El equipo PCE-LED 1 utiliza una esfera de integración de 75 mm de diámetro y es capaz de medir el flujo luminoso de pequeñas fuentes de iluminación.

Una de las funciones que realiza el Laboratorio de Fotometría de la UNI es evaluar y caracterizar fotométricamente distintas lámparas de uso convencional y para ello cuenta en la actualidad con diversos equipos de medición, los cuales por ejemplo son un goniofotómetro (diseñado y construido en el mismo laboratorio como parte de un trabajo de tesis de pregrado), una esfera integradora de 1 metro de diámetro de la marca LabSphere que trabaja junto con un espectrómetro de alta precisión de la misma marca. Además, cuenta con otros equipos tales como luxómetros, multímetros, fuentes de voltaje-corriente, etc. Éstos equipos se adquirieron durante el proceso de acondicionamiento del laboratorio.

Un espectrómetro con un rango de medición en el espectro visible y una fibra óptica, ambos de la marca Ocean Optics, fueron parte de los equipos que adquirió el Laboratorio de Fotometría a lo largo de estos años. Estos equipos junto a la esfera integradora del medidor de flujo luminoso PCE-LED 1 son los que se pretendía utilizar para construir un sistema que pueda obtener el espectro radiométrico de fuentes de iluminación LED.

En el Perú los escasos laboratorios de fotometría que se dedican a la evaluación y caracterización de fuentes de iluminación, en especial fuentes de iluminación LED, no cuentan con los equipos y las condiciones necesarias para realizarlas, ya sea por factores económicos o por falta de personal capacitado y especializado en esta rama de la ciencia.

1.2. Objetivos

- Diseñar y construir un adaptador que permita ensamblar el espectrómetro USB650 Red Tide a la esfera integradora PCE-LED 1 mediante una fibra óptica.
- Implementar una hoja de cálculo que permita automatizar la calibración del sistema de medición montado tanto en su rango espectral como en su escala de intensidad.
- Implementar una hoja de cálculo y un procedimiento que permita automatizar la adquisición de datos de una fuente de iluminación LED utilizando el sistema de medición montado y el software OceanView 1.6.3.
- Obtener el espectro radiométrico en el rango visible de una fuente de iluminación LED utilizando el nuevo sistema de medición montado y el software OceanView 1.6.3.
- Implementar una hoja de cálculo que procese los datos obtenidos con el sistema de medición montado y emita un informe con los resultados fotométricos y colorimétricos de la evaluación de un LED.

Capítulo 2.

Fundamento Teórico

2.1. Radiometría y Fotometría

La radiación electromagnética que se encuentra en la región visible del espectro electromagnético se conoce como radiación luminosa porque produce en el ojo humano una sensación tal que es capaz de cuantificarse. Esta radiación luminosa se puede estudiar desde el punto de vista de la radiometría o de la fotometría.

La radiometría es la ciencia que estudia la radiación en todo el espectro electromagnético, en cambio, la fotometría solo se encarga de la radiación que se encuentra en la región del espectro visible y la cual es capaz de producir una sensación luminosa sobre el ojo humano. El objetivo principal de la fotometría es medir la radiación visible o luz de tal manera de obtener resultados lo más relacionados posibles a la sensación que produciría sobre un observador humano normal expuesto a la misma radiación [13]. En la Tabla 1 se muestra una comparación entre las magnitudes y unidades radiométricas y fotométricas junto con sus símbolos.

Tabla 1: Cantidades, unidades y símbolos usados en Radiometría y Fotometría [13].

Cantidad Radiométrica	Unidad	Cantidad Fotométrica	Unidad
Flujo Radiante (Φ_e)	W	Flujo Luminoso (Φ_v)	lm
Intensidad Radiante (I_e)	W/sr	Intensidad Luminosa (I_v)	cd
Radiancia (L_e)	W/m ² sr	Luminancia (L_v)	cd/m ²
Irradiancia (E_e)	W/m ²	Iluminancia (E_v)	lm/m ² , lx
Exitancia Radiante (M_e)	W/m ²	Exitancia Luminosa (M_v)	lm/m ²

2.1.1. Eficiencia Luminosa Espectral $V(\lambda)$

Cada magnitud radiométrica tiene su magnitud fotométrica correspondiente, las magnitudes radiométricas cuantifican la energía que se asocia a la radiación

electromagnética en ciertas condiciones, mientras que las magnitudes fotométricas cuantifican la sensación que dicha energía es capaz de provocar en el ojo humano. Ambas magnitudes son proporcionales entre sí, pero el factor de proporcionalidad es distinto para cada longitud de onda.

Si se conoce el valor de una magnitud radiométrica espectral $X_{e,\lambda}$ para cada valor de su longitud de onda entonces es posible hallar el valor total de la magnitud radiométrica X_e para un intervalo de longitud de onda dado $[\lambda_1, \lambda_2]$ mediante la siguiente integral:

$$X_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda} d\lambda \quad (2.1.1)$$

Además, a partir de esa misma magnitud radiométrica espectral conocida $X_{e,\lambda}$ se puede obtener el valor de su magnitud fotométrica correspondiente X_v para el mismo intervalo de longitud de onda dado $[\lambda_1, \lambda_2]$ integrando la siguiente ecuación:

$$X_v = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K(\lambda) X_{e,\lambda} d(\lambda) \quad (2.1.2)$$

El término $K(\lambda)$ recibe el nombre de eficacia luminosa espectral de la radiación y es el mismo para todas las magnitudes radiométricas y fotométricas correspondientes y su valor depende de la longitud de onda. La eficacia luminosa espectral puede ser representada de la siguiente manera:

$$K(\lambda) = K_m V(\lambda) \quad (2.1.3)$$

Donde K_m es la eficacia luminosa espectral máxima y $V(\lambda)$ es la función de la eficiencia luminosa espectral definida por la CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) la cual es una cantidad adimensional y tiene un valor máximo en la unidad. Esta función $V(\lambda)$ indica la sensibilidad relativa que la radiación produce en el ojo humano de un observador normal para cada longitud de onda. Reemplazando la ecuación (2.1.3) en la ecuación (2.1.2) se tiene que el valor de una magnitud fotométrica X_v se puede definir como una función de la eficiencia luminosa espectral como sigue:

$$X_v = K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda} V(\lambda) d(\lambda) \quad (2.1.4)$$

De acuerdo a la CIE, la medición de la eficiencia luminosa espectral se ve afectada por muchos factores como por ejemplo el cambio de observador, el estado de adaptación del ojo, etc. La CIE adoptó funciones particulares de la eficiencia luminosa espectral para dos tipos de visión: fotópica y escotópica.

La visión fotópica surge cuando el ojo humano se encuentra expuesto a altos niveles de luminancia y los elementos receptores activos de la retina son los conos. La función $V(\lambda)$ para la visión fotópica tiene valores en intervalos de 1 nm y en el rango de 360 a 830 nm, además tiene un máximo valor de unidad a la longitud de onda de $\lambda_m = 555.016$ nm. El valor de la eficacia luminosa espectral máxima K_m para la visión fotópica es definido como sigue:

$$K_m = 683.002 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \approx 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.1.5)$$

La visión escotópica surge cuando el ojo humano se encuentra expuesto a bajos niveles de luminancia y los elementos receptores activos de la retina son los bastones. La función $V'(\lambda)$ para la visión escotópica tiene valores en intervalos de 1 nm y en el rango de 380 a 780 nm, además tiene un máximo valor de unidad a la longitud de onda de $\lambda'_m = 507$ nm. El valor de la eficacia luminosa espectral máxima K'_m para la visión escotópica es definido como sigue:

$$K'_m = 1700.06 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \approx 1700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2.1.6)$$

2.1.2. Flujo Radiante y Flujo Luminoso

Flujo radiante (símbolo: Φ_e ; unidad: W)

De acuerdo a la norma CIE 18.2 [13] los términos flujo radiante y potencia radiante son sinónimos para la potencia emitida, recibida o transferida en alguna forma de radiación. La magnitud radiométrica espectral mencionada en la ecuación (2.1.1) para el flujo radiante es conocida como concentración espectral del flujo radiante o flujo radiante espectral $\Phi_{e,\lambda}$. A partir de esto, el flujo radiante Φ_e de una radiación que tiene una distribución de flujo radiante espectral conocida $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ en cierto intervalo del espectro electromagnético se puede calcular a partir de la siguiente manera:

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (2.1.7)$$

Flujo Luminoso (símbolo: Φ_v visión fotópica, Φ'_v visión escotópica; unidad: lm)

Es la cantidad fotométrica más importante debido a su relación directa con el flujo radiante. El flujo luminoso representa la capacidad que tiene el flujo radiante para producir una sensación luminosa sobre el ojo humano [13].

Para la visión fotópica, el flujo luminoso Φ_v de una radiación que tiene una distribución de flujo radiante espectral $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ se calcula de acuerdo a la ecuación (2.1.4):

$$\Phi_v = K_m \int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d(\lambda) \quad (2.1.8)$$

Para la visión escotópica, el flujo luminoso Φ'_v de una radiación que tiene una distribución de flujo radiante espectral $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ se calcula de manera similar a la anterior:

$$\Phi'_v = K'_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e,\lambda} V'(\lambda) d(\lambda) \quad (2.1.9)$$

2.1.3. Unidades Fotométricas

Candela (cd)

La *candela* es la unidad fotométrica base del Sistema Internacional de Unidades (SI) y desde 1979 se define como sigue:

“La *candela* es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hertz y ésta tiene una intensidad radiante en esa dirección de $1/683$ vatio por estereorradián.”

De acuerdo a esta definición se tiene que la eficacia luminosa espectral de una radiación monocromática a esa frecuencia es igual a 683 lúmenes por watt [14].

Lumen (lm)

El *lumen* es la unidad del Sistema Internacional del flujo luminoso, se define como el flujo luminoso emitido dentro de la unidad de ángulo sólido (estereorradián) por una fuente puntal isotrópica que tiene una intensidad luminosa de 1 candela [14].

Lux (lx)

El *lux* es la unidad del Sistema Internacional de la iluminancia, se define como la iluminancia producida sobre una superficie de área de 1 metro cuadrado por un flujo luminoso de 1 lumen uniformemente distribuido sobre esta superficie [13].

2.2. Colorimetría

La colorimetría es la ciencia de la medición del color, en la cual reemplaza respuestas subjetivas de colores con un sistema numérico objetivo. La percepción del color es gobernada por tres factores: la naturaleza de la iluminación, las propiedades ópticas del objeto mismo y la respuesta del ojo humano. La colorimetría cuantifica estos aspectos e introduce los conceptos de observadores e iluminantes estándar de tal manera que define al color de manera inequívoca [15].

La especificación de color es un medio para expresar cuantitativamente el color, y los valores que lo expresan son llamados valores de especificación de color. Un sistema de especificación de color está formado por una serie de definiciones y es llamado sistema de color. Hay dos tipos de sistemas de especificación de color: el sistema Munsell, basado en la apariencia del color, y el sistema CIE, basado en la mezcla aditiva del color.

El sistema de color Munsell tiene relativamente una baja precisión al tratar de representar un color arbitrario (un color que no sea parte de los colores que forman la base

del sistema Munsell), en cambio en el sistema CIE se puede representar un color con una alta precisión usando colorimetría espectrofotométrica. Debido a esto el sistema CIE es comúnmente usado a nivel industrial y otras aplicaciones cuantitativas [16].

2.2.1. Sistema de Especificación de Color RGB

La CIE estableció en 1931 funciones de emparejamiento de color (Color Matching Functions, CMFs) basados sobre los siguientes principios:

- 1.- Los estímulos de referencia [R], [G] y [B] son fuentes de luz monocromáticas de longitudes de onda $\lambda_R = 700.0$ nm, $\lambda_G = 546.1$ nm y $\lambda_B = 435.8$ nm, respectivamente.
- 2.- El estímulo básico es el estímulo de color blanco del espectro de equienergía. Las cantidades del estímulo de referencia [R], [G] y [B] requeridos para emparejar el estímulo básico están en relación 1.0000:4.5907:0.0601 cuando es expresado en unidades fotométricas, y en la relación 72.0966:1.3791:1.0000 cuando es expresado en unidades radiométricas.

Teniendo en cuenta esto se puede definir un estímulo de color desconocido [C] de la siguiente manera [17]:

$$[C] \equiv R[R] + G[G] + B[B] \quad (2.2.1)$$

Donde R, G y B representan las cantidades que deben ser usadas, expresadas en sus respectivas unidades, para representar el estímulo de color correspondiente. Las funciones de emparejamiento de color se muestran en la Figura 1.

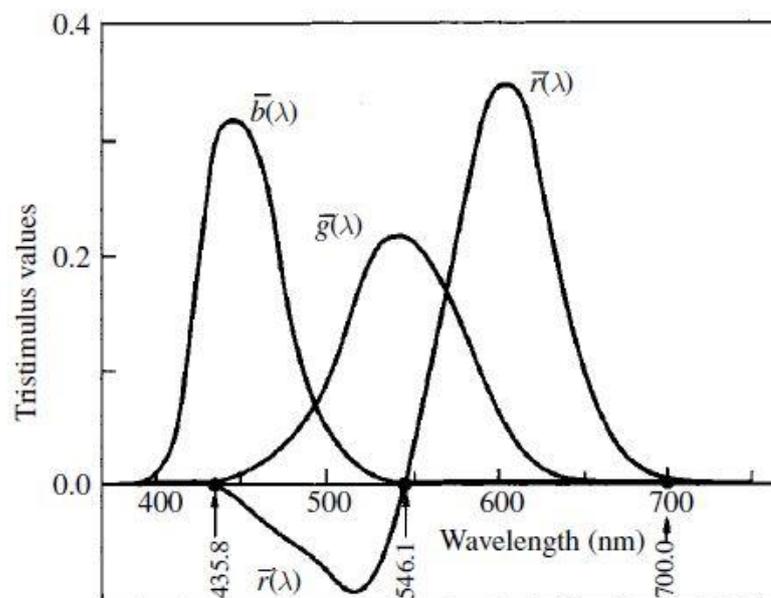


Figura 1: CMFs $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$ del sistema de color RGB CIE 1931 [16].

La ecuación (2.2.1) determina un espacio tridimensional teniendo como vectores componentes a [R], [G] y [B], el cual es llamado Espacio de Color. El estímulo de color [C] se puede representar en función de un estímulo de color de prueba no monocromático $\Phi_{e,\lambda}$ y de las CMFs $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$. El estímulo de color [C] entonces queda reescrito de la siguiente manera:

$$[C] = \int_{380nm}^{780nm} \bar{r}(\lambda)\Phi_{e,\lambda} d\lambda \cdot [R] + \int_{380nm}^{780nm} \bar{g}(\lambda)\Phi_{e,\lambda} d\lambda \cdot [G] + \int_{380nm}^{780nm} \bar{b}(\lambda)\Phi_{e,\lambda} d\lambda \cdot [B] \quad (2.2.2)$$

Las integrales que se observan en la ecuación (2.2.2) son llamados Valores Triestímulos y pueden ser reemplazados por los valores R, G y B respectivamente [17]. A partir de los valores triestímulos se definen las Coordenadas de Cromaticidad del espacio de color como:

$$\begin{aligned} r &= R/(R + G + B) \\ g &= G/(R + G + B) \\ b &= B/(R + G + B) \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

De las coordenadas de cromaticidad se observa que $r + g + b = 1$, entonces, dos coordenadas de cromaticidad (por ejemplo, r y g) son suficientes para describir cualquier estímulo de color no monocromático en un plano unidad. Un diagrama que muestre dos coordenadas de cromaticidad es llamado Diagrama de Cromaticidad. En la Figura 2 se muestra el diagrama de cromaticidad para el sistema de especificación de color RGB de acuerdo a la CIE 1931 mostrando además el punto de cromaticidad blanco de equienergía W_E .

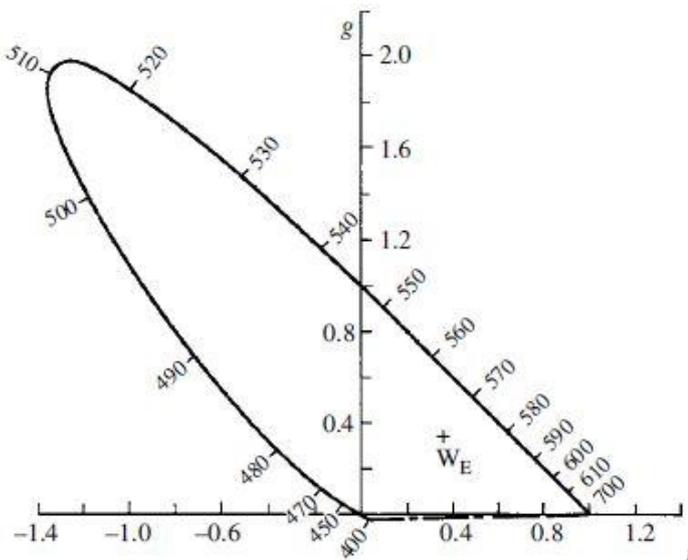


Figura 2: Diagrama de cromaticidad para el sistema de especificación de color RGB de acuerdo a la CIE 1931 [16].

2.2.2. Sistema de Especificación de Color XYZ

Como se observa en la Figura 1 las CMFs del sistema RGB tiene algunos valores negativos, por lo que la CIE introdujo un sistema de color XYZ con la intención de que todos los valores de las CMFs sean positivos y faciliten los cálculos matemáticos. Como este nuevo sistema está basado en el sistema de color RGB 1931 y los experimentos se realizaron para un ángulo de visión de 2° , este sistema se llamó Sistema Colorimétrico Estándar CIE 1931 y sus CMFs $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ se muestran en la Figura 3 [16].

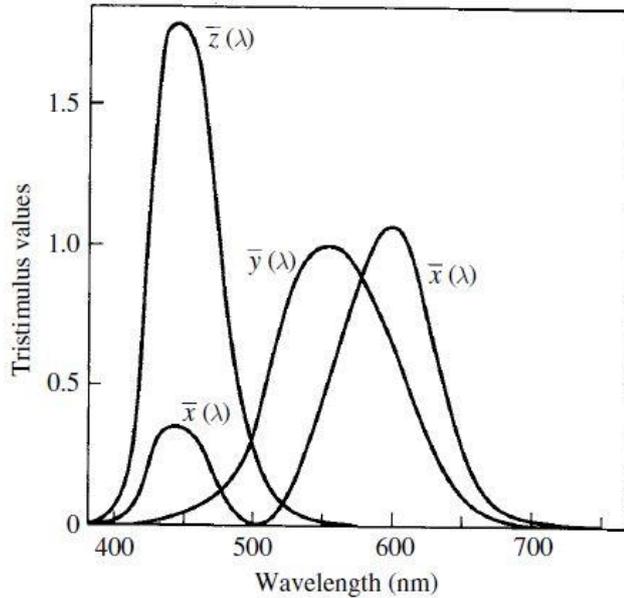


Figura 3: CMFs $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ en el sistema de color XYZ CIE 1931 [16].

De acuerdo a este sistema de color, todo observador virtual que tiene estos CMFs es llamado Observador Colorimétrico Estándar CIE 1931 u Observador Colorimétrico CIE 2° . Otra característica importante de este sistema es que la función $\bar{y}(\lambda)$ es igual a la función de eficiencia luminosa espectral $V(\lambda)$ [16].

Los valores triestímulos del sistema de color XYZ se calculan de la misma manera que en el sistema RGB y se definen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 X &= k \int_{380nm}^{780nm} \bar{x}(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda, & Y &= k \int_{380nm}^{780nm} \bar{y}(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda, \\
 Z &= k \int_{380nm}^{780nm} \bar{z}(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda
 \end{aligned}
 \tag{2.2.4}$$

A partir de esto se puede calcular las coordenadas de cromaticidad en este sistema de color:

$$\begin{aligned}
 x &= X/(X + Y + Z) \\
 y &= Y/(X + Y + Z) \\
 z &= Z/(X + Y + Z)
 \end{aligned}
 \tag{2.2.5}$$

Donde $x + y + z = 1$, además al igual que en el sistema de color RGB, basta con dos coordenadas, usualmente x e y , para describir el diagrama de cromaticidad que se muestra en la Figura 4, en el cual también se muestra el punto de equienergía E [17].

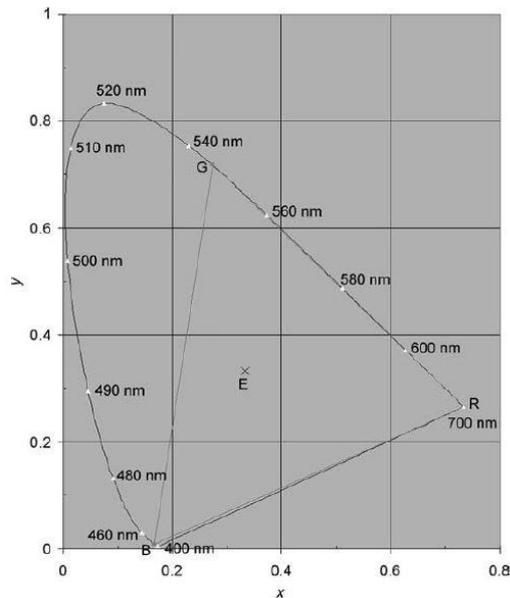


Figura 4: Diagrama de cromaticidad del sistema de color XYZ CIE 1931 [17].

2.2.3. Diagramas de Cromaticidad Uniforme

En 1931 la CIE recomendó el uso de un sistema colorimétrico estándar XYZ el cual incluía CMFs para un observador colorimétrico estándar, así como un diagrama de cromaticidad y entre otras cosas. En la práctica este sistema es ampliamente usado, pero la realidad es que es incompleto en algunos aspectos. Este sistema colorimétrico no es uniforme, esto es, no se puede apreciar si dos muestras de color son diferenciables por una observación visual simple.

David MacAdam desarrolló experimentos para determinar diferencias de cromaticidad que corresponden a diferencias de color poco apreciables en el diagrama de cromaticidad xy , así como también un punto en el diagrama tal que las diferencias de cromaticidad iguales en diferentes direcciones representan diferencias de color visuales de magnitudes diferentes. En la Figura 5 se observa los resultados de los experimentos de MacAdam mostrados como elipses en el diagrama de cromaticidad xy (aumentado 10 veces) [17].

Idealmente se deberían obtener círculos y no elipses en el diagrama de cromaticidad, por lo que esto condujo a proponer distintos diagramas de cromaticidad con el fin de obtener la misma diferencia percibida para distancias iguales en el diagrama. Estos diagramas son llamados diagramas escalas de cromaticidad uniforme [16].

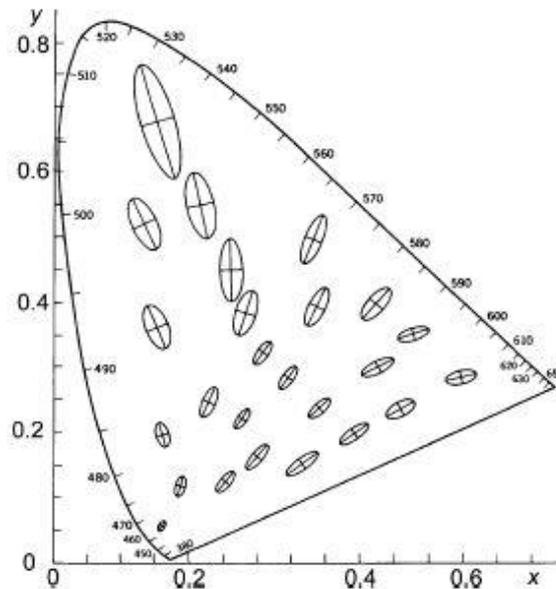


Figura 5: Elipses de MacAdam en el diagrama de cromaticidad xy [17].

Diagrama Escala de Cromaticidad Uniforme CIE 1960

En 1960 la CIE propuso un diagrama de cromaticidad desarrollado por MacAdam debido a que mejoró la uniformidad relativa en el diagrama de cromaticidad xy y porque además existía una simplicidad en la conversión de ecuaciones. En este nuevo diagrama las coordenadas de cromaticidad se obtenían a partir de las coordenadas de cromaticidad x e y o de los valores triestímulos X , Y y Z .

$$\begin{aligned} u &= 4x/(-2x + 12y + 3) = 4X/(X + 15Y + 3Z) \\ v &= 6y/(-2x + 12y + 3) = 6Y/(X + 15Y + 3Z) \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

El diagrama de cromaticidad obtenido al trazar las coordenadas de cromaticidad que se muestran en la ecuación (2.2.6) es ampliamente usado y se muestra en la Figura 6 (ampliado 10 veces) [16].

Diagrama Escala de Cromaticidad Uniforme CIE 1976

En 1976 se propuso un nuevo diagrama de cromaticidad que mostraba mejor uniformidad y se obtenía multiplicando a los valores de la coordenada de cromaticidad v por 1.5. En base a esto la CIE recomendó un nuevo diagrama de cromaticidad $u'v'$ tal que sus coordenadas se describen como se muestra en la ecuación (2.2.7).

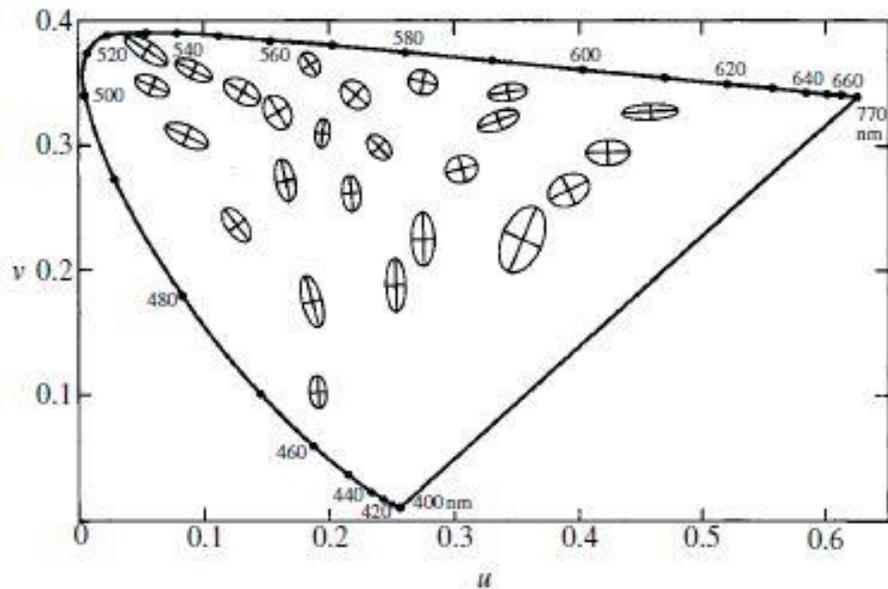


Figura 6: Elipses de MacAdam en el diagrama de cromaticidad uv [16].

$$\begin{aligned} u' &= 4x/(-2x + 12y + 3) = 4X/(X + 15Y + 3Z) \\ v' &= 9y/(-2x + 12y + 3) = 9Y/(X + 15Y + 3Z) \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

El diagrama de cromaticidad obtenido al trazar las coordenadas de cromaticidad que se muestran en la ecuación (2.2.7) se muestra en la Figura 7 (aumentado 10 veces) [16].

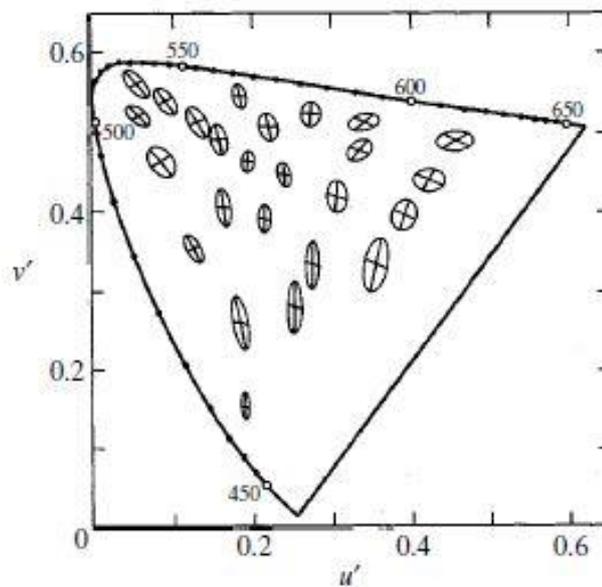


Figura 7: Elipses de MacAdam en el diagrama de cromaticidad $u'v'$ [16].

2.2.4. Descriptores de Cromaticidad

Los descriptores de cromaticidad brindan información adicional relacionada al color tal que los diagramas de cromaticidad no pueden brindar por sí solas. Comparando un estímulo de color de una fuente bajo prueba con un estímulo de color de referencia (radiador de Planck) se puede obtener un número simple que brinde información sobre la cromaticidad de la luz [17].

Longitud de Onda Dominante/Complementaria y Pureza

Según la CIE, se define la longitud de onda dominante λ_d como “La longitud de onda de un estímulo monocromático que, cuando es mezclado aditivamente en proporciones adecuadas con un estímulo acromático específico, empareja el estímulo de color considerado”. Como se observa en la Figura 8, el punto W representa un estímulo acromático [W] (conocido como punto blanco). Si la intersección del lugar del espectro con la línea recta a través del punto blanco W y del punto de prueba F_1 es D, el color [F_1] representado por F_1 puede obtenerse mezclando el estímulo de color blanco [W] y el estímulo de color monocromático [D] representado por el punto D [16].

La longitud de onda del estímulo monocromático en la intersección D es llamada longitud de onda dominante de [F_1] y se representa por el símbolo λ_d . La pureza de excitación p_e es calculada a partir de las coordenadas de cromaticidad del punto blanco W, del punto de evaluación F_1 y del punto de intersección D tal y como se muestra en la ecuación (2.2.8).

$$p_e = (x_1 - x_w)/(x_d - x_w) = (y_1 - y_w)/(y_d - y_w) \quad (2.2.8)$$

Cuando el color se encuentra en la región del púrpura (triángulo inferior en el diagrama de cromaticidad de la Figura 8) la pureza de excitación p_e se calcula utilizando las coordenadas de cromaticidad del punto P' opuesto a P , en este caso P' se llama longitud de onda complementaria y se denota con el símbolo λ_c [16].

Temperatura de Color y Temperatura Correlacionada de Color

Cuando un estímulo de color presenta una distribución de potencia espectral ideal, su temperatura absoluta y su distribución de potencia espectral de la radiación se encuentran en la relación de 1 a 1. La especificación de color basado en este concepto se denomina temperatura de color T_c o temperatura correlacionada de color T_{cp} . La temperatura de color expresa la cromaticidad de una radiación dada por la temperatura del cuerpo negro que tiene la misma cromaticidad que la de la radiación. Para la radiación cuya cromaticidad no es exactamente igual a la del cuerpo negro, se define el término temperatura correlacionada de color la cual tiene una cromaticidad más cercana a la de la radiación [16].

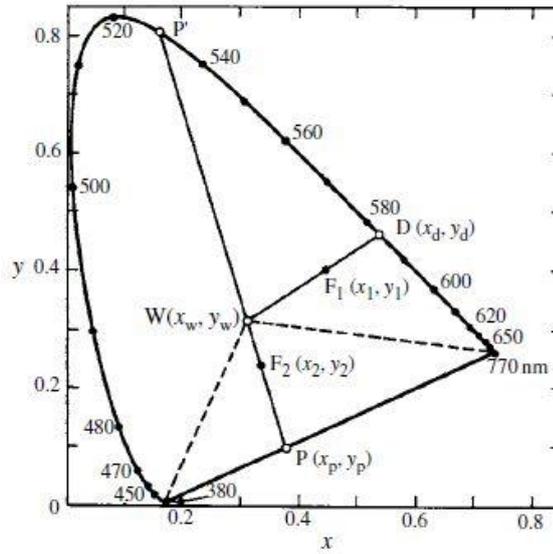


Figura 8: Longitud de onda dominante y pureza de excitación.

La temperatura de color correlacionada es definida por la CIE en términos del diagrama de cromaticidad CIE 1960 UCS y la ubicación de la curva de Planck en este diagrama se muestra en la Figura 9. El cálculo para hallar la temperatura de color correlacionada de manera directa la propuso McCamy en función de las coordenadas de cromaticidad x e y [16].

$$T = -437n^3 + 3601n^2 - 6861n + 5524.31 \quad (2.2.9)$$

Donde:

$$n = (x - 0.3320)/(y - 0.1858) \quad (2.2.10)$$

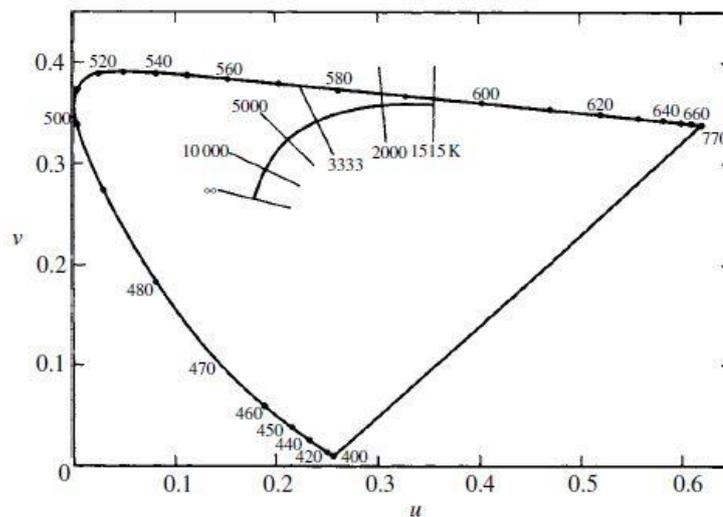


Figura 9: Curva de Planck y líneas de isotemperatura en el diagrama de cromaticidad uv [16].

2.3. Diodos Emisores de Luz (LED)

Un LED es un tipo de diodo semiconductor. Un diodo es un componente electrónico con dos terminales en el que la corriente va en una sola dirección. El material del chip semiconductor de un LED se encuentra dopado, o impregnado, con impurezas con el que se tiene una estructura llamada juntura $p-n$. Tal como ocurre en cualquier diodo, la corriente fluye fácilmente a partir del sitio p (carga positiva), o ánodo, al sitio n (carga negativa), o cátodo, pero no en sentido inverso. Los electrones y los huecos fluyen hacia la juntura, y cuando un electrón se junta con un hueco, éste disminuye a un menor nivel de energía, liberando así un fotón. Este efecto es llamado electroluminiscencia y se observa en la Figura 10. El valor específico de la longitud de onda emitida por LED depende de ancho de banda prohibido (band gap) [18].

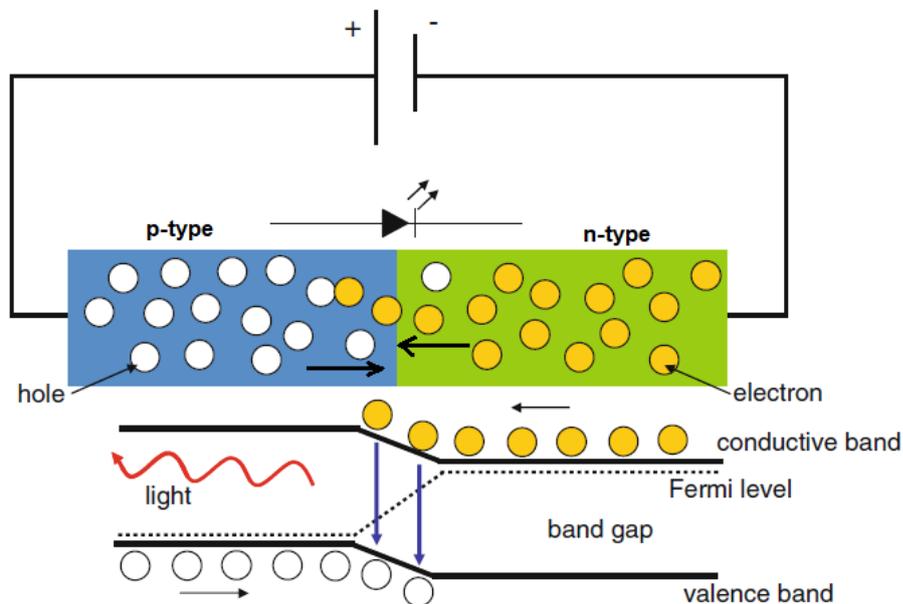


Figura 10: Principio de funcionamiento de un LED [18].

Actualmente los LEDs son muy pequeños, por lo que es necesario emplear componentes adicionales que permiten darle forma y dirección a la luz emitida. Además, los LEDs están hechos a partir de una serie de materiales inorgánicos, los cuales producen diferentes colores de luz. Para producir luz blanca a partir de un LED existen dos caminos: el primero es empleando tres LEDs individuales que emitan luz de color rojo, verde y azul y mezclándolos entre ellos, el segundo método, y más común, es usando un revestimiento de fósforo para convertir la luz emitida por un LED azul o ultravioleta (UV) a luz blanca, de manera similar como trabajan los fluorescentes [18].

Cada unidad LED emite luz en un estrecho rango de longitud de onda, y pueden ser concentrados en una porción de la región del espectro visible, haciéndolos altamente eficientes. Los LEDs pueden ser muy pequeños, como indicadores de luz, o muy grandes, como lámparas de iluminación. Además, pueden ser alimentados con una corriente de 1

ampere a más. Los circuitos electrónicos producen una cantidad considerable de calor, por lo que es necesario emplear disipadores de calor [18].

Una característica importante de estos diodos es que la cantidad de radiación producida por éstos es casi proporcional a la corriente suministrada. Esta nueva tecnología de iluminación basada en LEDs ofrece una gran oportunidad de mejorar la eficiencia, desempeño y valores de iluminación para muchas aplicaciones y beneficios. A diferencia de otras fuentes de luz convencionales la tecnología LED tiene tres características que la hacen la mejor opción en cuanto a iluminación: control sobre su distribución espectral (no solo en el visible sino también en el ultravioleta e infrarrojo), control de su intensidad (se puede controlar el nivel de intensidad según la aplicación) y un control en su distribución óptica (logrando que la luz se entregue sólo donde es necesario) [1].

Tres mediciones cualitativas son aplicadas usualmente para definir la calidad de iluminación de un LED [2]:

- 1.- La eficiencia de la iluminación o mejor conocida como “eficacia”, teniendo los LEDs en la actualidad la mayor eficacia comparada con otras fuentes de iluminación convencionales.
- 2.- Índice de reproducción de color, comparado con otras fuentes de iluminación, los LEDs tienen una mejor capacidad de reproducir los colores reales de un objeto en relación a una fuente de luz ideal o natural.
- 3.- Tiempo de vida, los LEDs tienen un mayor tiempo de funcionamiento cuando cumplen las especificaciones de iluminación.

El color de luz emitida y la eficiencia luminosa de un LED depende de la composición química del material semiconductor usado. Los LEDs se comercializan dentro de un encapsulado el cual es responsable de las conexiones eléctricas, la protección mecánica y del disipador de calor del chip LED. Actualmente los LEDs de alta potencia, conocidos como LEDs-HP de sus siglas en inglés “*High Power*”, son las que tienen mayor demanda debido a que tienen una corriente de operación mayor a 350 mA y tienen una eficacia de salida mayor a 130 lm/W.

A pesar de todos estos beneficios, la eficiencia de un LED-HP disminuye fuertemente con el aumento de temperatura del LED, por lo que el diseño y construcción del encapsulado tiene un rol importante en su fabricación. En la Figura 11 se muestra la estructura de un LED convencional y un LED de alta potencia [2].

2.3.1. Eficacia de la Iluminación LED

La tecnología de iluminación LED ha llegado al punto de ser la mejor opción para todas las aplicaciones, pasando de tener una eficacia de 25 lm/W a 160 lm/W en los últimos 15 años, además los costos de fabricación han disminuido al punto de que los productos LED pueden competir en el mercado con otros productos de iluminación. Estos avances

trajeron como consecuencia un gran ahorro energético, siendo la iluminación LED la principal fuente de ahorro de energía en los últimos años en Estados Unidos [3].

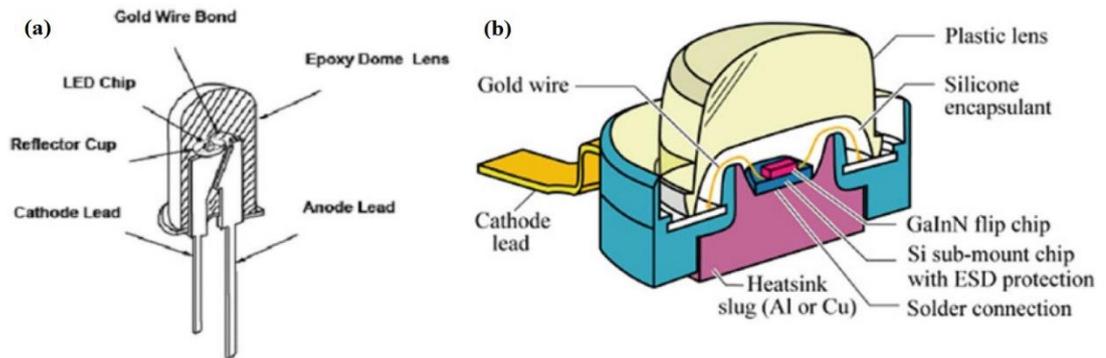


Figura 11: Diagrama esquemático de (a) un LED convencional y (b) un LED de alta potencia [2].

En la Tabla 2 se muestra una comparación de la eficacia luminosa y tiempo de vida de productos de iluminación LED y otros productos de iluminación convencionales.

Tabla 2: Comparación de eficacia luminosa y tiempo de vida entre productos LED y productos de iluminación convencional [3].

Mejores Productos LED en el 2016	Eficacia Luminosa (lm/W)	Tiempo de Vida (L70) (h)
Lámpara LED A19 (2700 K)	100	25000
Lámpara LED PAR38 (3000 K)	88	25000
Tubo LED T8 (4000 K)	149	50000
LED 6" (3000 K)	86	50000
LED 2' x 4' (3500 K)	129	50000
Luminaria LED (4000 K)	136	60000
LED de luz exterior (5000 K)	118	60000
Productos de iluminación convencional	Eficacia Luminosa (lm/W)	Tiempo de Vida (h)
Incandescente A19	15	1000
Halógeno A19	20	8400
CFL A19	70	12000
CFL A19 (regulable)	70	12000
Sistema fluorescente lineal	108	25000
Sistema HID (de alta potencia)	115	15000
Sistema HID (de baja potencia)	104	15000

2.3.2. Propiedades Ópticas

Si la radiación que emite un LED se encuentra en la región visible, esta radiación puede ser caracterizada por cantidades radiométricas, fotométricas y colorimétricas con sus respectivas unidades para cuantificar el efecto que causan sobre el ojo humano. Los métodos y técnicas usados para caracterizar las propiedades ópticas de los LEDs son las mismas que se utilizan para otros tipos de fuentes de iluminación. Debido a la gran variedad de LEDs que existe en el mercado, hay una gran variedad de distribuciones espectrales y espaciales, con lo cual estudiar la radiación emitida de un LED tiene un rol importante en su caracterización [19].

Distribución Espacial de un LED

La radiación emitida por un LED es generada por un chip semiconductor la cual se encuentra generalmente protegido por un encapsulado que la rodea. Este encapsulado tiene por función principal el proteger al chip durante la operación, además de acuerdo a su diseño y construcción, puede influir en la distribución espacial de intensidad luminosa de la radiación emitida, ya que en su diseño puede haber reflectores o lentes, filtros de colores o una capa fluorescente. En la Figura 12 se muestra algunas de estas distribuciones espaciales de distintos LEDs [19].

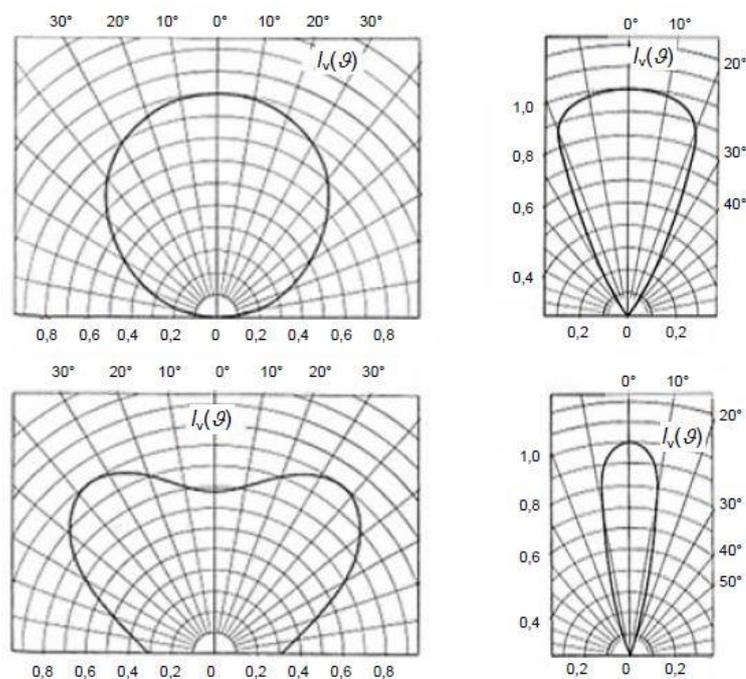


Figura 12: Distribuciones espaciales de intensidad luminosa típicas de diferentes LEDs [19].

Distribución Espectral de un LED

Los LEDs tienen una característica en su distribución espectral de la radiación óptica que la diferencia de otras fuentes de iluminación. En el caso de LEDs simples de colores, estas distribuciones tienen un ancho de banda de solo unas decenas de nanómetros. En la Figura 13 se muestra algunas distribuciones espectrales relativas de distintos LEDs [19].

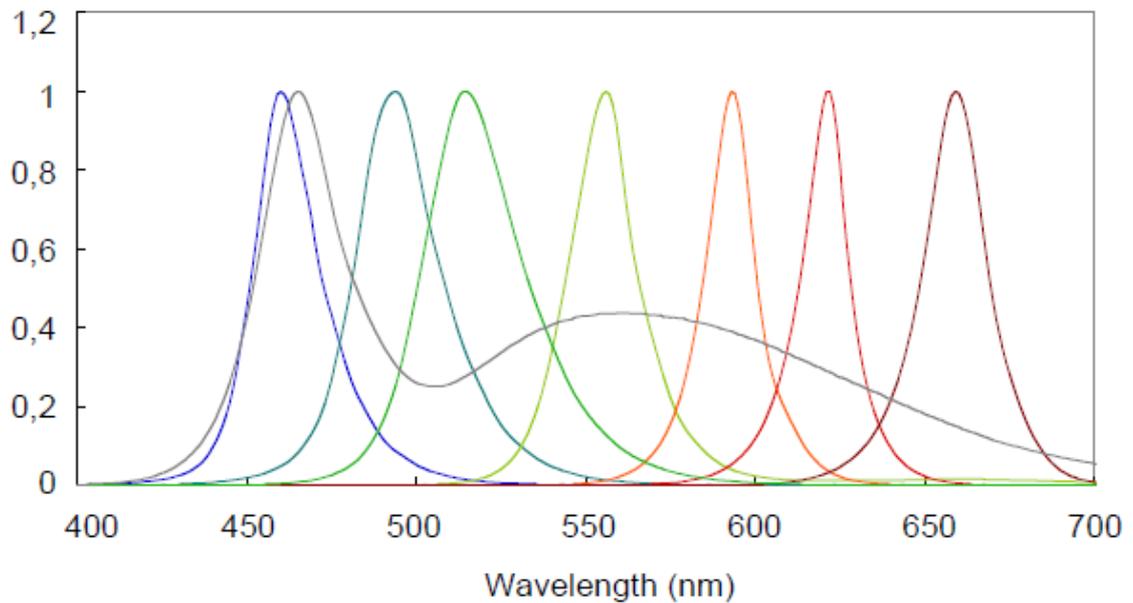


Figura 13: Distribuciones de potencia espectral relativa de LEDs típicos [19].

2.3.3. Características Eléctricas

Los LEDs por lo general funcionan con una fuente de alimentación DC en el que se les aplica un voltaje directo V_F y una corriente directa I_F . Los LEDs convencionales trabajan usualmente a una corriente directa de 20 mA y valores típicos de voltajes entre 1.2 V y 6.5 V. En el caso de LEDs de alta potencia, éstos funcionan con una corriente mayor a 350 mA. La potencia eléctrica P consumida por LED se calcula de acuerdo a la ecuación (2.3.1) [19]:

$$P = V_F \cdot I_F \quad (2.3.1)$$

A bajas corrientes la potencia radiante aumenta a una tasa mucho mayor que el de la potencia eléctrica consumida, en cambio, a altas corrientes, la tasa se vuelve casi constante debido al calentamiento del chip LED. En condiciones normales de operación, el flujo luminoso emitido varía linealmente con la corriente eléctrica suministrada, por lo que para una caracterización fotométrica de un LED se recomienda utilizar una corriente constante [19].

2.3.4. Características Térmicas

La caracterización térmica de LEDs cada día se vuelve tan importante como la caracterización fotométrica y esto es debida principalmente a que la radiación emitida por un LED depende en gran medida de la temperatura a la cual se encuentra. Es por ello que un gran reto en la actualidad es desarrollar metodologías necesarias para realizar caracterizaciones térmicas adecuadas para la gran variedad de LEDs que ofrecen los fabricantes y que además existen en el mercado, además, también está el hecho de que las aplicaciones actuales exigen que los datos que brindan las hojas de especificaciones de los productos sean confiables y exactos [20].

A menos que se indique lo contrario, la caracterización térmica de un LED se realiza a temperatura ambiente ($T_{amb} \approx 25^\circ$). Debido a la potencia eléctrica consumida por el chip LED, es de esperarse que su temperatura aumente, llegando a estabilizar a una temperatura mucho mayor que la temperatura ambiente ($T_{chip} > T_{amb}$). Como consecuencia de estos cambios térmicos, el encapsulado del chip LED, los contactos eléctricos y el propio disipador se ven afectados, con lo que la radiación emitida se ve afectada significativamente al momento de realizar las mediciones. Aunque los LEDs operan a una corriente directa constante, es normal que se produzca pequeños aumentos de temperatura durante su operación [19].

En el caso de LEDs de alta potencia, éstos si se dependen fuertemente de su temperatura de juntura. El incremento en la temperatura de juntura de un LED de alta potencia puede causar cambios en el pico de longitud de onda de su distribución radiométrica, una disminución de su voltaje directo, una reducción en su flujo radiante total y la variación de otras propiedades ópticas. Para controlar o medir la temperatura de un LED a menudo se puede usar la temperatura del encapsulado, la temperatura del chip, la temperatura de la soldadura o la temperatura del disipador. Esto se hace con el fin de indicar a qué condiciones térmicas se realizaron las mediciones. En la Figura 14 se muestra un ejemplo de la variación de las propiedades ópticas de un LED en función de su temperatura de juntura [21].

Efectos de la Temperatura sobre la radiación emitida por un LED

Un LED por lo general es evaluado a un voltaje y corriente constante, por lo que se tiene una potencia eléctrica constante por parte de este. Si solo se considera un control sobre la potencia eléctrica y no se tiene un control sobre las condiciones térmicas, esto tendrá como consecuencia distintas condiciones de operación. La distribución radiométrica de un LED se verá afectada por las variaciones térmicas y la medida de esta variación dependerá del material con el que fue construido el LED, en algunos LEDs la variación de la radiación emitida podría ser mayor que otras [19].

En el caso de la eficiencia radiante de un LED, pequeños cambios de temperatura no influyen mucho en ella. En el caso de la eficacia luminosa de los LEDs, pequeños cambios de temperatura si la afectan gravemente. Esto dependerá del tipo de LED, en el

caso de LEDs que emiten luz verde, su eficacia es prácticamente constante debido a la semejanza que tiene su distribución radiométrica a la curva de la función de la eficiencia luminosa espectral. En el caso de LEDs que tienen un pico de longitud de onda en las pendientes de la función $V(\lambda)$, la eficacia luminosa se ve afectada si hay cambios de temperatura en el LED ya que esto conllevaría a cambios en su distribución radiométrica. En el caso de LEDs que emiten luz óptica en el rojo o azul esto es aún más considerable ya que cambios mínimos de temperatura tienen efectos grandes sobre su eficacia [21].

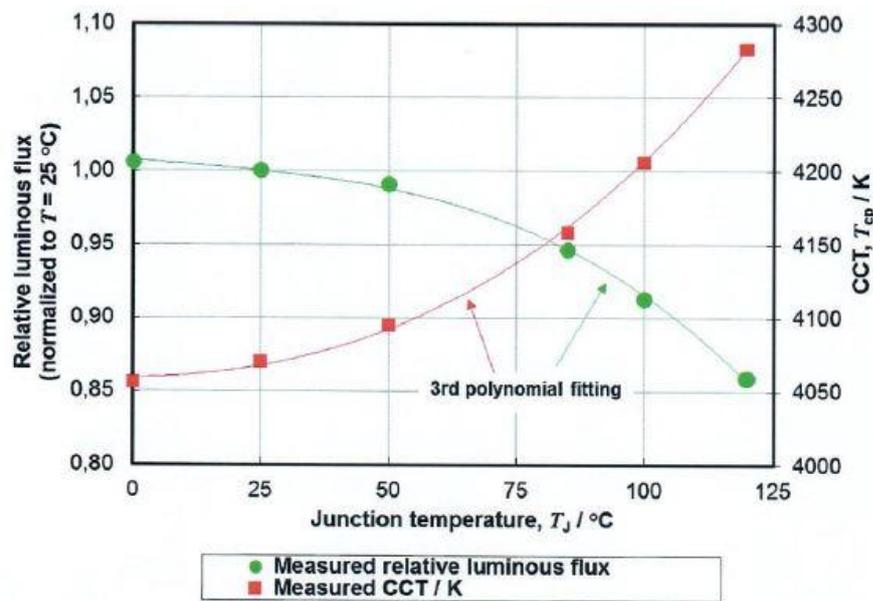


Figura 14: Dependencia de las propiedades ópticas de un LED de alta potencia en función de su temperatura de juntura [21].

2.4. Espectrómetros

Los espectrómetros son dispositivos que se sirven para medir la concentración espectral en cierto intervalo del espectro electromagnético. Generalmente son utilizados para la medición del color, análisis químico, irradiancia, absorbancia, transmitancia, entre otros, lo que hacía que estos equipos sean de gran tamaño. En los últimos años se han fabricado espectrómetros portátiles y compactos, capaces de ser trasladados, realizar mediciones en sitio y en tiempo real y sobre todo de bajo costo [22].

2.4.1. Estructura del espectrómetro

Un espectrómetro está formado principalmente por un sistema óptico de entrada, un monocromador, un sistema de detección y un sistema de procesado de señal [23]. El

monocromador es un mecanismo que sirve para separar la radiación óptica en sus componentes espectrales y es la parte principal en cualquier espectrómetro. Un monocromador típico consta de rendijas de entrada y salida, sistemas ópticos de colimación y enfoque y un elemento dispersor de longitud de onda [24].

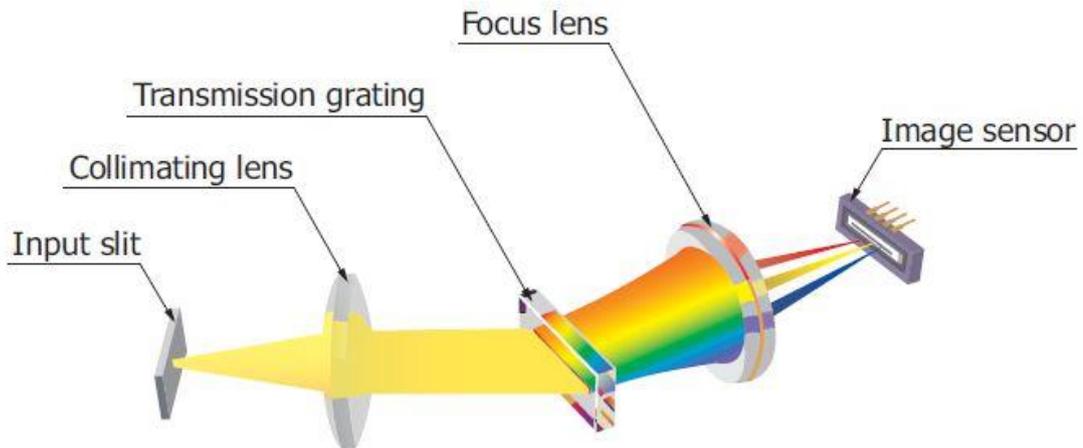


Figura 15: Estructura del sistema óptico de un espectrómetro típico [22].

Rendija de Entrada

La rendija de entrada limita la propagación espacial de la luz que entra al espectrómetro y su imagen es focalizada sobre el sensor de imagen del espectrómetro. Además, el ancho de la rendija de entrada determina la resolución espectral, es decir, se tendrá una mejor resolución espectral si el ancho de rendija es más estrecho. En el caso de la altura de la rendija, este no tiene efecto sobre la resolución espectral pero sí tiene efecto sobre el rendimiento del equipo, ya que puede provocar aberraciones en el sistema óptico del sensor de imagen [22].

Lente o Espejo de Colimación

El lente o espejo de colimación tienen por función guiar la luz transmitida a través de la rendija de entrada hacia una rejilla de difracción. Junto con estos colimadores se utiliza una apertura que limita el flujo de luz que entra al espectrómetro [22].

Rejilla de Difracción

La rejilla de difracción consiste de finas líneas espaciadas grabadas en una superficie, de tal manera que la densidad de estas líneas determinará la separación angular o dispersión de longitud de onda en el monocromador. Por lo tanto, la rejilla de difracción se encarga de separar la luz incidente que llega a ella en sus componentes espectrales, es decir, se encarga de que cada componente de la luz que pasa a través de ella salga a un ángulo de difracción diferente [24].

Lente de Enfoque

El lente de enfoque se encarga de focalizar linealmente la luz difractada que emerge de la rejilla de difracción hacia el sensor de imagen en el orden de longitud de onda [22].

Sensor de Imagen

El espectro que proviene del lente de enfoque es centrado linealmente sobre un sensor de imagen para cada longitud de onda. El sensor de imagen recibe la radiación y la convierte fotoeléctricamente a una señal eléctrica. La salida del sensor indica la cantidad de luz que incide en cada pixel en cierto intervalo de tiempo. Este intervalo de tiempo es llamado *Tiempo de Integración* y es ajustado para mejorar la señal de salida [22].

2.4.2. Características de un espectrómetro

Rango de Respuesta Espectral

El rango de respuesta espectral de un espectrómetro es el rango de longitud de onda en el cual se observa una señal de salida cuando se introduce una señal en la entrada del espectrómetro [22].

Resolución Espectral

La resolución espectral de un espectrómetro se puede definir utilizando el criterio de Rayleigh, o utilizando el método del ancho total a la mitad del máximo también conocido como FWHM por sus siglas en inglés *Full Width at Half Maximum*. La resolución espectral calculada a partir del método FWHM es más conocida y práctica ya que ésta se obtiene a partir del mínimo ancho espectral que está formado por dos valores que tienen el 50% del valor pico de la señal. En la Figura 16 se muestra la definición de FWHM [22].

Exactitud y Precisión de Longitud de Onda

La exactitud de un espectrómetro es importante ya que puede haber una diferencia significativa entre la longitud de onda transmitida y la longitud de onda que informa el software de operación. Aunque la exactitud depende en gran medida de la aplicación y la velocidad de respuesta del espectrómetro, y este se determinará utilizando principalmente lámparas de emisión de líneas espectrales y los resultados deben encontrarse dentro del margen de error según el fabricante. La precisión de un espectrómetro se calcula a partir de la variación de la longitud de onda que muestran los resultados en la repetibilidad de un experimento [24].

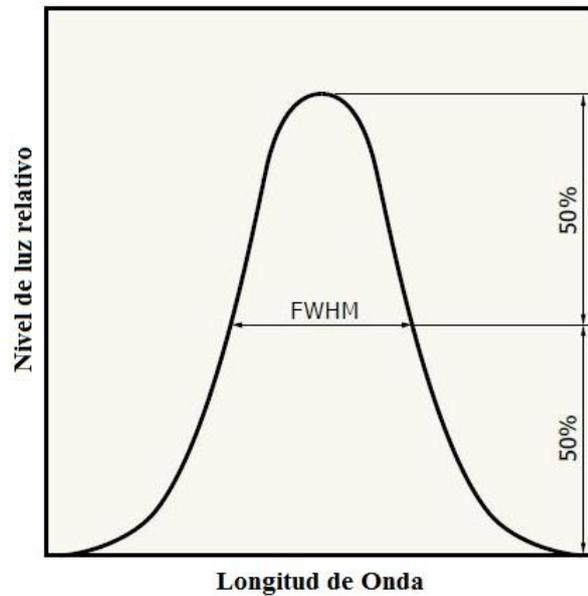


Figura 16: Definición de ancho total a la mitad del máximo (FWHM) [22].

Luz Difusa

La luz difusa puede afectar las mediciones y en esencia la determinación de esta es un límite para las señales espectrales débiles en comparación de señales espectrales fuertes. La luz difusa se genera a partir de luz extraviada que entra al sensor de imagen y que son provocados por factores como una fluctuación de la luz de fondo, imperfecciones en la rejilla de difracción y la reflexión de luz en superficies como el lente, ventana del detector, etc. El nivel de luz difusa aceptable es considerado de acuerdo a la aplicación a la que se encuentra el espectrómetro. En general la luz difusa generará una lectura errónea a causa de luz que cae involuntariamente sobre el detector del espectrómetro [24].

Sensibilidad

La sensibilidad de un espectrómetro se calcula a partir del valor de salida y el nivel de luz incidente sobre el sensor de imagen y se calcula de acuerdo a la ecuación (2.4.1) [22].

$$E(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P(\lambda) \cdot T_{exp}} \quad (2.4.1)$$

Dónde:

$I(\lambda)$: Valor de salida del espectrómetro [cuentas]

$P(\lambda)$: Nivel de luz incidente [W] en cada longitud de onda del espectrómetro.

T_{exp} : Tiempo de integración [s].

Efectos de la Temperatura sobre la Estabilidad del Espectrómetro

Un espectrómetro se considera óptimo si es estable durante todo el tiempo que dure la medición. Para eliminar la variación de temperatura debido a la electrónica se realiza calibraciones periódicas y además se resta a un nivel de oscuridad. La temperatura ambiente es el factor que más influye sobre la estabilidad de un espectrómetro, por lo que al realizar las mediciones se debe tener controlada las condiciones ambientales de tal manera de tener variaciones mínimas de temperatura. Como se muestra en la Figura 17, la salida de oscuridad varía con la temperatura en el interior del espectrómetro, incluso cuando la temperatura del sensor de imagen es controlada con precisión. La estabilidad del espectrómetro también se ve afectada por la radiación de fondo, es decir, debido a la radiación que emiten los objetos dentro del espectrómetro cuya temperatura absoluta sea diferente de cero.

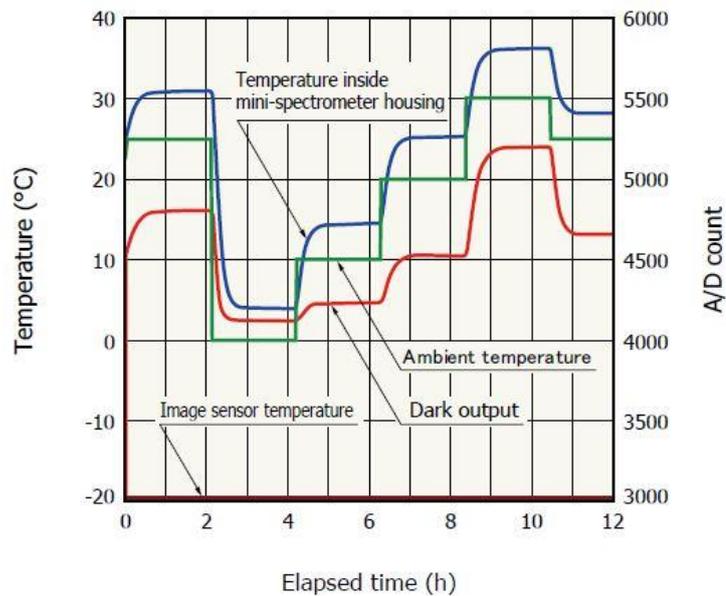


Figura 17: Efectos de la temperatura sobre la señal de salida de un espectrómetro [22].

2.4.3. Software de evaluación

Debido a que el software y la automatización no influyen en los resultados de medición de un espectrómetro, no son consideradas como características propias de un espectrómetro. Aunque por lo general es el software, y no el usuario, quien determina el método de medición y el cálculo. En la Figura 18 se muestra un diagrama esquemático de la conexión de un espectrómetro y una computadora. En la actualidad existen espectrómetros de fácil operación y se conectan a la PC vía conexión USB [22].

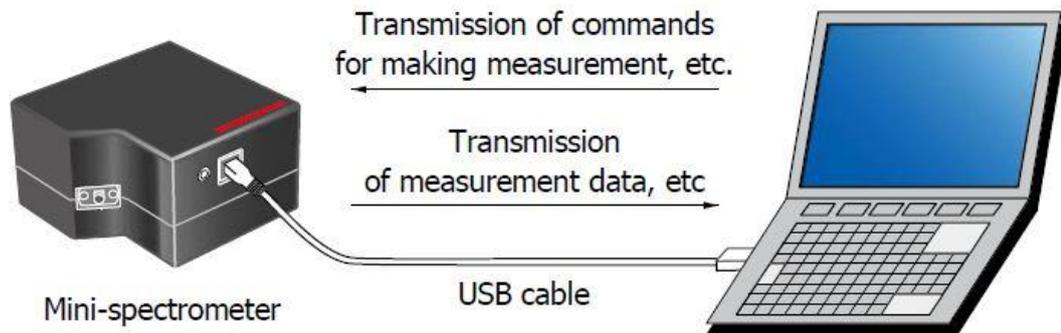


Figura 18: Diagrama de conexión de un espectrómetro a la PC [22].

El software de operación que trabaja con el espectrómetro permite ajustar las condiciones de operación y los parámetros de adquisición de datos del sensor de imagen. Ejemplos de parámetros de adquisición que se pueden ajustar mediante el software de operación son el tiempo de integración, promedio de escaneos, corrección de la lectura de oscuridad, suavizado de la curva espectral, ajustar el rango espectral de medición, entre otros. El software de operación tiene por función principal almacenar y guardar los datos de medición, ajustar las condiciones de medición y mostrar en tiempo real un gráfico de las mediciones [22].

Los parámetros de adquisición de datos que ofrece el software OceanView 1.6.3 permiten ajustar y establecer las condiciones para la toma y procesamiento de datos. Estos parámetros se encuentran en un Menú de Controles y su utilización depende de cada medición en particular. A continuación se detalla la función de cada uno de ellos [18].

Tiempo de Integración

Es el intervalo de tiempo que toma el espectrómetro en realizar el conteo de fotones. Este intervalo de tiempo se puede ajustar de acuerdo a la medición. En caso de obtener bajas intensidades se puede aumentar el tiempo de integración para obtener un mayor conteo de fotones y se pueda graficar una mejor curva de intensidad. En el caso se tenga altas intensidades e incluso la saturación, se puede disminuir el tiempo de integración de tal manera que la curva de intensidad se encuentre dentro de los límites permitidos.

Promedio de Escaneos

Es un número que indica la cantidad de adquisiciones espectrales que debe realizar el espectrómetro antes de que el software muestre el resultado de valor de intensidad, el software promedia todos los valores medidos para cada longitud de onda y lo muestra como una adquisición promedio. Un alto valor del promedio de escaneos mejora la relación señal/ruido.

Ancho de Cajón

Establece el suavizado de la curva espectral utilizando un método en el que promedia los datos espectrales adyacentes, es decir, para cada valor de longitud de onda muestra un valor de intensidad que promedia su valor y cierto número de valores de intensidad adyacentes a la derecha y a la izquierda. Por ejemplo, un ancho de cajón de 2 promedia el valor de intensidad en su longitud de onda junto a 2 valores de intensidad de longitudes de onda adyacentes a la izquierda como a la derecha.

Oscuridad Eléctrica

Activando de esta opción se puede realizar una sustracción del ruido de oscuridad debido a las señales eléctricas en el interior del espectrómetro antes de iniciar las mediciones.

Eje X – Eje Y

Permite ajustar el rango de medición tanto del eje X como del eje Y. Además, en el caso del eje X, permite elegir el tipo de escala y sus unidades como, por ejemplo: la escala de longitud de onda en nanómetros (desde los 350 hasta 1000 nm), la escala en función del número de píxeles (desde 1 a 650 píxeles), en función de la frecuencia (en unidades de GHz) y en función del número de onda (en unidades de cm^{-1}).

2.4.4. Espectrómetro USB650 Red Tide

El espectrómetro USB650 Red Tide es un dispositivo cuya estructura principal se basa en un monocromador que utiliza una rejilla de difracción para la separación de la luz en sus componentes espectrales. Este dispositivo tiene distintas aplicaciones entre ellas la evaluación óptica de fuentes de iluminación. Su campo de aplicación es educacional y laboratorios de investigación, no siendo de alta precisión, comparado con los equipos modernos, ya que su detector usa 650 píxeles que son utilizados en el rango espectral de 350 a 1000 nm, es decir, 1 pixel por nanómetro. Este dispositivo se conecta vía puerto USB a la computadora y es controlado por varios softwares que ofrece el fabricante, entre ellos el OceanView 1.6.3.

En la Tabla 3 se muestran las especificaciones técnicas y características ópticas del espectrómetro USB650 Red Tide que indica el fabricante. En la Figura 19 se muestra el diagrama óptico del recorrido que realiza un haz de luz en el interior del espectrómetro USB650, desde la rendija de entrada hasta su llegada en el sensor imagen.

Tabla 3: Especificaciones técnicas del espectrómetro USB650 Red Tide [25].

Especificaciones	Valor
Dimensiones	89.1 mm x 63.3 mm x 34.4 mm
Peso	190 g
Consumo de Potencia	90 mA @ 5 VDC
Detector	Sony ILX511 CCD
Rango del Respuesta	350 nm – 1000 nm
Apertura de Entrada	25 μm (ancho de rendija)
Resolución Óptica	2 nm (FWHM)
Rango Dinámico	1300:1 para una adquisición simple
Luz Difusa	<0.05% a 600 nm; 0.10% a 435 nm
Conector Fibra Óptica	SMA 905 (0.22 NA)
Tiempo de Integración	10 μs – 15 s
Interfaz	USB 2.0 y USB 1.1

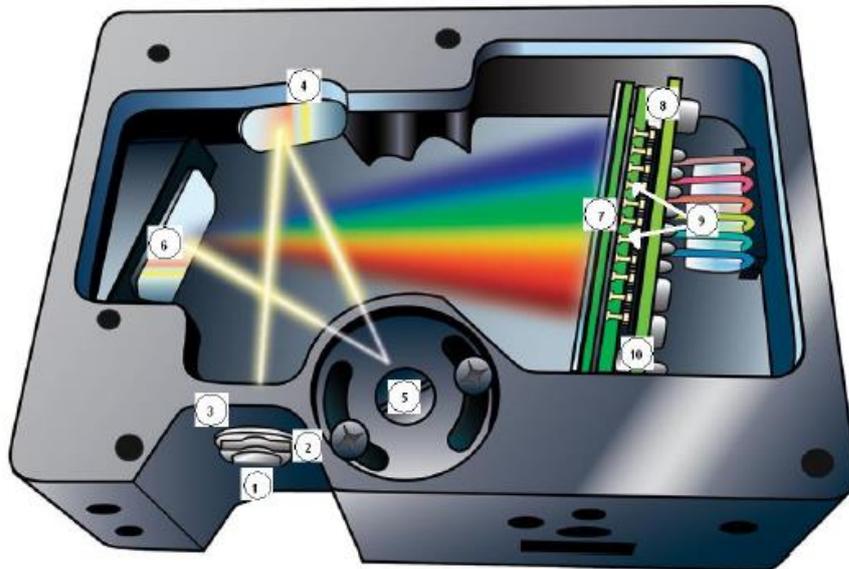


Figura 19: Recorrido de un haz de luz en el interior del espectrómetro USB650 Red Tide [25].

2.5. Método de la Esfera Integradora

Una esfera integradora con un espectrómetro un sistema excelente para la medición del flujo radiante espectral de cualquier fuente de iluminación, a partir del cual se puede obtener el flujo luminoso total y las características de color. El tamaño de la esfera debería ser lo suficientemente grande como para disminuir los errores debido al

obstáculo en el interior de la esfera, debido a la auto-absorción por parte de la propia fuente de evaluación, así como también evitar el incremento de temperatura debido a la radiación emitida por la fuente de evaluación. La esfera integradora debe estar equipada con una lámpara auxiliar, generalmente se usa una lámpara halógena o incandescente, que sea estable en el tiempo para corregir los efectos causados por la auto-absorción. La superficie interna de la esfera debe ser lambertiana y tener una reflectancia aproximada entre el 90% y 98%. Una alta reflectancia es ventajoso debido a que se obtiene una alta señal en el sensor, pequeños errores debido a la no uniformidad espacial, y aumenta la tasa señal/ruido en la región visible [26].

2.5.1. Medición de LEDs

Para la medición de LEDs convencionales utilizando un sistema de esfera integradora con un espectrómetro se puede utilizar dos tipos de geometrías como se muestra en la Figura 20. La geometría 4π se recomienda para todo tipo de LEDs sobre todo para los que tienen emisión hacia atrás. La geometría 2π se puede utilizar cuando el LED no tiene emisión hacia atrás. La ventaja de la geometría 2π es que el LED es fácil de colocar sobre la pared de la esfera, siempre y cuando se asegure que no entre luz del exterior al interior de la esfera [19].

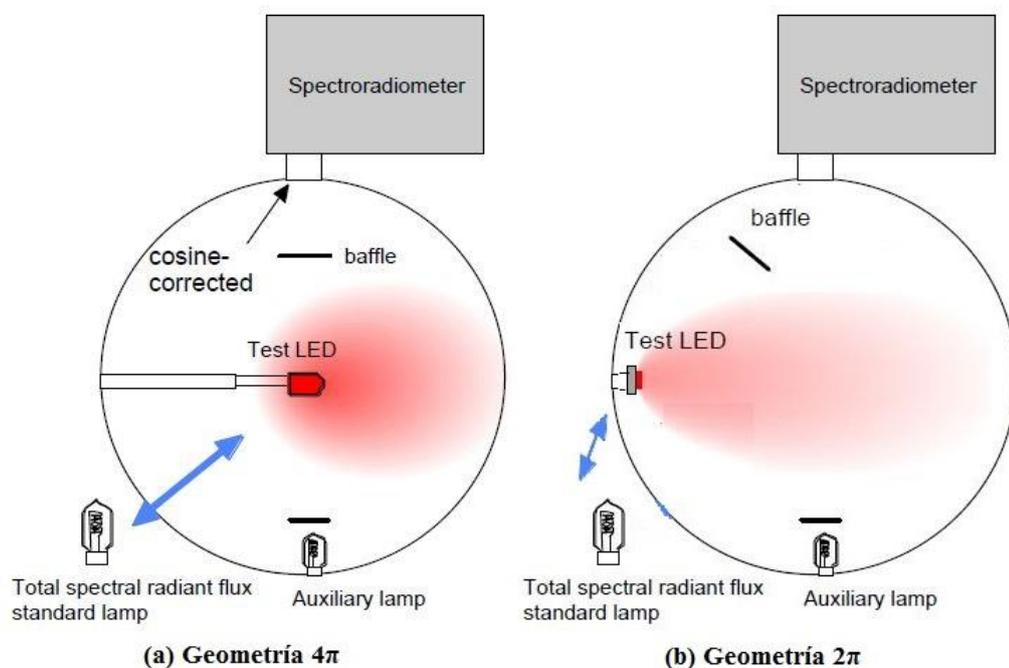


Figura 20: Geometría recomendadas para la medición del flujo luminoso total: (a) Para todo tipo de LEDs, (b) para LEDs que no tienen emisión hacia atrás [19].

2.5.2. Medición de LEDs de alta potencia

Para la medición del flujo radiante espectral de LEDs de alta potencia la geometría 4π no es tan conveniente como la geometría 2π . Los LEDs de alta potencia en principio no emiten radiación hacia atrás debido a que casi todos los LEDs de alta potencia tienen un disipador integrado en la parte de atrás o simplemente operan con un controlador de temperatura, por lo que se tiene mayor ventaja utilizando la geometría 2π ya que el disipador o controlador se encontraría fuera de la esfera.

Al colocar el LED de alta potencia en la pared de la esfera como se muestra en la Figura 21 se debe asegurar de que no haya un contacto directo del disipador con la esfera para evitar variaciones de temperatura, porque como se sabe, los LEDs de alta potencia dependen fuertemente de su temperatura de operación. En el caso de que la esfera solo tenga un solo puerto de entrada, se exige realizar una medición de la lámpara de referencia obligatoria para cada medición [21].

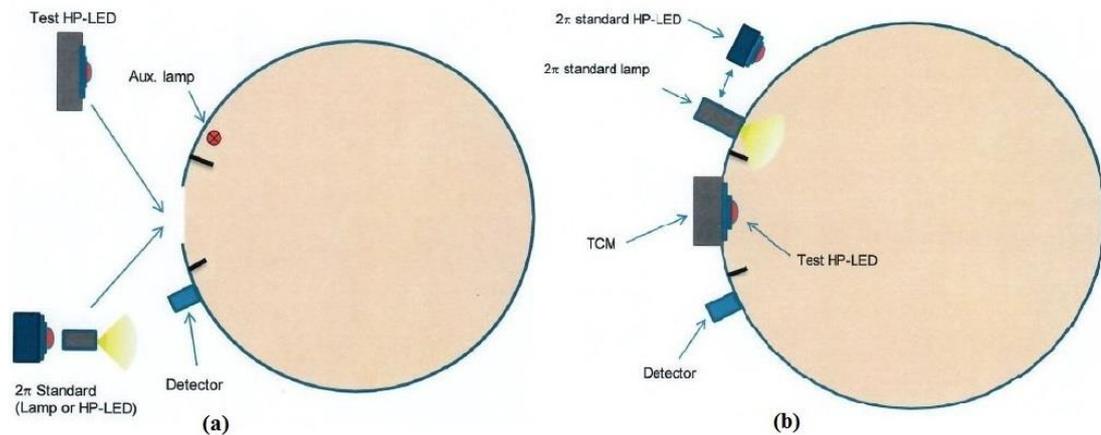


Figura 21: Medición del flujo luminoso total de LEDs de alta potencia utilizando esferas de (a) un solo puerto y (b) de dos puertos [21].

2.5.3. Cantidades Relacionadas a la Distribución Espectral

Distribución Espectral Relativa

Como se observa en la Figura 13, los LEDs emiten radiación sobre un rango de longitud de onda de sólo unas decenas de nanómetros. Las características espectrales de una distribución radiométrica de un LED típico se muestran en la Figura 22. Los valores radiométricos fuera del intervalo de longitud de onda del espectro se consideran cero o despreciables [19].

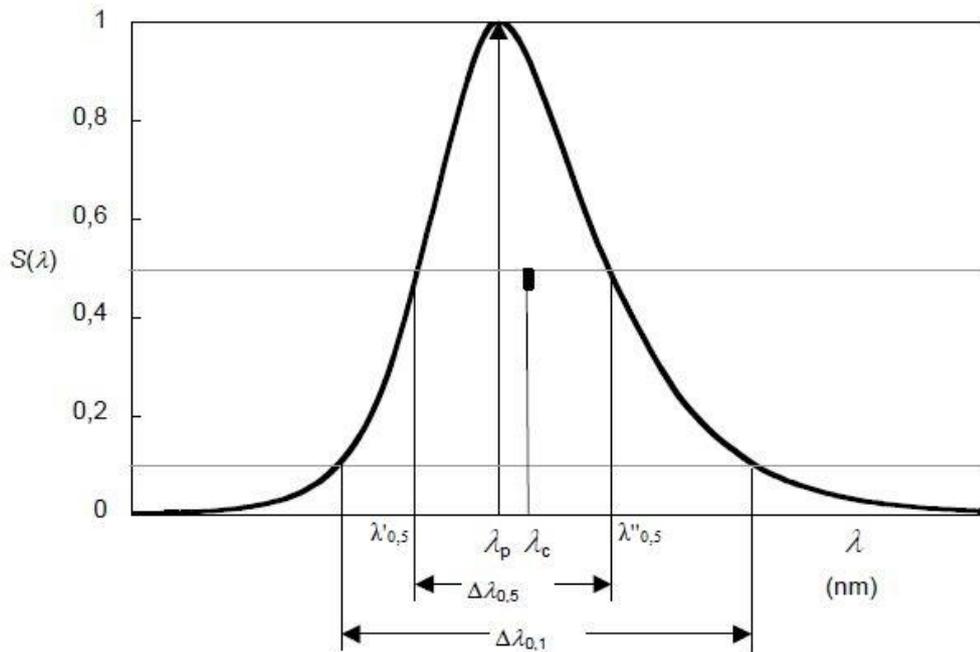


Figura 22: Distribución espectral relativa típica de un LED con sus valores característicos [19].

Considerando que los LEDs emiten radiación óptica en un intervalo de longitud de onda $[\lambda_1, \lambda_2]$, se puede normalizar la distribución radiométrica tomando un valor de longitud de onda $\lambda = \lambda_0$ dentro de ese intervalo cuyo valor radiométrico sea $\Phi_{e, \lambda_0} = \Phi_e(\lambda = \lambda_0)$. La distribución espectral relativa se forma graficando la ecuación (2.5.1) en el intervalo de longitud de onda $[\lambda_1, \lambda_2]$ como se muestra en la Figura 22 [19].

$$S_x(\lambda) = \frac{\Phi_{e, \lambda}}{\Phi_{e, \lambda_0}} \quad (2.5.1)$$

Longitud de Onda Pico

Es la longitud de onda que tiene el máximo valor en la distribución radiométrica y se representa por λ_p . La distribución espectral es generalmente normalizada a este valor por tener un valor máximo de unidad en su distribución espectral relativa [19].

Ancho de Banda Espectral a un Nivel de Intensidad Medio (FWHM)

Es el ancho de banda cuyos valores de su distribución espectral tienen el 50% del valor máximo de intensidad. De acuerdo a la Figura 22 el valor del *FWHM* se calcula según la ecuación (2.5.2) [19]:

$$FWHM = \lambda''_{0,5} - \lambda'_{0,5} \quad (2.5.2)$$

Longitud de Onda Central del Ancho de Banda de Media Intensidad

Es la longitud de onda que se encuentra en el punto medio del intervalo de longitud de onda formado por $[\lambda'_{0,5}, \lambda''_{0,5}]$ y representa por $\lambda_{0,5m}$. Se calcula de acuerdo a la ecuación (2.5.3) [19]:

$$\lambda_{0,5m} = \frac{1}{2}(\lambda'_{0,5} + \lambda''_{0,5}) \quad (2.5.3)$$

Longitud de Onda Centroide

La longitud de onda centroide de una distribución espectral es aquella longitud de onda que es considerada como el centro de gravedad de longitud de onda y se representa por λ_c . Esta longitud de onda característica, a diferencia de las anteriores mencionadas, se ve afectada fácilmente por valores muy pequeños en la cola decreciente de la distribución radiométrica, es decir, su incertidumbre se ve influenciada debido al ruido o luz difusa [19]. Su valor se calcula según la ecuación (2.5.4).

$$\lambda_c = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \cdot S_X(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_X(\lambda) d\lambda} \quad (2.5.4)$$

Capítulo 3.

Procedimiento Experimental

3.1. Montaje del sistema de medición

El sistema de medición se construyó ensamblando una esfera integradora de 75 mm de diámetro a un espectrómetro mediante una fibra óptica. La esfera integradora se obtuvo a partir del equipo PCE-LED 1, en el que se tuvo que extraer el fotodetector de silicio y el filtro de respuesta espectral para lograr la separación total de la esfera. En la Figura 23 se muestra (a) el equipo PCE-LED 1 operando normalmente y (b) luego de extraerse el fotodetector y el cableado eléctrico. Como se observa en aquella figura la base que servía de soporte para la esfera integradora fue retirada por completo.

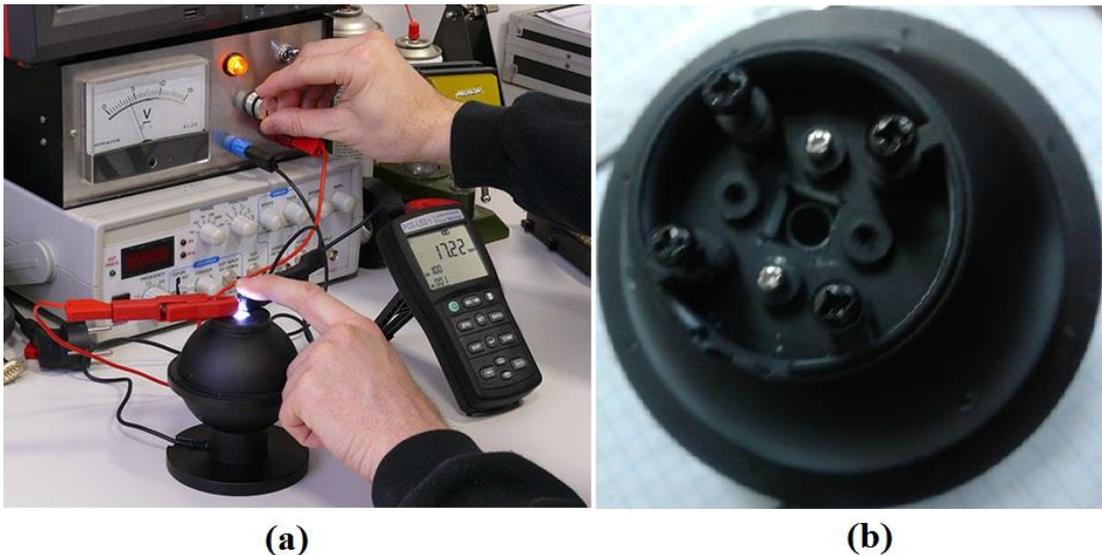


Figura 23: (a) Equipo PCE-LED 1 en condiciones de operación normal y (b) esfera integradora separada del fotodetector y cableado eléctrico.

Un diagrama esquemático de la esfera integradora PCE-LED 1 se muestra en la Figura 24. El puerto de entrada de la esfera integradora tiene distintos adaptadores para distintos tamaños de LEDs. En la Tabla 4 se mencionan algunas características físicas y ópticas de esta esfera integradora PCE-LED 1.

Tabla 4: Características de la esfera integradora PCE-LED 1 [27].

Especificaciones	Valor
Diámetro	75 mm
Recubrimiento Interno	Sulfato de Bario ($BaSO_4$)
Reflectancia	99%
Puerto de Entrada	De 2 mm hasta 25 mm

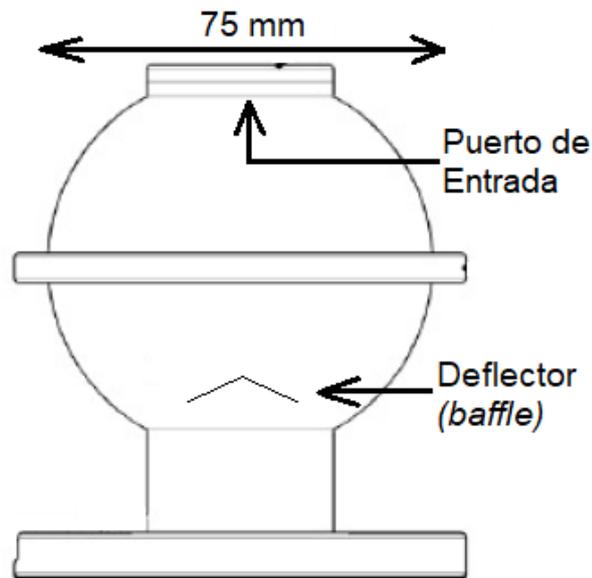


Figura 24: Diagrama esquemático de la esfera integradora PCE-LED 1 [27].

3.1.1. Diseño del adaptador de fibra óptica y el soporte de la esfera PCE-LED 1

Una vez aislada la esfera integradora, se diseñó y construyó un adaptador que sirvió para conectar la fibra óptica a la base de la esfera integradora PCE-LED 1. Este adaptador se ubicó justo en la posición de donde se extrajo el fotodetector de silicio y sus filtros. La construcción del adaptador se realizó en el Taller Mecánico de la Facultad de Ciencias de la UNI. El tipo de conector que se utilizó en el adaptador fue el modelo SMA-905 de acuerdo a las especificaciones de la fibra óptica. El material utilizado para la construcción del soporte fue de aluminio. La rosca de conexión empleada en la construcción es de acero inoxidable.

El diseño y las proyecciones ortogonales del adaptador de conexión de la fibra óptica se muestran en la Figura 25. La circunferencia de 6 mm de diámetro representa la rosca de conexión y las circunferencias de 2 mm de diámetro representan los orificios para fijar dicho adaptador a la esfera integradora PCE-LED 1 empleando pernos.

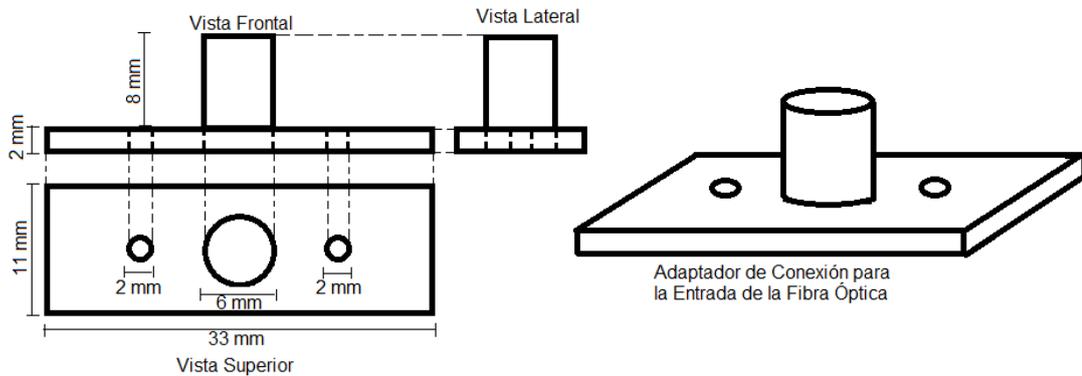


Figura 25: Medidas y proyecciones ortogonales del adaptador de conexión para la fibra óptica.

Luego de construir el adaptador para la conexión de la fibra óptica, se construyó una nueva base para la esfera integradora cuya función es fijar la fibra óptica a la entrada de la esfera reduciendo al mínimo los movimientos y vibraciones y los efectos negativos que éstos puedan ocasionar (ingreso de luz no deseado desde la parte externa e inestabilidad al posicionar la esfera).

En la Figura 26 se muestra el diagrama esquemático de la nueva base de la esfera integradora PCE-LED 1 que se construyó. El cilindro de 200 mm de largo y 10 mm de diámetro en un extremo representa la guía para la fibra óptica. En su extremo final se tiene un diámetro de 9 mm exclusivo para la rosca de entrada de la fibra óptica. El disco de 39 mm de diámetro y 3 mm de espesor simula la nueva base o tapa inferior de la esfera integradora, la cual es fijada empleando 4 pernos igualmente distribuidos en el disco.

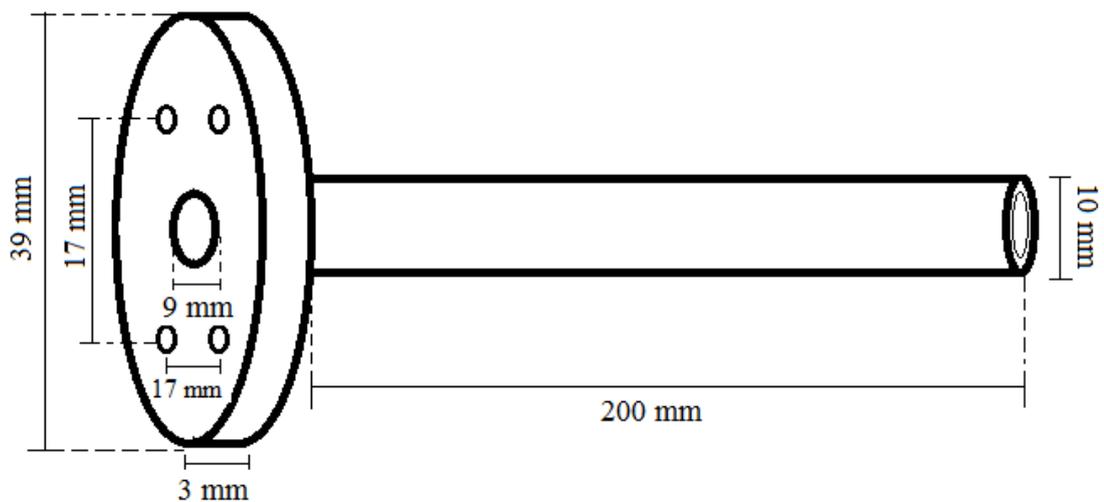


Figura 26: Esquema de la nueva base y soporte de la esfera integradora PCE-LED 1.

3.1.2. Configuración de la medición

La configuración de la medición fue desarrollada especialmente para la evaluación de LEDs. Solo en el caso de LEDs de alta potencia fue necesario utilizar un termopar para medir la temperatura del disipador a la hora de realizar la medición. La configuración para la medición de LEDs se muestra en la Figura 27. Los LEDs fueron alimentados con una fuente de potencia eléctrica DC y operados a una corriente eléctrica constante la cual fue controlada con un multímetro digital de 5½ dígitos y una resistencia Shunt de 10 mΩ.

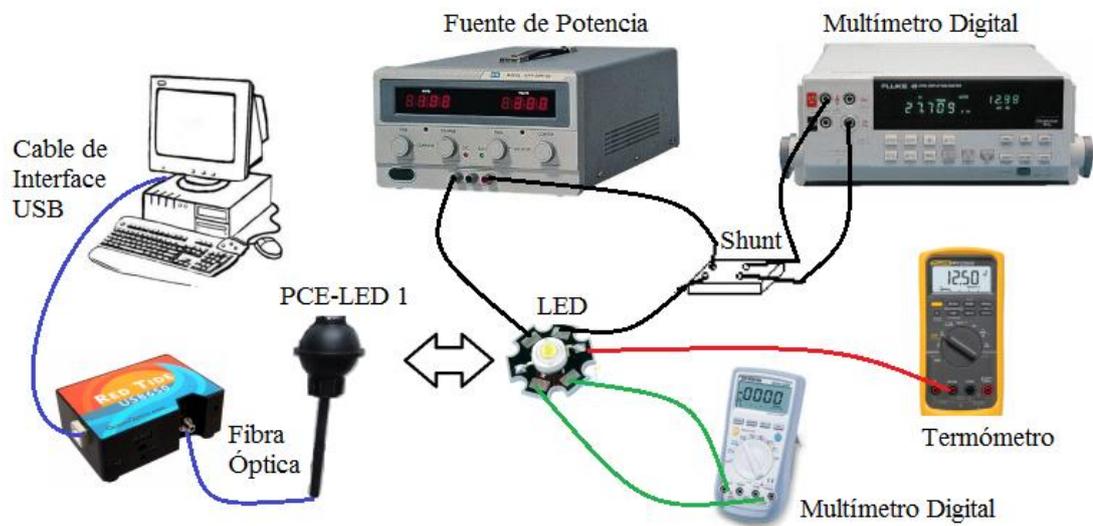


Figura 27: Diagrama esquemático para la medición de LEDs.

La esfera integradora tiene varios tipos de puertos de entrada para la evaluación de distintos tipos de LEDs. El puerto de salida de la esfera integradora está provisto de un obstáculo que impide la incidencia directa de luz, además el puerto de salida está conectado al cable de fibra óptica que lleva la luz recolectada en la esfera hacia la entrada del espectrómetro. El espectrómetro fue conectado a una computadora vía interface USB y el software utilizado para la adquisición de datos fue el OceanView 1.6.3.

Tabla 5: Equipos utilizados en la configuración de medición.

Ítem	Fabricante	Modelo
Fuente DC	Gwisntek	GPR3-510HD
Multímetro	Fluke	45 Dual Display Mul.
Multímetro	Gwinstek	GDM-397
Termómetro	Tech	TM-145
Shunt 10 mΩ	Bader	Manganin
Shunt 50 mΩ	Bulk Metal	CSM2512

El procesamiento de datos y ejecución de resultados se realizó utilizando una hoja de cálculo que fue implementada como parte del trabajo de tesis. Los equipos utilizados para la evaluación de LEDs se muestran en la Tabla 5.

3.1.3. Implementación de una Hoja de Cálculo para el procesamiento de datos

El software OceanView 1.6.3 muestra una curva espectral de intensidad relativa que es ajustada de acuerdo a los parámetros de adquisición que brinda este software. Los datos espectrales obtenidos a partir del software tienen unidades de cuentas por nanómetros y cada dato espectral tiene que ser procesado de acuerdo a la sensibilidad del espectrómetro para cada longitud de onda. En la Figura 28 se muestra el diagrama de flujo de la adquisición y procesamiento de datos y entrega de un informe de resultados.

Se implementó una hoja de cálculo en Microsoft Excel utilizando programación en VBA (*Visual Basic for Applications*), para que recopilé la información de los datos obtenidos con el software OceanView 1.6.3 y los procese, de tal manera que utilizó la sensibilidad del espectrómetro en cada longitud de onda junto a las ecuaciones radiométricas, fotométricas y colorimétricas, y así entregar un informe de resultados en cada evaluación.

El proceso de caracterización del sistema de medición se dividió en dos partes: la calibración de la escala de longitud de onda y la calibración de la escala de intensidad. En la primera se utilizó tres lámparas de emisión de líneas espectrales y en la segunda una lámpara patrón de trabajo con un flujo radiante espectral conocido en la región visible.

3.2. Medición del ruido de oscuridad en el nuevo sistema

Una vez montado el sistema de medición, y antes de iniciar con el proceso de caracterización del sistema, se procedió a medir el ruido de oscuridad que detecta el sensor del espectrómetro USB650, cuando la fuente de iluminación aún no se ha encendido. El ruido de oscuridad se obtuvo para cada longitud de onda en el rango de 350 a 1000 nm, y se calculó promediando 5 mediciones para cada longitud de onda.

A partir de lo anterior se determinó el ruido de oscuridad promedio para todo el rango de trabajo del espectrómetro, y este ruido de oscuridad promedio se sustrajo a cada medición realizada. Además, este ruido de oscuridad promedio también sirvió para determinar que píxeles del sensor se encuentran dañados o defectuosos, siendo así evitados, por lo que el cálculo de su intensidad relativa se realizó en base a interpolaciones de los dos píxeles más cercanos.

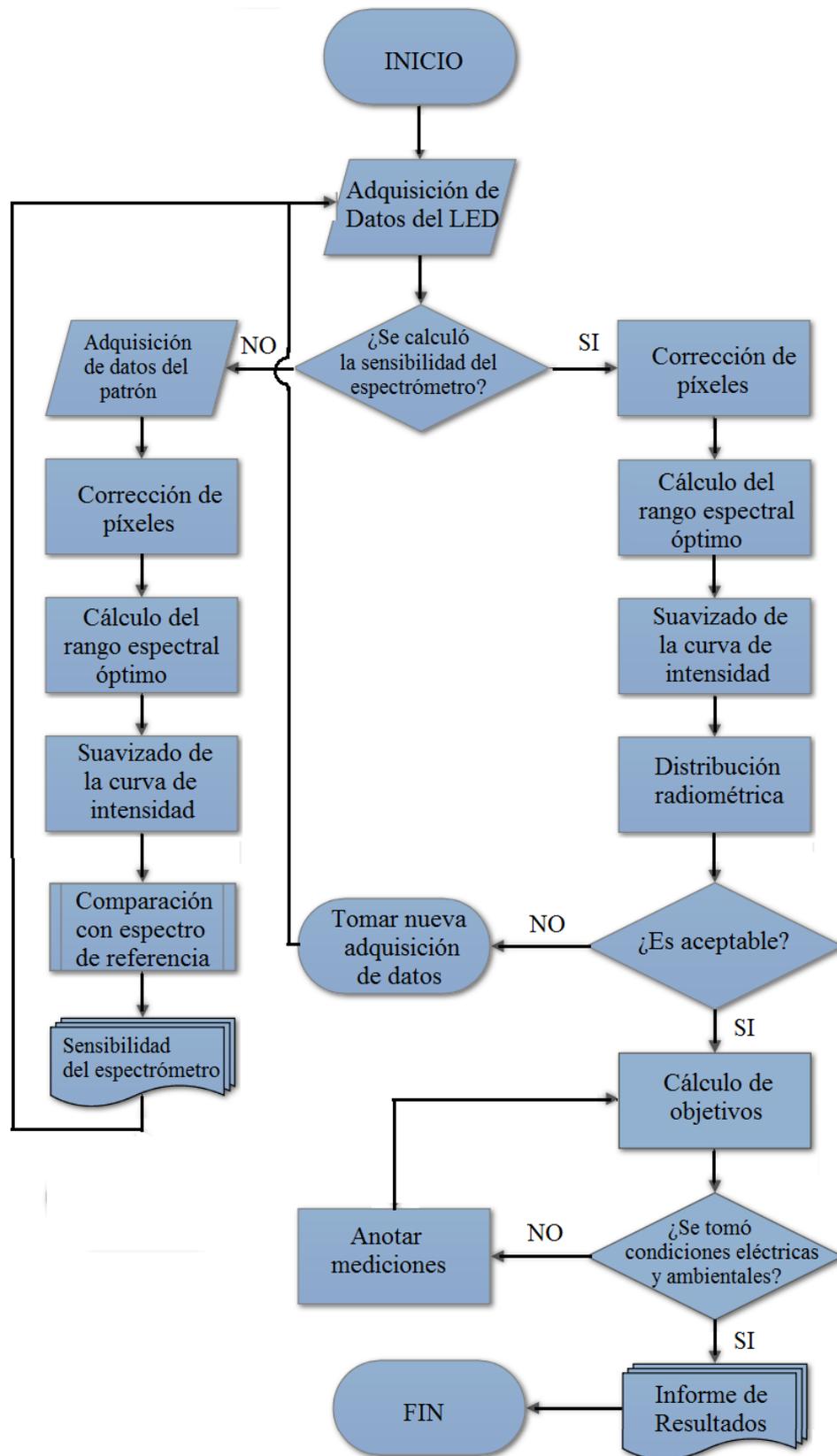


Figura 28: Diagrama de flujo del algoritmo de procesamiento de datos.

3.3. Calibración de la escala de longitud de onda

La calibración de la escala de la longitud de onda del espectrómetro USB650, se realizó evaluando en el sistema de medición montado tres distintas lámparas espectrales, cuyas líneas de emisión espectral corresponden a los espectros del Mercurio, Sodio y Cadmio. Empleando el software OceanView 1.6.3 y ajustando sus parámetros de adquisición, se logra obtener un espectro de líneas claras en el rango visible para cada lámpara espectral. En la Figura 29 se muestra la configuración de medición para la calibración de la escala de longitud de onda.

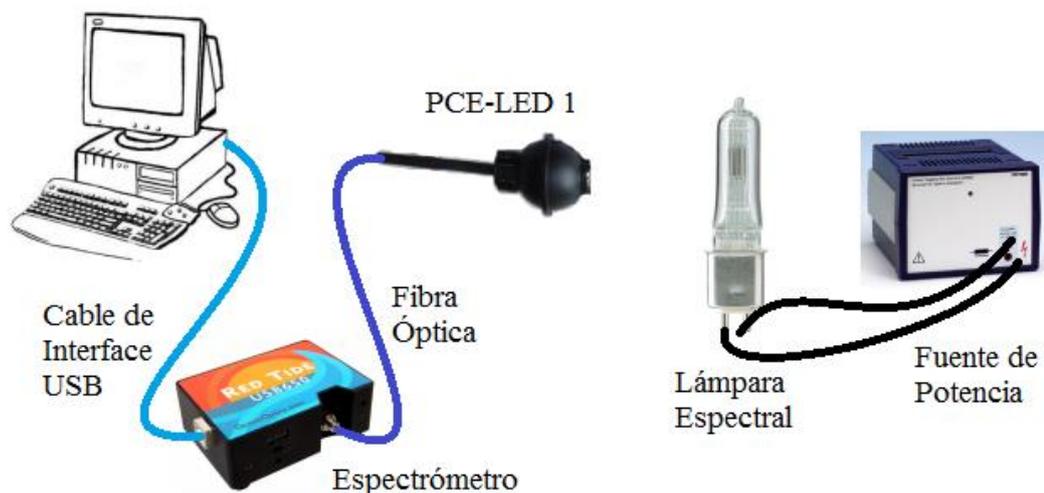


Figura 29: Diagrama de medición para la calibración de la escala de longitud de onda.

3.3.1. Procedimiento para la calibración de la escala de longitud de onda

- Antes de iniciar con la calibración de la escala de la longitud de onda del espectrómetro USB650, se aseguró de tener un ambiente con condiciones ambientales controladas y que no exista un flujo de aire. La variación de temperatura ambiente durante el tiempo que duró la calibración fue de 1 °C.
- Se colocó el sistema de medición montado y la lámpara de emisión de líneas espectrales tal y como se muestra en la Figura 29. Cada lámpara espectral utilizó su propio socket y fuente de potencia (Phywe 13662-97).
- La esfera integradora PCE-LED 1 se colocó de forma tal que su puerto de entrada se encontró a un lado de la esfera y paralela a la lámpara espectral. La proyección del eje principal de la esfera intersecó perpendicularmente el centro geométrico de la lámpara espectral.

- Antes de encender la lámpara espectral, se tomó una medida del ruido de oscuridad empleando el software OceanView 1.6.3. Esta medición se realizó con el fin de determinar la señal que recibe el detector del espectrómetro cuando la fuente se encontraba apagada y así poder restarla a la medición final. Además, esta medición mostró la estabilidad del espectrómetro antes de iniciar la calibración.
- Una vez tomada la medida del ruido de oscuridad, se encendió la lámpara espectral y se esperó un tiempo de estabilización de la lámpara no menor a 20 a minutos antes de iniciar con las mediciones. Durante este periodo, se ajustó los parámetros de adquisición en el software OceanView 1.6.3, de tal manera que se obtuvo la mayor cantidad de líneas espectrales sin que el detector llegase a la saturación.
- Una vez transcurrido el tiempo de estabilización, se tomó 10 mediciones en intervalos de 30 segundos sobre todo el rango espectral. Cada una de las mediciones se guardó en la misma carpeta previamente establecida. Se repitió el mismo procedimiento con las otras dos lámparas de emisión de líneas espectrales.

3.3.2. Adquisición y tratamiento de datos

- Durante el proceso de calibración, la adquisición de datos se realizó empleando el software OceanView 1.6.3. En cada medición se obtuvo un archivo de texto con los valores espectrales en el rango de 350 a 1000 nm a intervalos de 1 nm, cada uno con su respectivo valor de intensidad (en unidades de cuentas).
- A cada medición, se le restó la medida del ruido de oscuridad realizada antes de encender la lámpara espectral. Esta operación se realizó sustrayendo al valor de intensidad (cuentas) en una medición a una longitud de onda dada, el valor de intensidad (cuentas) para la misma longitud de onda cuando se hizo la medición del ruido de oscuridad.
- Luego, en cada medición se ubicó los máximos de intensidad que determinan las líneas espectrales, y se anotó en una tabla el rango de valores de longitudes de onda que contiene en el centro a un pico de intensidad máximo y cuya semi-amplitud es igual a dos veces la resolución espectral del espectrómetro USB650. Entonces, para cada pico de intensidad (línea espectral), de cada lámpara de emisión de líneas espectrales, se obtuvo diez tablas de las diez mediciones realizadas.
- A continuación, se construyó una nueva tabla en la que se colocó, para cada línea espectral, el valor de la línea espectral de referencia seguido de los diez valores de longitud de onda para los que se tiene un máximo de intensidad en cada una de las tablas tabuladas en el paso anterior. Esta nueva tabla tuvo por encabezados: longitud de onda de referencia, medición 1, medición 2, y así hasta la medición número 10.

- Las líneas espectrales de referencia que se encuentran en la región visible del espectro, de algunos elementos, se muestra en la Tabla 6. Éstos valores son los que se tomaron de referencia y con los que se compararon los valores de longitud de onda medidos.
- A continuación, se calculó la longitud de onda promedio de las diez longitudes de onda obtenidas en cada longitud de onda de referencia y se comparó este promedio con su referencia respectiva.

El espectro electromagnético de algunos elementos se encuentra formado por líneas que forman una serie a lo largo de todo el espectro. Las líneas espectrales de emisión que se muestran en la Tabla 6 se encuentran en la región visible y representan los valores de referencia con los que serán comparados los valores de longitud de onda medidos.

Tabla 6: Líneas espectrales de emisión de algunos elementos (longitudes de onda en nanómetros) [28].

Sodio	Mercurio	Helio	Cadmio	Hidrógeno
588.995	404.656	438.793	467.816	656.282
589.592	407.781	443.755	479.992	486.133
	435.835	447.148	508.582	434.046
	491.604	471.314	643.847	410.174
	546.074	492.193		
	576.959	501.567		
	579.065	504.774		
		587.562		
		667.815		

3.4. Calibración de la escala de intensidad

La calibración de la escala de intensidad relativa que se observa en el software OceanView 1.6.3 se realizó utilizando una lámpara patrón de trabajo (IL3) la cual fue calibrada en el equipo LabSphere utilizando la lámpara patrón SCL-050 cuyo certificado de calibración se muestra en el Anexo B. La lámpara patrón de trabajo IL3 tiene un flujo radiante espectral conocido en el rango de 350 a 850 nm.

La configuración de la medición para la calibración de la escala de intensidad se muestra en la Figura 30. De acuerdo a las condiciones de medición del certificado de calibración, la lámpara IL3 debe estar sometida a una corriente constante de 1050 mA. Luego de ajustar los parámetros de adquisición del software OceanView 1.6.3 para obtener una curva suave y que tenga la mayor intensidad posible sin llegar a la saturación, se esperó de 25 a 30 minutos para la estabilización de la lámpara. Luego de ese tiempo se procedió a tomar 10 medidas para la calibración de la intensidad y con los datos obtenidos se calculó la sensibilidad del espectrómetro de acuerdo a la ecuación (2.4.1).

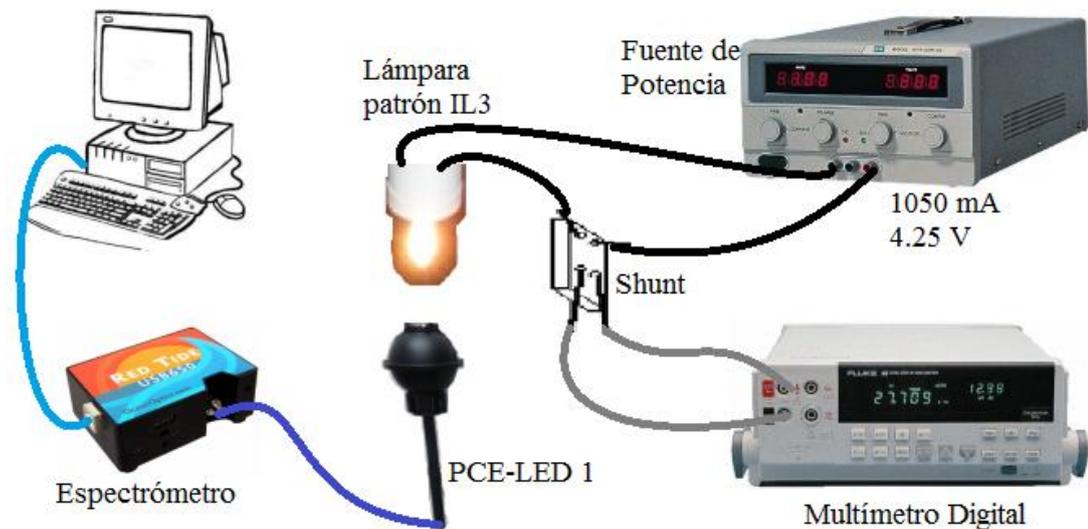


Figura 30: Diagrama de medición para la calibración de la intensidad.

3.4.1. Procedimiento para la calibración de la escala de intensidad

- Antes de iniciar con la calibración de la escala de intensidad del espectrómetro USB650, se aseguró de tener un ambiente con condiciones ambientales controladas y que no exista un flujo de aire. La variación de temperatura ambiente durante el tiempo que duró la calibración fue de 1 °C.
- Se colocó el sistema de medición montado y la lámpara patrón IL3 tal y como se muestra en la Figura 30. Se empleó el puerto de entrada adecuado tal que la lámpara patrón se encontró totalmente dentro de la esfera integradora y su socket estaba ajustado y a la medida de la pared de la esfera, evitando así la entrada o salida de luz al interior de la esfera.
- La lámpara patrón IL3 se evaluó en la misma posición en la cual fue evaluada en el equipo de referencia LabSphere, es decir, de forma vertical y con el bulbo apuntando hacia abajo.
- Se realizó una medida del ruido de oscuridad, luego se encendió la lámpara patrón IL3 y se esperó un tiempo aproximado entre 20 o 30 minutos hasta tener que el flujo luminoso de la lámpara sea estable o haya llegado al estado estacionario. Durante este tiempo, se ajustó los parámetros de adquisición en el software OceanView 1.6.3, de tal manera que el detector del espectrómetro recibió la mayor cantidad de luz sin que éste llegase a la saturación.
- Una vez que el flujo luminoso de la lámpara patrón IL3 estabilizó, se tomó 1 medición empleando el software OceanView 1.6.3 y los datos obtenidos se guardaron en una carpeta previamente establecida.

3.4.2. Adquisición y tratamiento de datos

- Durante el proceso de calibración de la escala de intensidad, la adquisición de datos se realizó empleando el software OceanView 1.6.3. Los valores de intensidad para cada longitud de onda se obtuvieron en un archivo de texto con los valores espectrales en el rango de 350 a 1000 nm a intervalos de 1 nm, cada uno con su respectivo valor de intensidad relativa (en unidades de cuentas).
- A la medición obtenida, se le restó la medida del ruido de oscuridad realizada antes de encender la lámpara patrón IL3. Esta operación se realizó sustrayendo al valor de intensidad (cuentas) en una medición a una longitud de onda dada, el valor de intensidad (cuentas) para la misma longitud de onda cuando se hizo la medición del ruido de oscuridad.
- Luego, como la lámpara patrón de trabajo IL3 tiene un espectro radiométrico conocido en el rango de 360 a 850 nm (obtenido a partir del equipo LabSphere), se procedió a comparar, para cada longitud de onda en el rango de 350 a 1000 nm, la intensidad radiométrica de referencia con la intensidad relativa obtenida con el sistema de medición montado.
- De acuerdo al paso anterior, el intervalo de longitud de onda que se procedió a comparar fue de 360 a 850 nm, teniendo entonces que aquellas longitudes de onda de onda fuera de este intervalo quedaron descartadas y no fueron consideradas.
- Luego, en el intervalo de longitud de onda de 360 a 850 nm, se determinó aquellos valores de longitud de onda cuyos valores de intensidad relativa (en unidades de cuentas) fueron menores o iguales al valor de ruido de oscuridad promedio calculados en el paso anterior. De esta manera se descartó aquellos valores de longitud de onda que no recibieron suficiente radiación como para poder ser comparados por el espectro radiométrico de referencia.
- Una vez que se obtuvo el intervalo de longitud de onda adecuado en el que se podía emplear la ecuación (2.4.1), se calculó la sensibilidad espectral del espectrómetro USB650.

3.5. Evaluación de un LED blanco de alta potencia

Una vez calibrada la escala de longitud de onda y la escala de intensidad del espectrómetro USB650, se procedió a la evaluación de un LED blanco de alta potencia, aplicando las correcciones debido al ruido de oscuridad y a la sensibilidad del espectrómetro en el sistema de medición montado. En la Figura 31 se muestra el diagrama representativo del LED de alta potencia evaluado.

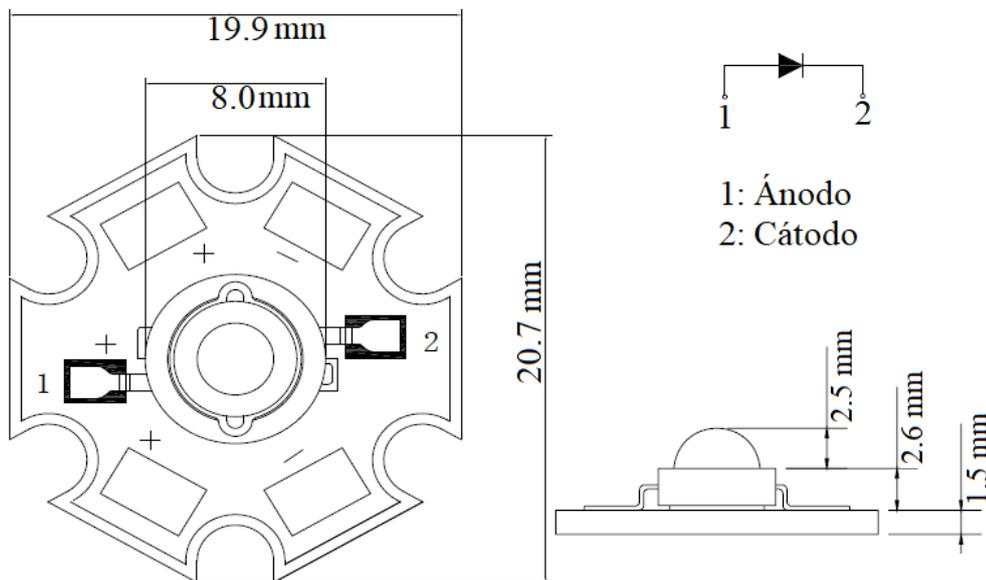


Figura 31: Diagrama esquemático del LED de alta potencia evaluado.

Primero, se realizó la evaluación del LED de alta potencia en el equipo LabSphere, el cual fue utilizado como referencia, empleando los métodos de medición 2π y 4π . Luego, se realizó la evaluación en el nuevo sistema de medición, en el que solo se puede emplear el método de medición 2π debido a las dimensiones de la esfera PCE-LED 1.

En la Tabla 7 se muestran algunas especificaciones del equipo LabSphere tomado como referencia, el cual consta de la esfera integradora LMS-400 y un espectrómetro CDS1100. El método empleado para la caracterización fotométrica de fuentes de iluminación LED es el método de la esfera integradora y los resultados obtenidos con el equipo LabSphere fueron comparados con los resultados obtenidos con el nuevo sistema de medición.

Tabla 7: Especificaciones del equipo LabSphere empleado como referencia.

Esfera Integradora LMS-400	Diámetro	1 m
	Reflectancia del recubrimiento interno	96 – 98% a 600 nm
	Máxima longitud de lámpara	61 cm
	Máxima potencia de lámpara	1500 W
	Mínimo flujo luminoso detectado	0.5 lm
	Máximo flujo luminoso detectado	30 000 lm
Espectrómetro CDS1100	Detector	1044 x 64 CCD
	Rango de respuesta	350 a 850 nm
	Apertura de entrada	600 μ m
	Linealidad	\pm 0.5%
	Precisión de longitud de onda	< \pm 0.3 nm
	Resolución óptica (FWHM)	1.5 nm

3.5.1. Evaluación en el equipo LabSphere usando el método 4π

La evaluación del LED de alta potencia empleando el método de medición 4π en el equipo LabSphere se realizó para 3 posiciones diferentes del LED en el interior de la esfera integradora. La primera posición de evaluación se muestra en la Figura 32,a, donde el encapsulado del LED apuntó directamente al puerto de entrada del espectrómetro (evitando la incidencia directa de luz con el obstáculo de la esfera). En la segunda posición de evaluación, el encapsulado apuntó a lado opuesto del puerto de entrada de luz del espectrómetro, tal y como se muestra en la Figura 32,b. Por último, la última evaluación se realizó tal como lo recomienda la norma CIE 2017:225 [21], en el que el encapsulado del LED forma un ángulo de 90° con el puerto de entrada de luz del espectrómetro, tal y como se muestra en la Figura 32,c.

El procedimiento para la evaluación del LED blanco de alta potencia en el equipo LabSphere se describe a continuación:

- Antes de iniciar la evaluación, se aseguró de tener un ambiente con condiciones ambientales controladas y sin que exista un flujo de aire en el laboratorio. La variación máxima de temperatura ambiente durante el tiempo que duró la medición fue aproximadamente de 2°C .
- Se colocó el LED de alta potencia tal y como se muestra en la Figura 32,a, de tal manera que el encapsulado del LED apuntó hacia el puerto de entrada del espectrómetro.
- Luego, se conectó el LED en serie con un Shunt de $10\text{ m}\Omega$, tal y como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 27, que sirvió para medir y controlar la corriente que pasa a través del LED. Además, se conectó un termopar en el disipador del LED para medir la temperatura del disipador durante la medición. Luego se procedió a cerrar la esfera integradora y se inició con el proceso de medición.
- Se realizó la medición de auto-absorción, dejando primero que el flujo luminoso de la lámpara auxiliar llegue a su estado estacionario en un tiempo aproximado de 20 minutos. Luego se apagó la lámpara auxiliar y se encendió el LED blanco de alta potencia.
- Una vez encendido el LED, se esperó un tiempo aproximado de 30 minutos para que el flujo luminoso del LED llegue a su estado estacionario.
- Empleando el software LightMtrX se obtuvo el espectro radiométrico del LED de alta potencia en el rango de 350 nm a 850 nm, además de sus características fotométricas y colorimétricas.

- Al terminar se apagó la fuente de iluminación LED y se esperó un periodo aproximado de 30 minutos para volver a realizar la medición. En total se realizaron 3 mediciones en las mismas condiciones.
- El procedimiento anterior se repitió para los casos de “b” y “c” de la Figura 32. En la Tabla 8 se indican los parámetros de medición en cada evaluación.

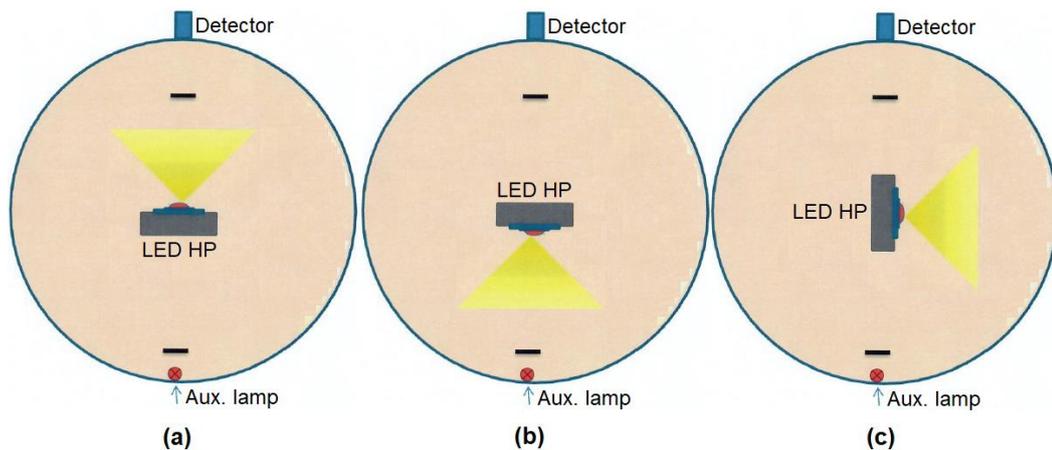


Figura 32: Tres posiciones de evaluación del LED de alta potencia en el método de medición 4π .

Tabla 8: Condiciones de medición del LED blanco de alta potencia en el equipo LabSphere empleando el método de medición 4π .

Parámetros de Medición	Caso “a”	Caso “b”	Caso “c”
Corriente directa (mA)	750	750	750
Voltaje directo (V)	3.33	3.30	3.31
Voltaje de la fuente (V)	3.7	3.7	3.7
Temperatura del disipador (°C)	106	104	106
Temperatura ambiente (°C)	28.0	28.2	28.2
Humedad Relativa (%)	58.0	58.5	58.0

3.5.2. Evaluación en el equipo LabSphere usando el método 2π

El mismo LED de alta potencia se volvió a evaluar en el equipo LabSphere, pero ahora empleando el método de medición 2π . El diagrama esquemático de la medición se muestra en la Figura 21. El procedimiento para la evaluación del LED de alta potencia empleando el método de medición 2π fue similar al procedimiento de evaluación en el método 4π , solo que en esta medición solo hubo una posición, en la pared de la esfera integradora LMS-400. La medición se repitió 3 veces. En la Tabla 9 se indican los parámetros de medición en cada evaluación.

Tabla 9: Condiciones de medición del LED blanco de alta potencia en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2 π .

Parámetros de Medición	Medición 1	Medición 2	Medición 3
Corriente directa (mA)	750	750	750
Voltaje directo (V)	3.30	3.31	3.37
Voltaje de la fuente (V)	3.7	3.8	4.1
Temperatura del disipador (°C)	102	102	102
Temperatura ambiente (°C)	27.0	27.1	28.0
Humedad Relativa (%)	62.0	62.0	60.0

3.5.3. Evaluación en el nuevo sistema de medición

Se evaluó el LED de alta potencia en el nuevo sistema de medición empleando el método de medición 2 π . El procedimiento para su evaluación fue el siguiente:

- Antes de iniciar con la evaluación del LED, se aseguró de tener un ambiente con condiciones ambientales controladas y sin que exista un flujo de aire en el laboratorio. La variación máxima de temperatura ambiente durante el tiempo que duró la medición fue aproximadamente de 2 °C.
- Empleando el puerto de entrada adecuado, se colocó el LED de alta potencia en la esfera integradora PCE-LED 1. El diagrama esquemático de la medición se muestra en la Figura 27.
- Una vez montado el LED en la pared de la esfera integradora PCE-LED 1 y habiendo realizado las conexiones eléctricas correspondientes, se ajustó los parámetros de adquisición del software OceanView 1.6.3 y se realizó la medición del ruido de oscuridad.
- Luego, se encendió el LED y se esperó un tiempo aproximado de 30 minutos para que el flujo luminoso del LED llegue a su estado estacionario.
- Se ajustó los parámetros de adquisición de datos del software OceanView 1.6.3, tales como el tiempo de integración y el suavizado de la curva espectral, y se realizó la medición obteniendo el espectro radiométrico relativo (en unidades de cuentas) en el rango de 350 nm a 1000 nm. Estos datos espectrales se almacenaron en una tabla de datos en la que se indica el número de cuentas que realizó el espectrómetro para cada valor de longitud de onda.
- Luego, utilizando la hoja de cálculo implementada, se procedió a realizar las correcciones debido al ruido de oscuridad y a la sensibilidad del espectrómetro.

- Una vez corregida la curva espectral y obtenido el espectro radiométrico, se procedió a emitir un informe de resultados en el que se muestra el espectro radiométrico en el rango de 410 a 850 nm, el flujo luminoso y las características fotométricas y colorimétricas.
- Al finalizar, se apagó la fuente de iluminación LED. Las condiciones de medición del LED blanco de alta potencia se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10: Condiciones de medición del LED blanco de alta potencia en el nuevo sistema de medición.

Parámetros de Medición	Medición
Corriente directa (mA)	750
Voltaje directo (V)	3.29
Voltaje de la fuente (V)	3.4
Temperatura del disipador (°C)	98.0
Temperatura ambiente (°C)	26.2
Humedad Relativa (%)	62

3.6. Evaluación de un LED verde de alta potencia

En el paso anterior se determinó la forma adecuada de realizar la evaluación de un LED de alta potencia en el equipo LabSphere de tal manera de que los resultados sean reproducibles y puedan ser comparados con los resultados obtenidos en el nuevo sistema de medición montado.

Se evaluó un LED verde de alta potencia en el equipo LabSphere y en el nuevo sistema de medición. En ambos casos se empleó el método de medición 2π y. En la Tabla 11 se muestran los parámetros de medición en cada uno de los equipos.

Tabla 11: Condiciones de medición del LED verde de alta potencia.

Parámetros de Medición	Equipo LabSphere	Nuevo sistema de medición
Corriente directa (mA)	700	700
Voltaje directo (V)	3.41	3.37
Voltaje de la fuente (V)	3.9	3.4
Temperatura del disipador (°C)	113	113
Temperatura ambiente (°C)	28.1	26.5
Humedad Relativa (%)	57	63

Capítulo 4.

Resultados

4.1. Nuevo Sistema de Medición

En la Figura 33 se muestra el sistema de construido a partir de la esfera integradora PCE-LED 1 y el espectrómetro USB 650. En la Figura 33 se observan las mejoras realizadas a la esfera integradora PCE-LED 1 (el nuevo soporte de la esfera para el ingreso de la fibra óptica) y el hecho de que se puede observar en tiempo real el espectro radiométrico obtenido de una fuente de iluminación empleando el espectrómetro USB650 conectado a una computadora portátil. Además, se observan otros equipos necesarios para lograr las mediciones como una fuente de voltaje-corriente, multímetros de precisión, un shunt de 10 mΩ y la fibra óptica QP-400-2-VIS-NIR de color azul.

El nuevo sistema de medición se encuentra ubicado en el Laboratorio de Fotometría de la UNI, y debido a sus dimensiones se usa para la caracterización fotométrica y colorimétrica de pequeñas fuentes de iluminación LED.



Figura 33: Sistema de medición montado empleando la esfera integradora PCE-LED 1 y el espectrómetro USB650.

4.2. Ruido de oscuridad obtenido

El ruido de oscuridad del sistema de medición se muestra en la Figura 34. Estos valores de ruido de oscuridad se obtuvieron para cada longitud de onda, evaluando los valores de intensidad relativa (cuentas) en 5 mediciones realizadas con el sistema totalmente sellado y sin ninguna fuente de iluminación en su interior. De acuerdo a la Figura 34 y según lo calculado en el apartado 5.1, el ruido de oscuridad promedio que cumple para el 98.08% del rango espectral se muestra en la ecuación (4.2.1).

$$\text{Ruido de Oscuridad Promedio} = 8 \text{ cuentas} \quad (4.2.1)$$

Este ruido de oscuridad promedio aplica para cada medición realizada con el nuevo sistema. El valor del ruido de oscuridad promedio se sustrae a cada valor de intensidad para cada longitud de onda cuando se realiza una medición.

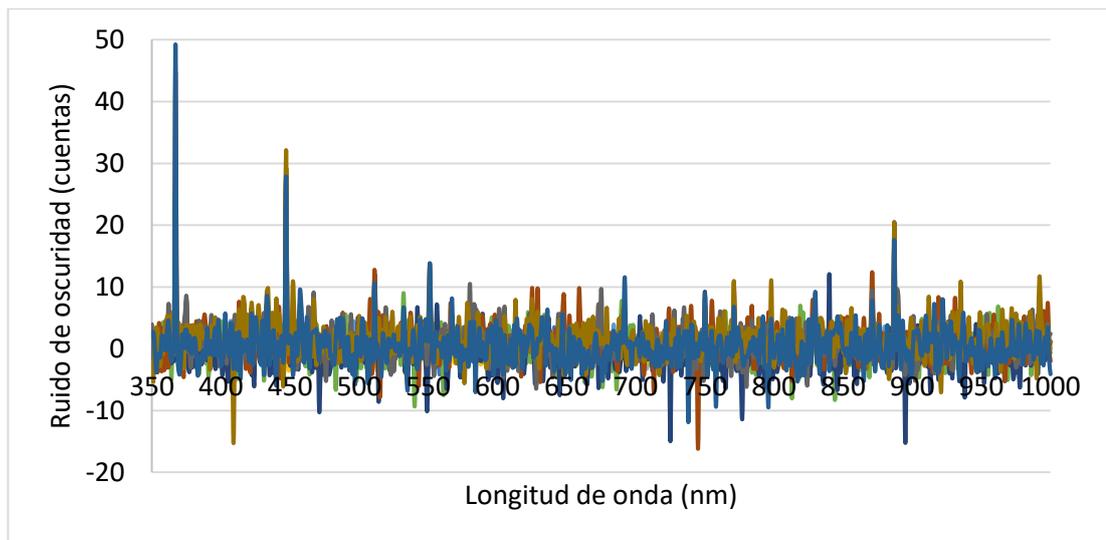


Figura 34: Ruido de oscuridad obtenido en el sistema de medición montado en 10 distintas mediciones.

De los 27 valores de longitud de onda (píxeles) que exceden el número de cuentas promedio, considerado como ruido de oscuridad, se tiene que los píxeles que coinciden con los siguientes valores de longitud de onda 367, 447, 457, 467, 511, 551, 567, 771, 887 y 889 nm exceden en más de un 150% el ruido de oscuridad promedio, por lo que son considerados como píxeles dañados o sobrecalentados. La intensidad relativa para éstos píxeles dañados se calculó a partir de la interpolación de las intensidades de las dos longitudes de onda que se encuentran más próximas a cada una de ellas.

4.3. Resultados de la calibración de la escala de longitud de onda

La primera lámpara de evaluación para la calibración de la escala de longitud de onda fue la lámpara espectral de Mercurio (Hg). La lámpara espectral de Hg genera un espectro de líneas de emisión ya definidos tal y como se muestra en la Tabla 6. El espectro radiométrico relativo (intensidad en unidades de cuentas) obtenido con el software OceanView 1.6.3 se muestra en la Figura 35.

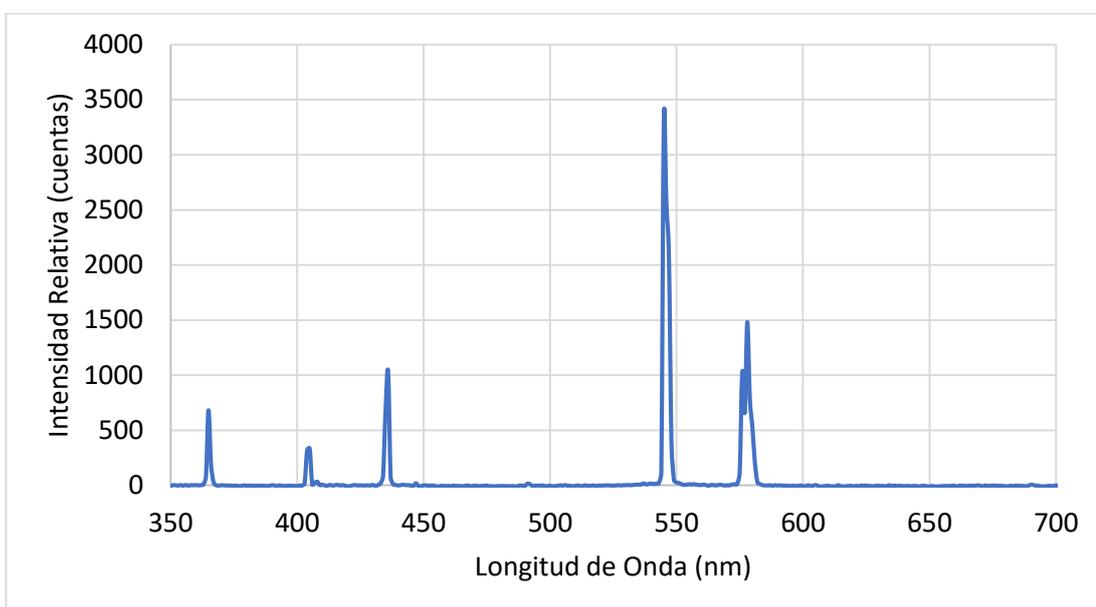


Figura 35: Espectro de líneas de emisión del Hg obtenido con el sistema montado y el software OceanView 1.6.3.

El espectro radiométrico relativo que se observa en la Figura 35, se obtuvo de manera similar para las 10 mediciones realizadas. Luego, para cada línea de emisión de la lámpara espectral de Hg, se construyó una tabla como se muestra la que se muestra en la Tabla 12. Por ejemplo, para la primera línea de emisión del Hg, 404.656 nm según la Tabla 6, se obtuvieron máximos de intensidad relativa al valor de longitud de onda igual a 404 nm en algunas mediciones y 405 nm en otras.

La tabla anterior se realizó para las 10 mediciones realizadas de la lámpara de Hg, para luego tomar de cada medición el valor de longitud de onda promedio en el cual se tiene el máximo de intensidad. Este proceso se repite para cada línea de emisión de referencia, en cada una de las tres lámparas espectrales. En la Tabla 13 se muestra los resultados obtenidos para la lámpara espectral de Hg.

Tabla 12: Máximos de intensidad obtenidos para la primera línea de emisión de referencia de la lámpara espectral de Hg.

Longitud de Onda (nm)	Medición 1 (cuentas)	Medición 2 (cuentas)	Medición 3 (cuentas)	Medición 4 (cuentas)	Medición 5 (cuentas)
402.0	3.40	0.94	1.84	4.74	1.31
403.0	17.15	12.11	17.90	25.31	15.71
404.0	320.74	328.56	324.05	335.96	334.00
405.0	329.21	331.74	328.14	331.29	331.84
406.0	13.81	11.93	8.03	11.11	16.26

Tabla 13: Resultados de la calibración de la escala de longitud de onda empleando la lámpara de emisión de líneas espectrales de Hg.

Longitud de Onda de Referencia (nm)	Longitud de Onda Promedio Obtenido (nm)
404.656	404.5
407.781	408.0
435.835	436.0
491.604	491.0
546.074	545.0
576.959	576.0
579.065	578.0

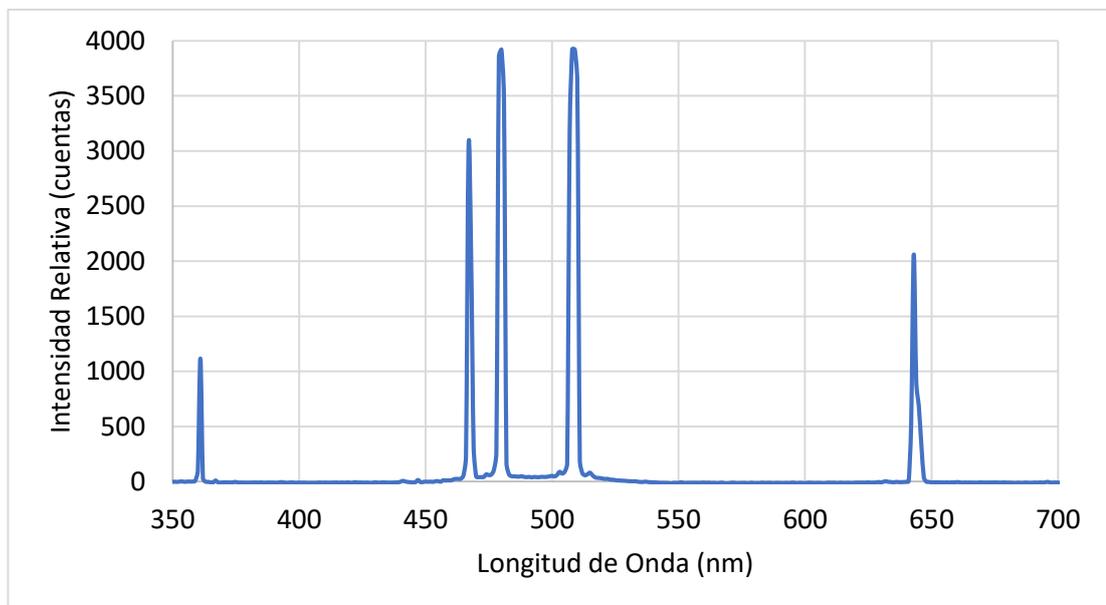


Figura 36: Espectro de líneas de emisión del Cd obtenido con el sistema montado y el software OceanView 1.6.3.

El espectro radiométrico relativo obtenido para las lámparas espectrales de Cadmio (Cd) y Sodio (Na) se muestra en la Figura 36 y en la Figura 37 respectivamente. Así mismo, los resultados obtenidos de los máximos de intensidad de cada línea de emisión de cada lámpara, se muestran en la Tabla 14 y en la Tabla 15 respectivamente.

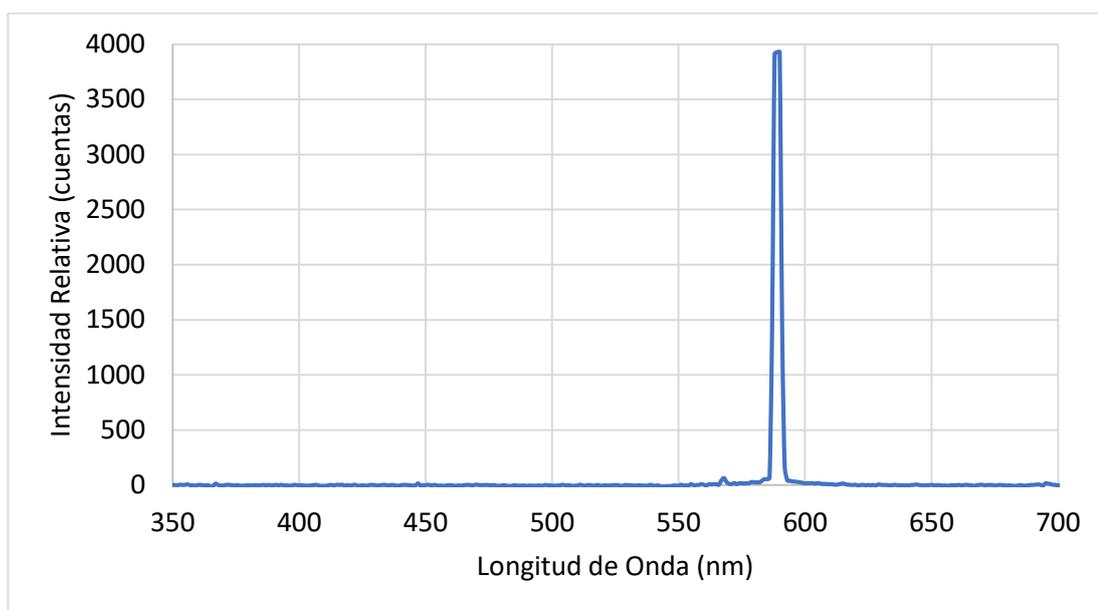


Figura 37: Espectro de líneas de emisión del Na obtenido con el sistema montado y el software OceanView 1.6.3.

En el Capítulo 5 se realizó un análisis de la calibración de la escala de la longitud de onda de acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15 y además se obtiene la incertidumbre de la medición así como una gráfica del error obtenido en función de la longitud de onda.

Tabla 14: Resultados de la calibración de la escala de longitud de onda empleando la lámpara de emisión de líneas espectrales de Cd.

Longitud de Onda de Referencia (nm)	Longitud de Onda Promedio Obtenido (nm)
467.816	467.0
479.992	480.0
508.582	508.0
643.847	643.0

Tabla 15: Resultados de la calibración de la escala de longitud de onda empleando la lámpara de emisión de líneas espectrales de Na.

Longitud de Onda de Referencia (nm)	Longitud de Onda Promedio Obtenido (nm)
588.995	589.0
589.592	590.0

4.4. Resultados de la calibración de la intensidad

El espectro relativo obtenido al evaluar la lámpara patrón IL3 con el sistema de medición montado se muestra en la Figura 38. La curva espectral muestra valores de intensidad relativa (en unidades de cuentas) en el rango de 350 a 1000 nm.

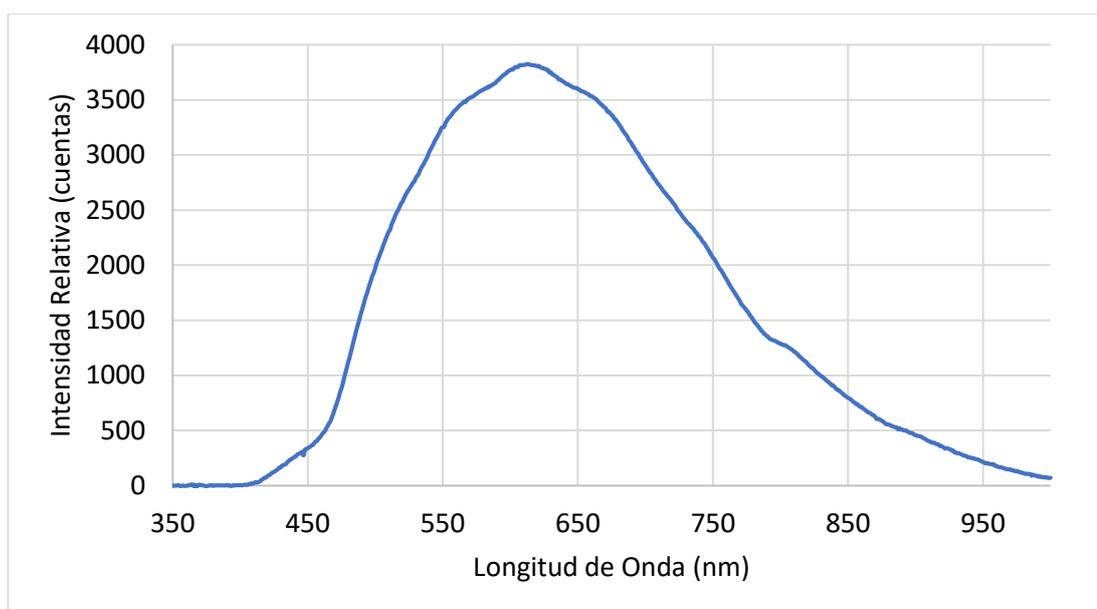


Figura 38: Espectro de intensidad relativa obtenido al evaluar la lámpara patrón IL3 con el sistema de medición montado.

Luego, para descartar aquellos valores de longitud de onda que no recibieron la energía suficiente como para que el detector del espectrómetro realice un conteo de fotones, se determinó aquellos valores de longitud de onda cuya intensidad relativa fue menor o igual al ruido de oscuridad promedio hallado anteriormente. En la Figura 39 se muestra los valores de longitud de onda para los cuales la intensidad relativa es menor o igual al ruido de oscuridad promedio.

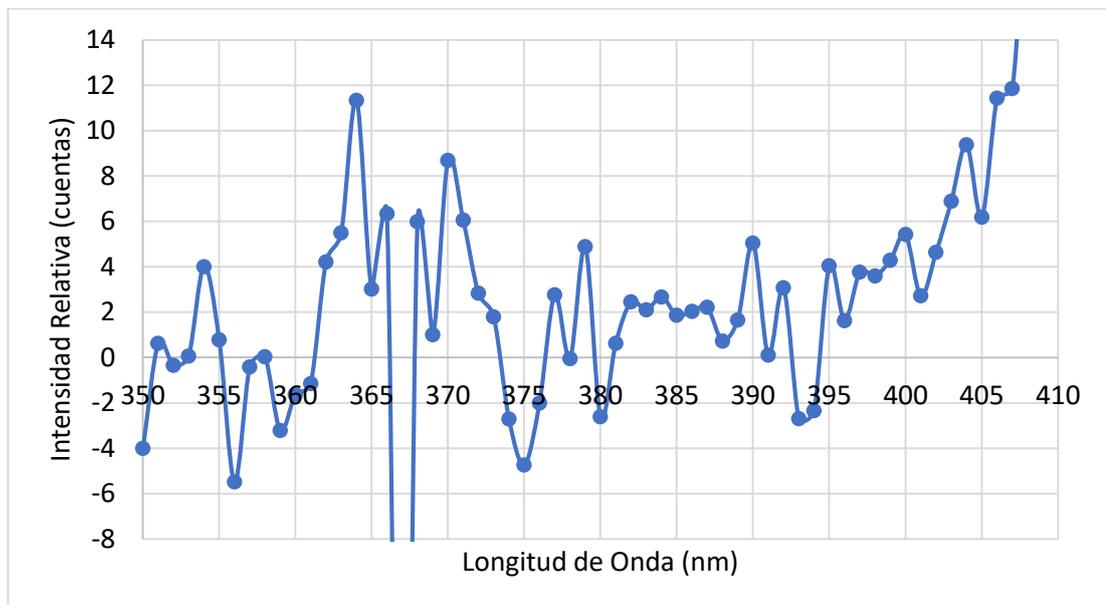


Figura 39: Ruido de oscuridad obtenido al evaluar la lámpara patrón IL3 en el sistema de medición montado.

De acuerdo a la figura anterior, el rango espectral, a partir del cual el sensor del espectrómetro recibe la suficiente radiación como para realizar un conteo de fotones, inicia al valor de longitud de onda de 410 nm hasta los 1000 nm. Considerando la curva espectral relativa obtenida a partir de este valor, se comparó con la curva radiométrica de referencia, obtenido con el equipo LabSphere, en el rango de 350 a 850 nm, tal y como se muestra en la Figura 40 (un espectro radiométrico relativo en unidades de cuentas y otro espectro radiométrico en unidades de W/nm). Luego se empleó la ecuación (2.4.1) y se determinó la sensibilidad espectral del espectrómetro USB650 en el sistema de medición montado.

El rango espectral adecuado de evaluación se consideró a partir de la intersección del intervalo espectral adecuado del sistema de medición montado (de 410 a 1000 nm) con el intervalo espectral de referencia (de 350 a 850 nm), es decir, de 410 a 850 nm.

Empleando el tiempo de integración para el cual se obtuvo la curva espectral de intensidad relativa que se muestra en la Figura 40, y reemplazando su valor en la ecuación (2.4.1), se obtuvo la curva de sensibilidad espectral del sistema de medición montado, tal y como se muestra en la Figura 41.

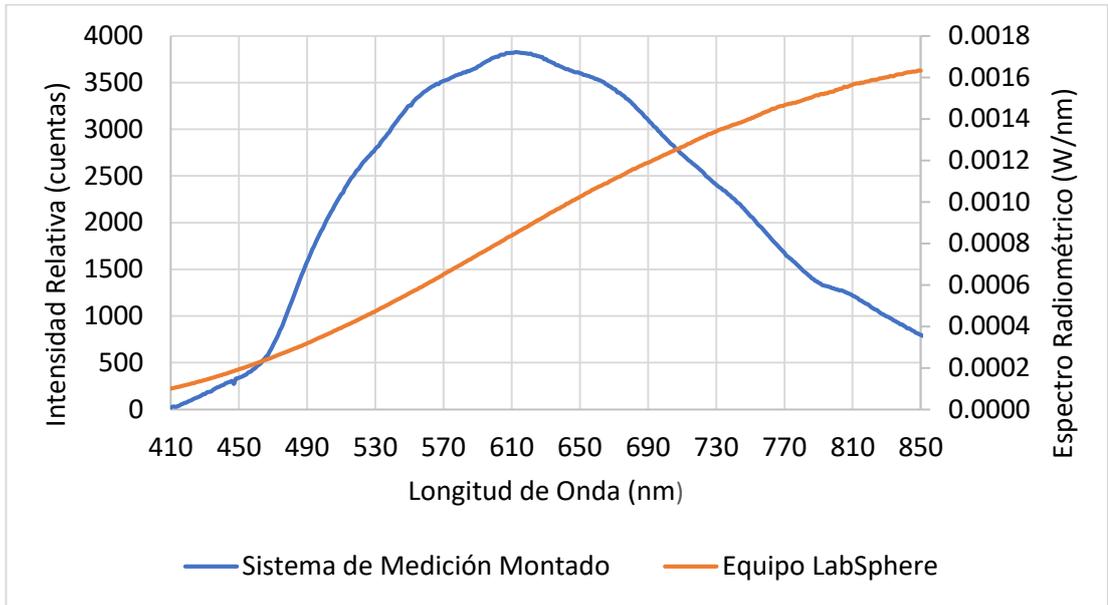


Figura 40: Comparación de las curvas espectrales obtenidas con el equipo de referencia LabSphere, y el sistema de medición montado.

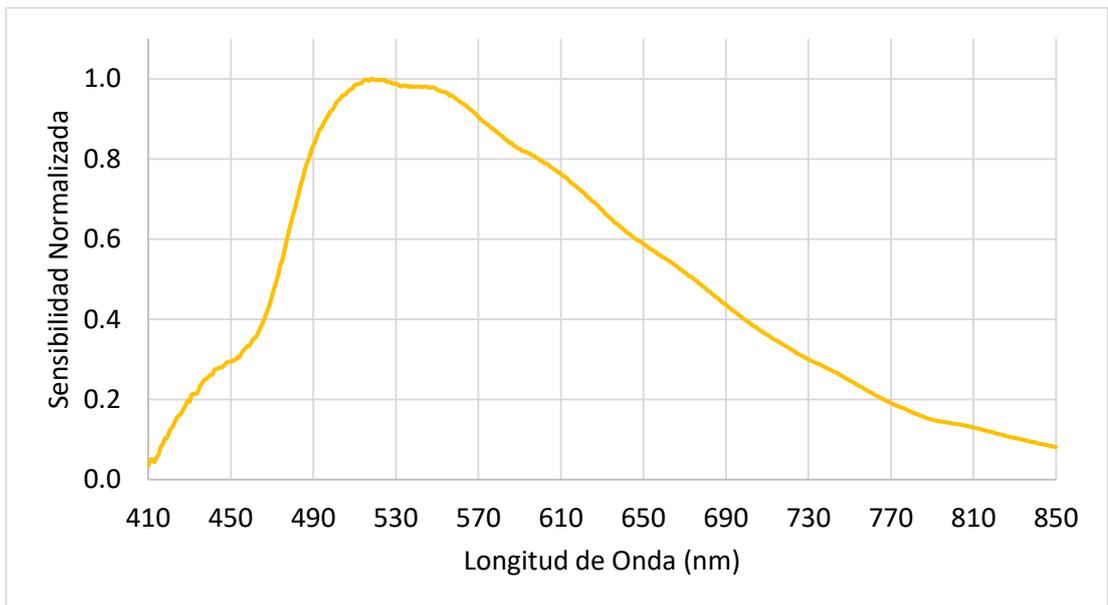


Figura 41: Sensibilidad normalizada a la unidad del espectrómetro USB650 en el nuevo sistema de medición.

4.5. Resultados de la evaluación de un LED blanco de alta potencia

4.5.1. Resultados obtenidos en el equipo LabSphere empleando el método de medición 4π

En la Figura 42 se muestra el espectro radiométrico obtenido para el LED blanco de alta potencia, empleando el método 4π , de las 3 mediciones realizadas, en el rango de 350 a 850 nm. El caso "a" corresponde cuando el encapsulado del LED apuntó hacia el puerto de entrada del espectrómetro, el caso "b" corresponde a cuando el encapsulado del LED apuntó hacia el lado opuesto del puerto de entrada del espectrómetro y el caso "c" corresponde a cuando el encapsulado del LED formó un ángulo de 90° con el puerto de entrada del espectrómetro.

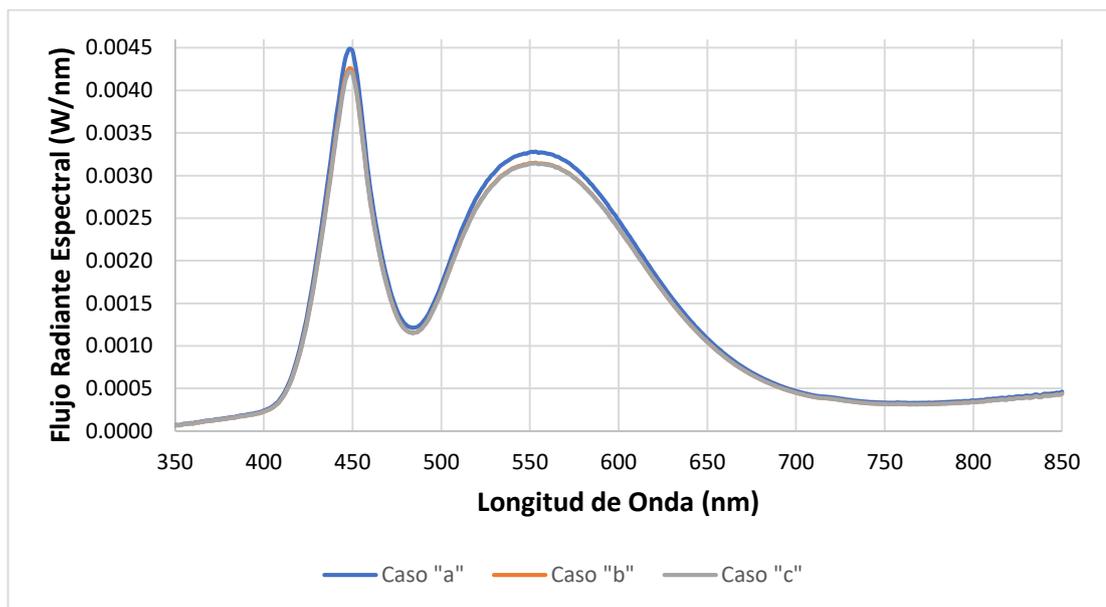


Figura 42: Espectro radiométrico de un LED blanco de alta potencia obtenido en el equipo LabSphere empleando el método de medición 4π .

En la Tabla 16 se muestran los resultados correspondientes a las 3 mediciones realizadas, relacionados a las cantidades espectrales y las características fotométricas y colorimétricas.

Tabla 16: Resultados de la evaluación del LED blanco de alta potencia en el equipo LabSphere empleando el método de medición 4π .

Parámetro	Caso "a"	Caso "b"	Caso "c"
Flujo Radiante (W)	0.6706	0.6412	0.6387
Flujo Luminoso (lm)	196.9	188.9	188.5
Coordenada x	0.3184	0.3193	0.3199
Coordenada y	0.3482	0.3497	0.3504
Coordenada u	0.1947	0.1948	0.1949
Coordenada v	0.3194	0.3200	0.3202
λ (pico) (nm)	448.6	448.6	448.6
λ (centro) (nm)	448.1	448.1	448.2
λ (centroide) (nm)	555.7	555.9	556.1
FWHM (nm)	33.4	33.3	33.4
Pureza (%)	4.5	4.3	4.2
CCT (°K)	6112.0	6063.0	6038.0

4.5.2. Resultados obtenidos en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π

En la Figura 43 se muestra el espectro radiométrico obtenido para el LED blanco de alta potencia empleando el método de medición 2π , en el rango de 350 a 850 nm.

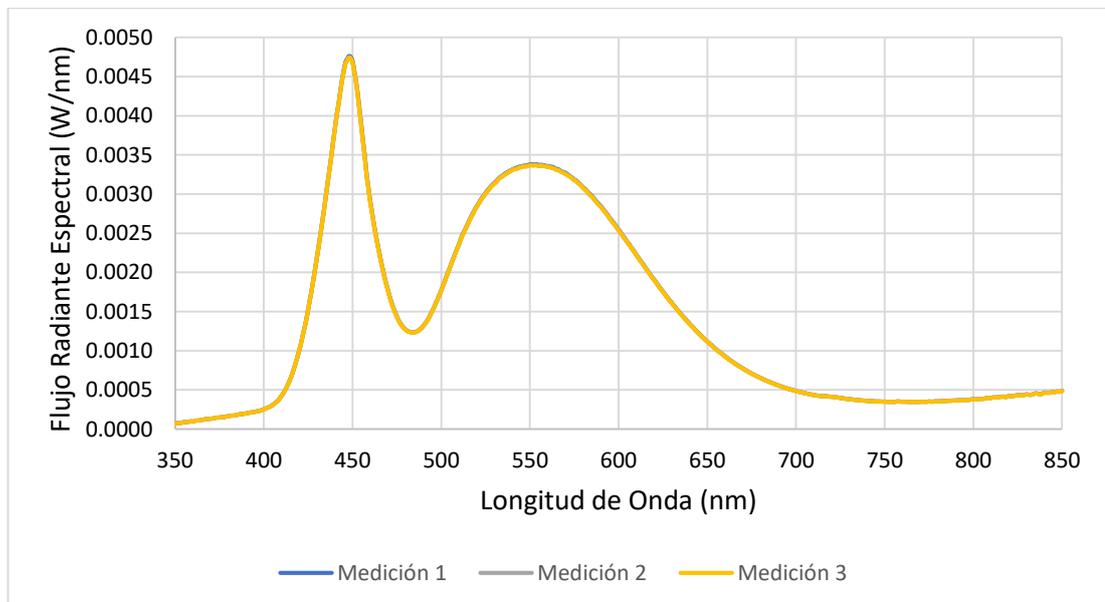


Figura 43: Espectro radiométrico de un LED blanco de alta potencia obtenido en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π .

En la Tabla 17 se muestran los resultados correspondientes a las 3 mediciones realizadas, relacionados a las cantidades espectrales y sus características fotométricas.

Tabla 17: Resultados de la evaluación del LED blanco de alta potencia en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π .

Parámetro	Medición 1	Medición 2	Medición 3
Flujo Radiante (W)	0.6965	0.6945	0.6935
Flujo Luminoso (lm)	203.1	202.5	202.4
Coordenada x	0.3171	0.3171	0.3172
Coordenada y	0.3464	0.3460	0.3462
Coordenada u	0.1946	0.1946	0.1946
Coordenada v	0.3185	0.3185	0.3186
λ (pico) (nm)	448.2	448.2	448.2
λ (centro) (nm)	447.6	447.6	447.6
λ (centroide) (nm)	555.5	555.5	555.5
FWHM (nm)	32.8	32.8	32.8
Pureza (%)	4.9	4.9	4.9
CCT (°K)	6179.0	6180.0	6175.0

4.5.3. Resultados obtenidos en el nuevo sistema de medición

En la Figura 44 se muestra el espectro radiométrico obtenido para el LED blanco de alta potencia con el nuevo sistema de medición, en el rango espectral de 410 a 850 nm.

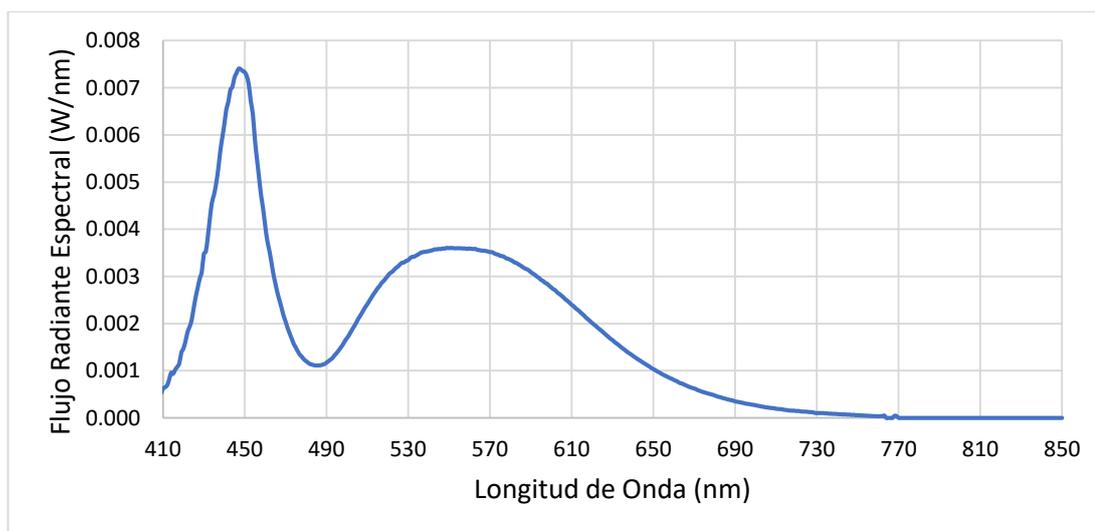


Figura 44: Espectro radiométrico del LED blanco de alta potencia obtenido con el nuevo sistema de medición.

En la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos relacionados a las cantidades espectrales y sus características fotométricas y colorimétricas.

Tabla 18: Resultados de la evaluación del LED blanco de alta potencia en el nuevo sistema de medición.

Parámetros	Resultados
Flujo Radiante (W)	0.7305
Flujo Luminoso (lm)	217.40
Coordenada x	0.2973
Coordenada y	0.3030
Coordenada u	0.1968
Coordenada v	0.3009
λ (pico) (nm)	447.0
λ (centro) (nm)	446.4
λ (centroide) (nm)	527.8
FWHM (nm)	29.8
Pureza (%)	11.07
CCT (°K)	7879.7

4.6. Resultados de la evaluación de un LED verde de alta potencia

El LED verde de alta potencia se evaluó en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π , ya que, en la evaluación del LED anterior, se observó que con la geometría 4π no se obtenía repetibilidad en las mediciones, y los resultados dependían de cómo estaba colocado el LED en el interior de la esfera integradora LMS400.

Al emplear el método de medición 2π , se observó que las mediciones eran reproducibles. El LED verde de alta potencia se evaluó tanto en el equipo LabSphere como el nuevo sistema de medición y los resultados se muestran a continuación.

El análisis y la discusión de los resultados de las mediciones se realizaron en el siguiente capítulo. Los resultados obtenidos con el equipo LabSphere son tomados a partir del software LightMtrX, y los resultados obtenidos con el nuevo sistema de medición se tomaron a partir de la hoja de cálculo que se implementó en el apartado 3.1.3.

4.6.1. Resultados obtenidos empleando el equipo LabSphere

En la Figura 45 se muestra el espectro radiométrico para el LED verde alta potencia, empleando el método de medición 2π , en el rango de 350 a 850 nm.

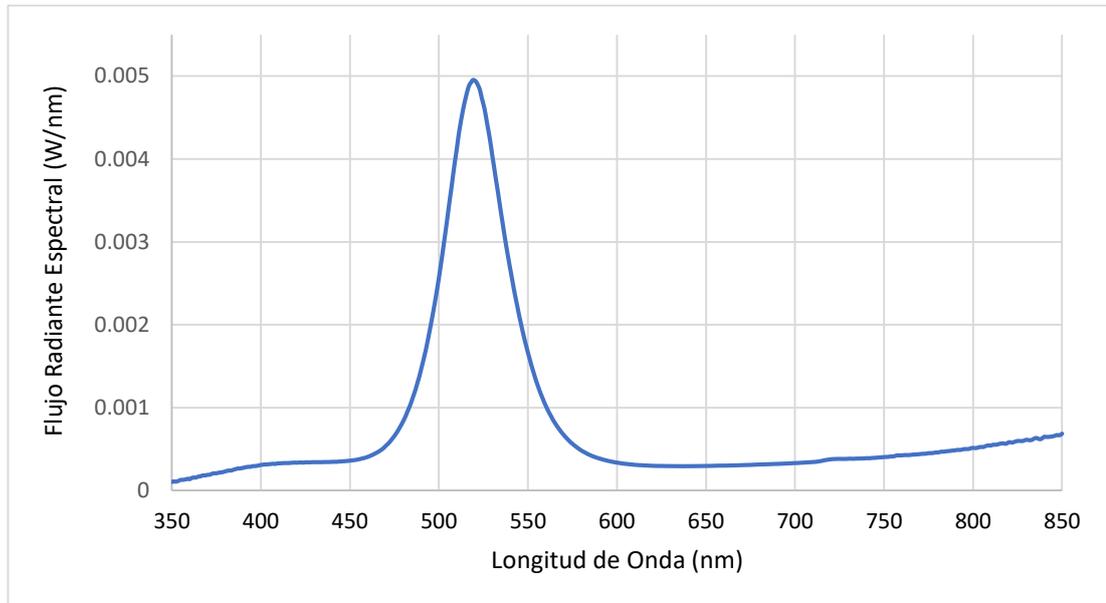


Figura 45: Espectro radiométrico de un LED verde de alta potencia obtenido en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π .

En la Tabla 19 se muestran los resultados obtenidos relacionados a sus cantidades espectrales y sus características fotométricas y colorimétricas.

Tabla 19: Resultados de la evaluación del LED verde de alta potencia en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π .

Parámetros	Resultados
Flujo Radiante (W)	0.3906
Flujo Luminoso (lm)	120.7
Coordenada x	0.2145
Coordenada y	0.5685
Coordenada u	0.0913
Coordenada v	0.3632
λ (pico) (nm)	519.5
λ (centro) (nm)	520.5
λ (centroide) (nm)	571.8
FWHM (nm)	42.4
Pureza (%)	47.0
CCT (°K)	7880.0

4.6.2. Resultados obtenidos empleando el nuevo sistema de medición

En la Figura 46 se muestra el espectro radiométrico del LED verde de alta potencia obtenido con el nuevo sistema de medición, empleando el método de medición 2π , y en la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos relacionados a sus cantidades espectrales y sus características fotométricas y colorimétricas.

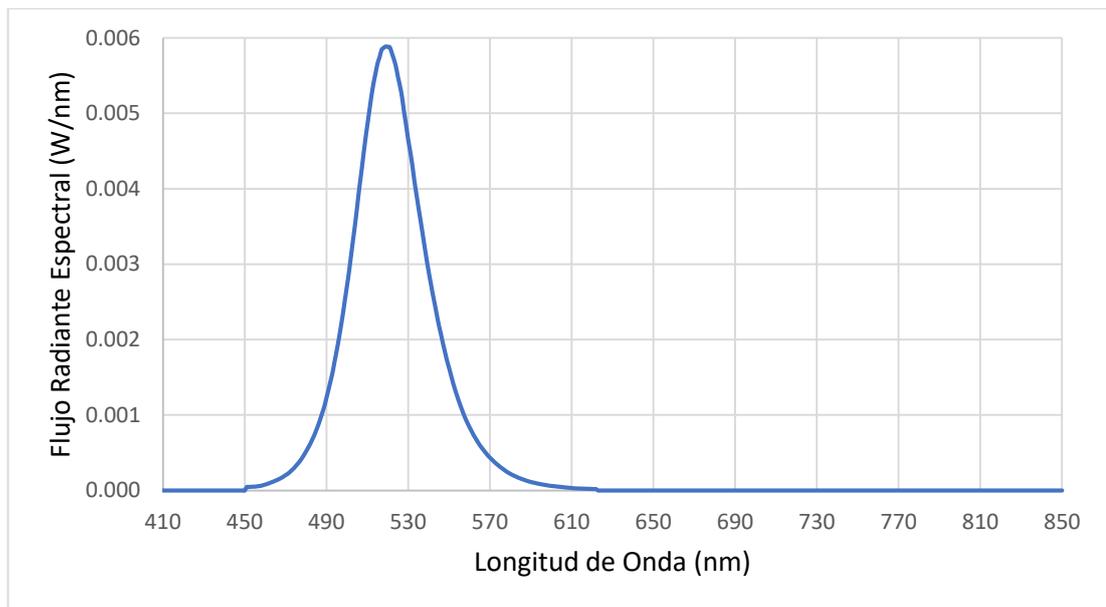


Figura 46: Espectro radiométrico del LED verde de alta potencia obtenido con el nuevo sistema de medición.

Tabla 20: Resultados de la evaluación del LED verde de alta potencia en el nuevo sistema de medición.

Parámetros	Resultados
Flujo Radiante (W)	0.2640
Flujo Luminoso (lm)	121.91
Coordenada x	0.1625
Coordenada y	0.6952
Coordenada u	0.0590
Coordenada v	0.3786
λ (pico) (nm)	519.0
λ (centro) (nm)	520.5
λ (centroide) (nm)	522.4
FWHM (nm)	38.5
Pureza (%)	72.07
CCT (°K)	8222.2

Capítulo 5.

Discusiones

5.1. Cálculo del Ruido de Oscuridad Promedio

El cálculo del ruido de oscuridad promedio se obtuvo aplicando una distribución de frecuencias a los datos correspondientes a 5 mediciones realizadas al nuevo sistema de medición, sin que alguna fuente de alimentación se encuentre encendida en su interior. El total de datos considerados corresponden al número de cuentas para cada longitud de onda (3255 valores), los cuales se agrupan en la Tabla 21, en la que se muestra el número de datos que se encuentran en cierto intervalo de número de conteos. En la Figura 47 se tiene un gráfico de barras que muestra el número de longitudes de onda en función del número de conteos que realizaron.

Tabla 21: Distribución de frecuencias del número de valores de longitudes de onda en función del número de conteos que realizaron.

Intervalo del número de cuentas	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Absoluta Acumulada	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa Acumulada
[0;1>	1840	1840	56.53%	56.53%
[1;2>	720	2560	22.12%	78.65%
[2;3>	350	2910	10.75%	89.40%
[3;4>	178	3088	5.47%	94.87%
[4;5>	62	3150	1.90%	96.77%
[5;6>	45	3195	1.38%	98.16%
[6;7>	12	3207	0.37%	98.53%
[7;8>	18	3225	0.55%	99.08%
[8;9>	6	3231	0.18%	99.26%
[9;10>	1	3232	0.03%	99.29%
[10;11>	1	3233	0.03%	99.32%
[11;12>	3	3236	0.09%	99.42%
[12;13>	3	3239	0.09%	99.51%
[13;14>	0	3239	0.00%	99.51%
[14;15>	1	3240	0.03%	99.54%
[15;16>	0	3240	0.00%	99.54%
[16>	15	3255	0.46%	100.00%

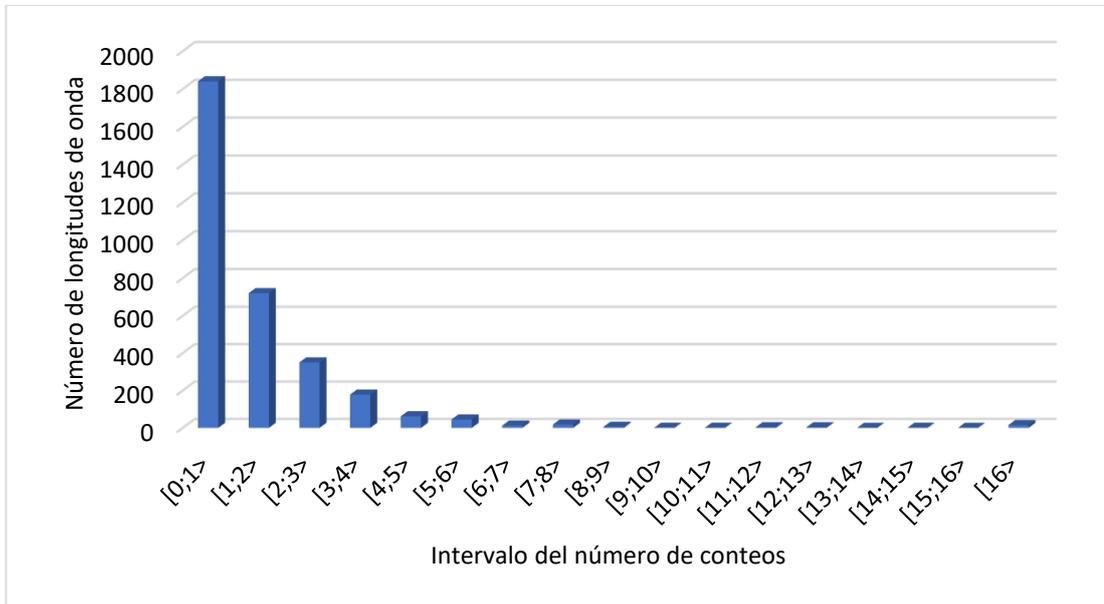


Figura 47: Gráfico de barras correspondiente al número de longitudes de onda en función al número de cuentas que realizaron.

De acuerdo a la Tabla 21 se tiene que el 99.08% de las mediciones realizaron como máximo 8 conteos, teniendo un 0.92% de longitudes de onda que realizó un conteo mayor a 8. Este 0.92% equivale a 30 valores de longitudes de onda, teniendo en cuenta que fueron 5 mediciones, se tiene en promedio que 6 valores de longitud de onda, de los 651 en total, exceden las 8 cuentas. En base a estos resultados se calcula el ruido de oscuridad promedio que se muestra en la ecuación (4.2.1), teniendo la seguridad que este valor cumple para el 99.08% del rango espectral total con el que trabaja el espectrómetro USB650.

Los valores de longitud de onda que exceden las 8 cuentas son considerados píxeles dañados o sobrecalentados, y el valor de su intensidad relativa (conteos) se basa en función a interpolaciones de los dos píxeles más próximos adyacentes.

5.2. Calibración de la escala de longitud de onda

La expresión para el cálculo del error C_λ en la calibración de la escala de longitud de onda es la diferencia del valor de longitud de onda medido y el valor de longitud de onda de referencia tal y como se muestra en la ecuación (5.2.1) [23]:

$$C_\lambda = \lambda_{med} - \lambda_{ref} + \delta\lambda_{mres} \quad (5.2.1)$$

Donde:

- λ_{ref} : Longitud de onda de las líneas de emisión de referencia
- λ_{med} : Longitud de onda promedio de las líneas de emisión medidas.
- $\delta\lambda_{mres}$: Corrección debida a la resolución de la longitud de onda del instrumento.

De acuerdo a la ley de propagación de incertidumbres se tiene que la expresión para la incertidumbre típica asociada es:

$$u^2(C_\lambda) = C^2_{\lambda_{ref}}u^2(\lambda_{ref}) + C^2_{\lambda_{mres}}u^2(\delta\lambda_{mres}) + C^2_{\lambda_{med}}u^2(\lambda_{med}) \quad (5.2.2)$$

Donde los coeficientes c_i son los coeficientes de sensibilidad asociados a la estimación de entrada x_i :

$$C_{\lambda_{ref}} = \frac{\partial C_\lambda}{\partial \lambda_{ref}} = 1; C_{\lambda_{med}} = \frac{\partial C_\lambda}{\partial \lambda_{med}} = 1; C_{\lambda_{mres}} = \frac{\partial C_\lambda}{\partial \delta\lambda_{mres}} = 1 \quad (5.2.3)$$

Entonces, reemplazando la ecuación (5.2.3) en la ecuación (5.2.2):

$$u^2(C_\lambda) = u^2(\lambda_{ref}) + u^2(\delta\lambda_{mres}) + u^2(\lambda_{med}) \quad (5.2.4)$$

Incertidumbre debido a la falta de repetibilidad en la longitud de onda (λ_{med})

Para “n” mediciones efectuadas en las mismas condiciones de medición, su cálculo se basa en la dispersión de los resultados y se obtiene a partir de la desviación estándar experimental de la media de las “n” mediciones, la cual coincide con la incertidumbre típica [23].

$$u(\lambda_{med}) = \frac{s(\lambda_{med})}{\sqrt{n}} \quad (5.2.5)$$

Resolución del espectrómetro a calibrar ($\delta\lambda_{mres}$)

Esta componente de incertidumbre se obtiene a partir del máximo error posible que se puede cometer debido a la resolución del espectrómetro. La resolución del espectrómetro se considera como ± 0.5 veces el último dígito. La incertidumbre típica se halla asumiendo una distribución rectangular [23].

$$u(\delta\lambda_{mres}) = \frac{Resolución}{\sqrt{3}} \quad (5.2.6)$$

Incertidumbre debido a la calibración del patrón (λ_{ref})

Por lo general esta componente de incertidumbre se obtiene a partir del certificado de calibración de la lámpara espectral que sirve de patrón de referencia. En este caso en particular, las lámparas espectrales no necesitan ser certificadas debido a que la longitud de onda viene asociada a fenómenos físicos de excitaciones electrónicas entre estados atómicos. De acuerdo al procedimiento de calibración que se utilizó como guía, la incertidumbre con que se conoce las diferencias de energía entre esos estados es despreciable en comparación con los otros términos de incertidumbre considerados en este proceso de calibración [23].

$$u(\lambda_{ref}) = 0 \quad (5.2.7)$$

Cálculo de la Incertidumbre Expandida

La incertidumbre expandida de la medición, U , se calcula multiplicando la incertidumbre típica $u(C_\lambda)$ por un factor de cobertura “ k ”. Asumiendo una distribución normal para el mensurando y si la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida tiene la suficiente fiabilidad, se utiliza un factor de cobertura “ $k=2$ ”, teniendo así una probabilidad de cobertura aproximada del 95% [23]. En la Tabla 22 se muestra un resumen de las contribuciones de incertidumbre consideradas.

$$U = k \cdot u(C_\lambda) \quad (5.2.8)$$

Tabla 22: Contribución a la incertidumbre combinada en la calibración de la longitud de onda de un espectrómetro [23].

Magnitud de entrada X_i	Mejor estimación de X_i	Incertidumbre típica	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre típica
λ_{med}	Media de los valores	$\frac{s(\lambda_{med})}{\sqrt{n}}$	Normal	1	$\frac{s(\lambda_{med})}{\sqrt{n}}$
$\delta\lambda_{mres}$	0	$\frac{Resolución}{\sqrt{3}}$	Rectangular	1	$\frac{Resolución}{\sqrt{3}}$
λ_{ref}	Valor del certificado	-	-	-1	-
C_λ	-	-	-	-	$\sqrt{\sum u_i^2(y)}$
Incertidumbre Expandida (U)					U = k · u

Calculando el valor del error para cada línea de emisión espectral según la ecuación (5.2.1) y el cálculo de su respectiva incertidumbre de medición de acuerdo a la Tabla 22, se construyó la Tabla 23. En la Figura 48 se muestra el error obtenido en función de la longitud de onda, para las líneas de emisión espectral de referencia evaluadas.

Tabla 23: Resultados de la calibración de la escala de longitud de onda del espectrómetro USB650 en el nuevo sistema de medición.

Longitud de Onda de Referencia (nm)	Longitud de Onda Medido (nm)	Error (nm)	Incertidumbre de medición (nm)
404.656	404.5	-0.156	0.58
407.781	408.0	0.219	0.58
435.835	436.0	0.165	0.58
467.816	467.0	-0.816	0.58
479.992	480.0	0.008	0.58
491.604	491.0	-0.604	0.58
508.582	508.0	-0.582	0.58
546.074	545.0	-1.074	0.58
576.959	576.0	-0.959	0.58
579.065	578.0	-1.065	0.58
588.995	589.0	-0.005	0.58
589.592	590.0	0.408	0.58
643.847	643.0	-0.847	0.58

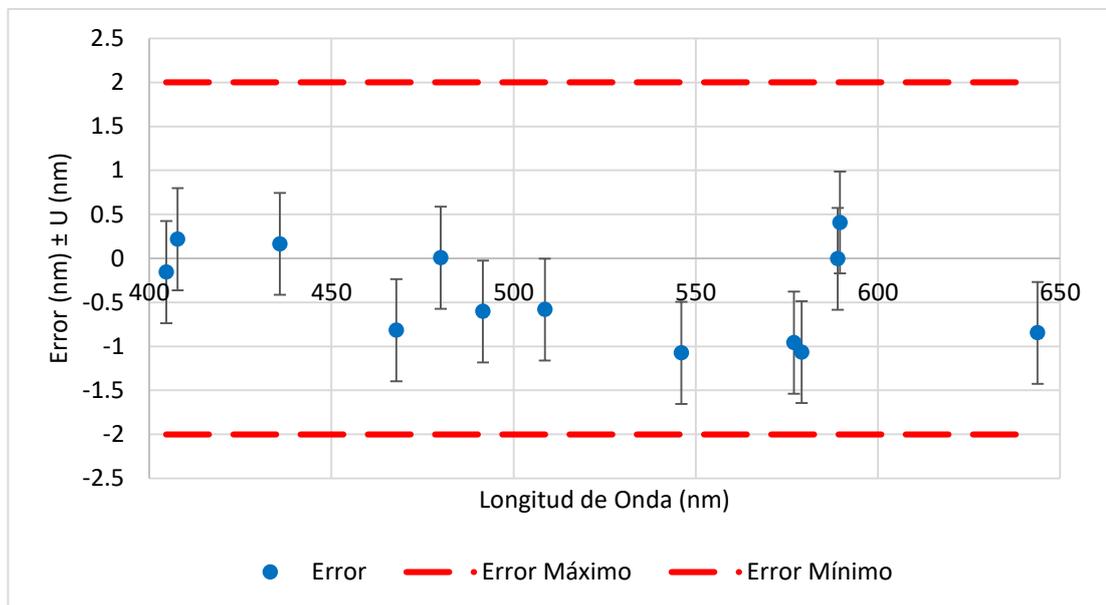


Figura 48: Error e incertidumbre en función de la longitud de onda obtenidos en el nuevo sistema de medición.

El error máximo permitido de la escala de longitud de onda fue tomado como el valor de su resolución espectral ya que el fabricante no lo especifica. Según esto, la escala de longitud de onda se encuentra calibrada y no necesitaría un ajuste.

5.3. Calibración de la escala de intensidad

En la calibración de la escala de intensidad del nuevo sistema de medición, se observó que en el espectro radiométrico obtenido al evaluar la lámpara patrón IL3 (Figura 38), la intensidad relativa para longitudes de onda menores o iguales a los 405 nm estaban por debajo del ruido de oscuridad promedio (Figura 39), por lo que el rango de trabajo inicial del espectrómetro USB650 pasó de los 350 a 1000 nm a un nuevo rango de trabajo que va desde los 406 hasta los 1000 nm.

Luego, considerando que el espectro radiométrico de referencia, de la lámpara patrón IL3, se encuentra en el intervalo de longitud de onda comprendido desde los 350 hasta los 850 nm, la calibración de la escala de intensidad se realizó en aquella parte del espectro en el que se podían comparar ambos espectros radiométricos, es decir, en el rango de 406 a 850 nm (Figura 40).

La curva de sensibilidad del espectrómetro USB650 en el nuevo sistema de medición se obtiene a partir de la ecuación (2.4.1) en el que se compara, para cada valor de longitud de onda, el valor del flujo radiante espectral de referencia con el número de conteos realizado por el espectrómetro USB650. El resultado de tal comparación se muestra en la Figura 41. Los valores espectrales de la curva de sensibilidad fueron empleados para obtener el espectro radiométrico de los LEDs de alta potencia evaluados en el nuevo sistema de medición.

5.3.1. Incertidumbre de medición en la calibración de la escala de intensidad

A partir de la ecuación (2.4.1) se obtiene la expresión de la magnitud de salida en función de las distintas magnitudes de entrada [23]:

$$F = \frac{P_p + \delta P_p + \delta P_{pi} + \delta P_{po}}{I_m + \delta I_{m\lambda} + \delta I_{mres}} \quad (5.3.1)$$

Donde:

- P_p : Valor de intensidad espectral del patrón.
- δP_p : Valor de la deriva del patrón desde su última calibración.
- δP_{pi} : Corrección debido a la incertidumbre de la corriente eléctrica aplicada a la lámpara patrón.
- δP_{po} : Corrección debido a la posición u orientación de la lámpara patrón.
- I_m : Valor de intensidad medio medido por el espectrómetro.

- $\delta I_{m\lambda}$: Corrección de la intensidad medida debido a la incertidumbre de la longitud de onda del espectrómetro.
- δI_{mres} : Corrección debido a la resolución del espectrómetro.

Nuevamente, aplicando la ley de propagación de incertidumbres, considerando el hecho de que todas las magnitudes de entrada son independientes, la incertidumbre típica asociada al factor de calibración es:

$$u^2(F) = C^2_P u^2(P_p) + C^2_{\delta P_p} u^2(\delta P_p) + C^2_{\delta P_{pi}} u^2(\delta P_{pi}) + C^2_{\delta P_{po}} u^2(\delta P_{po}) + C^2_{I_m} u^2(I_m) + C^2_{\delta I_{m\lambda}} u^2(\delta I_{m\lambda}) + C^2_{\delta I_{mres}} u^2(\delta I_{mres}) \quad (5.3.2)$$

Donde los coeficientes c_i son los coeficientes de sensibilidad asociados a la estimación de entrada x_i .

Incetidumbre debido a la calibración de la lámpara patrón (P_p)

Viene expresada en el certificado de calibración correspondiente para cada longitud de onda. En los certificados se indican las incertidumbres expandidas para un determinado factor de cobertura (usualmente $k=2$). Por lo tanto, la incertidumbre típica es:

$$u(P_p) = U_{cert}/k_{cert} \quad (5.3.3)$$

En el caso el certificado de calibración no exprese el valor de incertidumbre en ciertos valores de longitud de onda, se tomará como valor de incertidumbre la mayor incertidumbre de calibración en el rango de calibración correspondiente [23].

Incetidumbre asociada a la deriva de la lámpara patrón (δP_p)

Por lo general en los certificados de calibración se indica el valor de la deriva máxima por tiempo de encendido, aunque usualmente este valor se desconoce. En este caso la incertidumbre típica es [23]:

$$u(\delta P_p) = u_{cert}/k_{cert} \quad (5.3.4)$$

Incetidumbre debido a la corriente eléctrica aplicada a la lámpara patrón (δP_{pi})

Se obtiene registrando el cambio que se produce en la intensidad espectral de la lámpara debido a un cambio en la corriente eléctrica suministrada a la lámpara. Se estableció según el procedimiento OP-003 [23] que el cálculo de esta incertidumbre para cualquier longitud de onda se realiza de acuerdo a la siguiente expresión [23]:

$$u(\delta P_{pi}) = \frac{\Delta E_{\lambda}}{\Delta i} = \left(\frac{650}{\lambda} \times 0.02 \right) \% \quad (5.3.5)$$

Incertidumbre debido a la posición u orientación de la lámpara patrón (P_{po})

Se obtiene registrando los cambios de señal que se produce al rotar ($\pm 1^\circ$) o trasladar (± 1 mm) la lámpara patrón en el interior de la esfera. Esta incertidumbre se suele despreciar cuando la lámpara patrón presenta simetría de revolución [23].

Incertidumbre debido a la falta de repetibilidad de las medidas (I_m)

Su cálculo se basa en la media aritmética de los valores, la desviación estándar experimental y la desviación estándar experimental de la media [23]:

$$u(I_m) = \left(\frac{s(I_m)}{\sqrt{n}} \right) \quad (5.3.6)$$

Incertidumbre debido a la resolución del espectrómetro (δI_{mres})

Se considera como máximo error posible que se puede cometer debido a la resolución del espectrómetro como ± 0.5 veces el último dígito (resolución = 0.5 dígitos). La incertidumbre típica se halla suponiendo una distribución rectangular y dividiendo por $\sqrt{3}$ [23].

$$u(\delta I_{mres}) = \frac{Res}{\sqrt{3}} \quad (5.3.7)$$

Incertidumbre debido a la incertidumbre de la longitud de onda del espectrómetro ($\delta I_{m\lambda}$)

El cálculo de esta incertidumbre se da a partir del valor de la incertidumbre de la longitud de onda del espectrómetro, donde $u(\lambda)$ es la incertidumbre correspondiente a la calibración de la escala de la longitud de onda. Para calcular el valor de la derivada parcial a cada longitud de onda, se ajusta un polinomio a las medidas de intensidad obtenidas con el espectrómetro [23].

$$u(\delta I_{m\lambda}) = \frac{\delta I_m}{\delta \lambda} \cdot u(\lambda) \quad (5.3.8)$$

Cálculo de la Incertidumbre Expandida

La incertidumbre expandida de la medición, U , se calcula multiplicando la incertidumbre típica $u(F)$ por un factor de cobertura “ k ”. Asumiendo una distribución normal para el mensurando y si la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida tiene la suficiente fiabilidad, se utiliza un factor de cobertura “ $k=2$ ”, teniendo así una

probabilidad de cobertura aproximada del 95% [23]. En la Tabla 24 se muestra un resumen de las contribuciones de incertidumbre consideradas.

$$U = k \cdot u(F) \quad (5.3.9)$$

Tabla 24: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de intensidad de un espectrómetro [23].

Magnitud de entrada X_i	Mejor estimación de X_i	Incertidumbre típica	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre típica
P_p	Valor del Certificado	$\frac{U_{cert}}{k_{cert}}$	Normal	C_p	$C_p \cdot \frac{U_{cert}}{k_{cert}}$
δP_p	Valor del Certificado	$\frac{u_{cert}}{k_{cert}}$	Normal	$C_{\delta Ep}$	$C_{\delta Ep} \cdot \frac{u_{cert}}{k_{cert}}$
δP_{pi}	0	$\left(\frac{650}{\lambda} \times 0.02\right)\%$	Normal	$C_{\delta Epi}$	$C_{\delta Epi} \cdot \frac{\Delta E_\lambda}{\Delta i}$
δP_{po}	0	---	---	$C_{\delta Epo}$	---
I_m	Media de los Valores	$\frac{s(I_m)}{\sqrt{n}}$	Normal	C_{I_m}	$C_{I_m} \cdot \frac{s(I_m)}{\sqrt{n}}$
δI_{mres}	0	$\frac{Res}{\sqrt{3}}$	Rectangular	$C_{\delta I_{mres}}$	$C_{\delta I_{mres}} \cdot \frac{Res}{\sqrt{3}}$
$\delta I_{m\lambda}$	0	$\frac{\delta I_m}{\delta \lambda} \cdot u(\lambda)$	Normal	$C_{\delta I_{m\lambda}}$	$C_{\delta I_{m\lambda}} \cdot \frac{\delta I_m}{\delta \lambda} \cdot u(\lambda)$
F	---	---	---	---	$\sqrt{\sum u_i^2(y)}$
Incertidumbre Expandida (U)					U = k · u

Obteniendo la magnitud de entrada F a partir de la ecuación (5.3.1) y el cálculo de su respectiva incertidumbre a partir de la Tabla 24, se construyó la Tabla 25. Los valores de incertidumbre debido a la lámpara patrón son obtenidos a partir de su certificado de calibración, mostrados más adelante. Los valores de incertidumbre debido al nuevo sistema de medición son obtenidos a partir del número de evaluaciones realizadas, a la resolución del espectrómetro y a la incertidumbre de la calibración de la escala de longitud de onda.

Teniendo que la incertidumbre expandida U obtenida en la Tabla 25 es considerada la máxima incertidumbre de medición en todo el rango espectral evaluado (de 406 a 850 nm), esta incertidumbre expandida máxima es considerada para la intensidad de todas las fuentes de iluminación LED que fueron evaluadas en el nuevo sistema de medición.

Tabla 25: Resultados de la calibración de la escala de intensidad del espectrómetro USB650 en el nuevo sistema de medición.

Magnitud de entrada X_i	Mejor estimación de X_i	Incertidumbre típica	Distribución de probabilidad	Coeficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre típica
P_p	0	0.021	Normal	4.493231	0.094357
δP_p	0	0	Normal	4.493231	0
δP_{pi}	0	0.000144	Normal	4.493231	0.000647
δP_{po}	0	0.0002	Normal	4.493231	0.000898
I_m	0	0	---	-4.481986	0
δI_{mres}	0	0	---	-4.481986	0
$\delta I_{m\lambda}$	0	0	Rectangular	-4.481986	0
F	---	---	---	---	0.094
Incertidumbre Expandida (U)					0.188

5.4. Evaluación de un LED blanco de alta potencia

En la primera parte de la evaluación de un LED blanco de alta potencia se determinó el método apropiado para evaluar chips LEDs de alta potencia en el equipo LabSphere, es decir, en cuál de los dos métodos empleados, 2π o 4π , se obtiene repetibilidad en las mediciones.

En la Figura 42 y Tabla 16 se observa que con el método de medición 4π no se obtiene repetibilidad, y que los resultados dependen fuertemente de la dirección hacia a donde apunta la superficie emisora (encapsulado) del LED en el interior de la esfera integradora LMS-400. Se observa que el flujo luminoso varía desde los 188.5 lm hasta los 196.9 lm según la posición del LED.

En la Figura 43 y Tabla 17 se observa que con el método de medición 2π si se obtiene repetibilidad ya que la superficie emisora (encapsulado) del LED siempre apunta hacia el centro de la esfera integradora LMS-400. Además, este método de medición en el equipo LabSphere coincide con el método de medición empleado en el nuevo sistema de medición. En las 3 mediciones realizadas se obtuvieron los siguientes resultados para el flujo luminoso: 203.1 lm, 202.5 lm y 202.4 lm.

En la Tabla 26 se muestra una comparación de los resultados obtenidos con el nuevo sistema de medición (Tabla 18) con los resultados obtenidos en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π (Tabla 17).

Tabla 26: Comparación de resultados obtenidos para el LED blanco de alta potencia.

Parámetro	Equipo de referencia LabSphere	Nuevo Sistema de Medición	Variación
Flujo Radiante (W)	0.6965	0.7305	4.88%
Flujo Luminoso (lm)	203.1	217.40	7.04%
Coordenada x	0.3171	0.2973	6.24%
Coordenada y	0.3464	0.3030	12.52%
Coordenada u	0.1946	0.1968	1.13%
Coordenada v	0.3185	0.3009	5.52%
λ (pico) (nm)	448.2	447.0	0.26%
λ (centro) (nm)	447.6	446.4	0.26%
λ (centroide) (nm)	555.5	527.8	4.98%
FWHM (nm)	32.8	29.8	9.14%
Pureza (%)	4.9	11.07	125.91%
CCT (°K)	6179.0	7879.7	27.52%

De acuerdo a éstos resultados se tiene que a pesar que el rango espectral de medición del espectrómetro USB650 es menor al del espectrómetro CDS1100 y considerando que la radiación para longitudes de onda mayores a los 750 nm no fue detectada por el sensor del espectrómetro USB650, el flujo radiante y correspondiente flujo luminoso obtenido con el nuevo sistema de medición son mayores.

Los puntos que más influyen en esta variación de resultados son dos y son los siguientes:

- La diferencia de tamaños entre la esfera LMS-400 de referencia (1 metro de diámetro) y el de la esfera PCE-LED1 del nuevo sistema de medición (75 mm de diámetro).
- La temperatura del disipador del LED durante la evaluación en el nuevo sistema de medición fue de 98°C, 4°C menos que la temperatura medida durante la evaluación en el equipo LabSphere de referencia.

5.5. Evaluación de un LED verde de alta potencia

En la Tabla 27 se muestra una comparación de los resultados obtenidos con el nuevo sistema de medición (Tabla 20) con los resultados obtenidos en el equipo LabSphere empleando el método de medición 2π (Tabla 19).

Tabla 27: Comparación de los resultados obtenidos para el LED verde de alta potencia.

Parámetro	Equipo de referencia LabSphere	Nuevo Sistema de Medición	Variación
Flujo Radiante (W)	0.3906	0.2640	32.41%
Flujo Luminoso (lm)	120.7	121.91	1.00%
Coordenada x	0.2145	0.1625	24.24%
Coordenada y	0.5685	0.6952	22.28%
Coordenada u	0.0913	0.0590	35.37%
Coordenada v	0.3632	0.3786	4.24%
λ (pico) (nm)	519.5	519.0	0.09%
λ (centro) (nm)	520.5	520.5	0.00%
λ (centroide) (nm)	571.8	522.4	8.63%
FWHM (nm)	42.4	38.5	9.19%
Pureza (%)	74.0	72.07	2.60%
CCT (°K)	7880.0	8222.2	4.34%

Al igual que en el caso anterior, las correcciones debido a la no uniformidad espacial en el interior de la esfera integradora PCE-LED1 influye fuertemente en las mediciones, a pesar de que la temperatura del disipador fue la misma en cada medición.

Las características espectrales no se ven afectadas en este caso ni en el anterior, lo que demuestra que los resultados obtenidos en la calibración de la escala de longitud de onda del espectrómetro se encuentran dentro de tolerancia.

5.6. Análisis del flujo luminoso y la temperatura del LED

Tal y como se menciona en el apartado 2.3.4, la temperatura del LED influye fuertemente en la radiación emitida por éste. Para tal caso se realizó mediciones de la temperatura del chip LED verde alta potencia y su flujo luminoso desde que se encendió hasta que alcanzó su estado estacionario empleando el método de medición 2π en el equipo LabSphere. En la Tabla 28 se muestran los datos obtenidos y en la Figura 49 la tabulación de éstos, verificándose lo observado en la Figura 17.

Tabla 28: Flujo luminoso obtenido para diferentes valores de la temperatura del disipador en un LED verde de alta potencia.

T _{disipador} (°C)	Flujo Luminoso (lm)
40	116.5
62	112.6
77	110.0
85	107.7
88	106.8
90	106.2
91	106.0
92	105.8
95	105.3
98	104.6
107	102.6
109	102.0
111	101.6
112	101.4
112	101.3

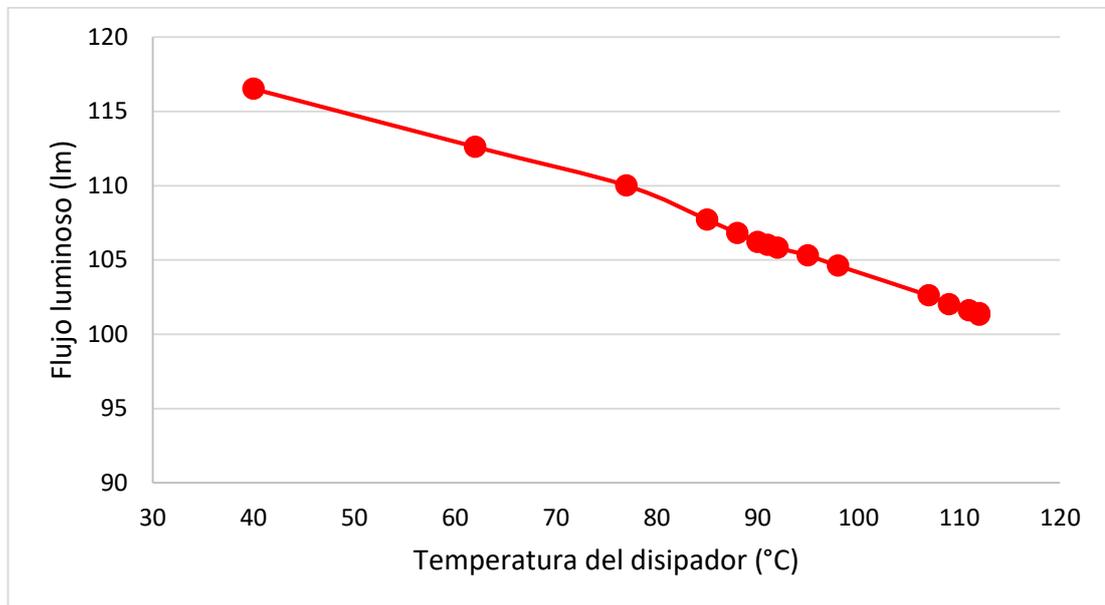


Figura 49: Flujo luminoso en función de la temperatura del disipador para el caso de un LED verde de alta potencia medido con el equipo LabSphere.

Capítulo 6.

Conclusiones

- Se diseñó y construyó adaptadores y conectores para ensamblar un extremo de la fibra óptica QP400-2-VIS-NIR a la salida de la esfera integradora PCE-LED 1, y el otro extremo al puerto de entrada del espectrómetro USB650, teniendo así un nuevo sistema de medición capaz de obtener el espectro radiométrico de una fuente de iluminación, empleando el método de medición 2π en una esfera integradora de 75 mm de diámetro.
- Se implementó una hoja de cálculo con su respectivo procedimiento que permitió automatizar la calibración de la escala de longitud de onda y la escala de intensidad del nuevo sistema de medición, encontrándose que el rango espectral óptimo de trabajo es el intervalo comprendido de 410 a 850 nm. Además, se halló que para la escala de la longitud de onda se tiene una incertidumbre igual a 0.58 nm y una incertidumbre de 0.188 W/nm en la escala de intensidad.
- Se implementó una hoja de cálculo con su respectivo procedimiento que permitió automatizar la adquisición de datos en el nuevo sistema de medición empleando el software OceanView 1.6.3, además se verificó que el flujo luminoso de un LED de alta potencia depende fuertemente de su temperatura, y que el método apropiado para evaluar LEDs que no tienen emisión hacia atrás, en una esfera integradora, es el de la geometría 2π , ya que si se emplea la geometría 4π no se obtiene repetibilidad en las mediciones y la señal recibida por el espectrómetro depende de la dirección hacia donde apunta el LED en el interior de la esfera.
- Se obtuvo el espectro radiométrico de distintas fuentes de iluminación LED empleando el nuevo sistema de medición, teniendo que los resultados obtenidos varían en un máximo de 5% con respecto a los valores de referencia obtenidos con el equipo LabSphere. Las características espectrales difieren en un máximo de 1% y las características colorimétricas llegan a diferir en algunos casos de hasta el 100% debido a las dimensiones de la esfera integradora comparado con las fuentes de iluminación LED de alta potencia evaluadas.
- Se implementó una hoja de cálculo que permitió procesar los datos y entregar un informe de resultados en el que se muestran las características radiométricas, fotométricas y colorimétricas, el espectro radiométrico y el diagrama de cromaticidad xy de 1931.

Bibliografía

- [1] P. Morgan Pattison, *2017 Suggested Research Topics Supplement: Technology and Market Context*, DOE SSL Program, 2017.
- [2] G. Q. Zhang, *Solid State Lighting Technology and Application Series*, New York, USA: Springer Science, 2013.
- [3] P. Morgan Pattison, M. Hansen, and J. Y. Tsao, “LED lighting efficacy: Status and directions,” *Comptes Rendus Physique*, 2017/12/28/, 2017.
- [4] E. Lysen, *Pico Solar PV Systems for Remote Homes - A New generation of small PV systems for lighting and communication*, IEA International Energy Agency, Report IEA-PVPS T9-12:2012, 2013.
- [5] F. Haque, and A. Azad, “Luminous measurement of LED lights in cost effective way using cylindrical method,” *Measurement*, vol. 98, pp. 123-130, 2017/02/01/, 2017.
- [6] J. Peterson, F. Vignola, A. Habte, and M. Sengupta, “Developing a spectroradiometer data uncertainty methodology,” *Solar Energy*, vol. 149, pp. 60-76, 2017/06/01/, 2017.
- [7] F. Sametoglu, “Influence of the spectral power distribution of a LED on the illuminance responsivity of a photometer,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 46, no. 9, pp. 643-647, 2008/09/01/, 2008.
- [8] K. H. Kim, W. H. Kim, S.-W. Jeon, M. Choi, S. B. Song, and J. P. Kim, “Effects of the optical absorption of a LED chip on the LED package,” *Solid-State Electronics*, vol. 111, pp. 166-170, 2015/09/01/, 2015.
- [9] G. Martin, K. Muray, I. Réti, J. Diós, and J. Schanda, “Miniature integrating sphere — silicon detector combination for LED total power measurement,” *Measurement*, vol. 8, no. 2, pp. 84-89, 1990/04/01/, 1990.
- [10] N.-T. Chen, and C.-W. Chen, “Development of the LED measurement system of chromaticity coordinates correction,” *Measurement*, vol. 46, no. 1, pp. 360-366, 2013/01/01/, 2013.
- [11] P. Hanselaer, A. Keppens, S. Forment, W. R. Ryckaert, and G. Deconinck, “A new integrating sphere design for spectral radiant flux determination of light-emitting diodes,” *Measurement Science and Technology*, vol. 20, no. 9, pp. 095111, 2009.
- [12] F. Oscco Choque, “Caracterización fotométrica de lámparas LED,” Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2016.

- [13] *The basis of physical photometry*, Comission Internationale de l'Eclairage, Vienna, Austria, 1983.
- [14] BIPM, "El Sistema Internacional de Unidades," *París, Francia*, Conferencia General de Pesas y Medidas, 2006, p. 95.
- [15] A. Gilchrist, and J. Nobbs, "Colorimetry, Theory A2 - Lindon, John C," *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, pp. 337-343, Oxford: Elsevier, 1999.
- [16] N. Ohta, and A. R. Robertson, *Colorimetry: Fundamentals and Applications*, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [17] J. Schanda, *Colorimetry Understanding the CIE System*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [18] B. Clark Howard, *Green Lighting*, p.^pp. 89-99, New York, USA: McGraw-Hill, 2010.
- [19] *Measurements of LEDS*, Comission Internationale de l'Eclairage, Vienna, Austria, 2007.
- [20] A. Poppe, and C. J. M. Lasance, *On the Standardization of Thermal Characterization of LEDs*, 2009.
- [21] *Optical Measurement of High-Power LEDs*, Commission Internationale de l'Eclairage, Vienna, Austria, 2017.
- [22] *Technical Information Mini-Spectrometers*, Hamamatsu Photonics K. K., Japan, 2016.
- [23] CEM, "Procedimiento OP-003 para la calibración de espectrorradiómetros," Edición Digital 1, 2000, p. 50.
- [24] W. E. Schneider, and R. Young, *Spectroradiometry Methods*, Optronic Laboratories, Inc., Orlando, Florida, 1998.
- [25] "Red Tide USB650 Fiber Optic Spectrometer: Installation and Operation Manual," Ocean Optics, Inc., 2016, p. 20.
- [26] IEC, "Approved Method: Electrical Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products," *LM-79-08*, Illuminating Engineering Society, 2008, pp. 4-12.
- [27] "Manual de Instrucciones de Uso: Luxómetro PCE-LED 1," PCE Instruments, pp. 2-16.
- [28] F. A. Jenkins, and H. E. White, *Fundamentals of Optics*, Fourth ed., Unite States of America: McGraw-Hill, 2001.
- [29] "Fibers & Probes," Ocean Optics, Inc., pp. 137-158.

Anexo A

Características de la Fibra Óptica QP400-2-VIS-NIR

El núcleo interno de la fibra óptica es de sílice de alta pureza la cual permite tener una gran capacidad de transmisión y reducir al máximo la interferencia que llega desde el exterior ya sea por luz, campos eléctricos o campos magnéticos. En la Tabla 29 y la Figura 50 se muestra las especificaciones de la fibra óptica utilizada según el fabricante.

Tabla 29: Especificaciones de la fibra óptica QP400-2-VIS-NIR [29].

Especificaciones	Valor
Diámetro del núcleo	400 $\mu\text{m} \pm 8 \mu\text{m}$
Rango de longitud de onda	400 nm – 2500 nm
Longitud	2 m
Radio de curvatura a largo plazo	16 cm
Radio de curvatura a corto plazo	8 cm

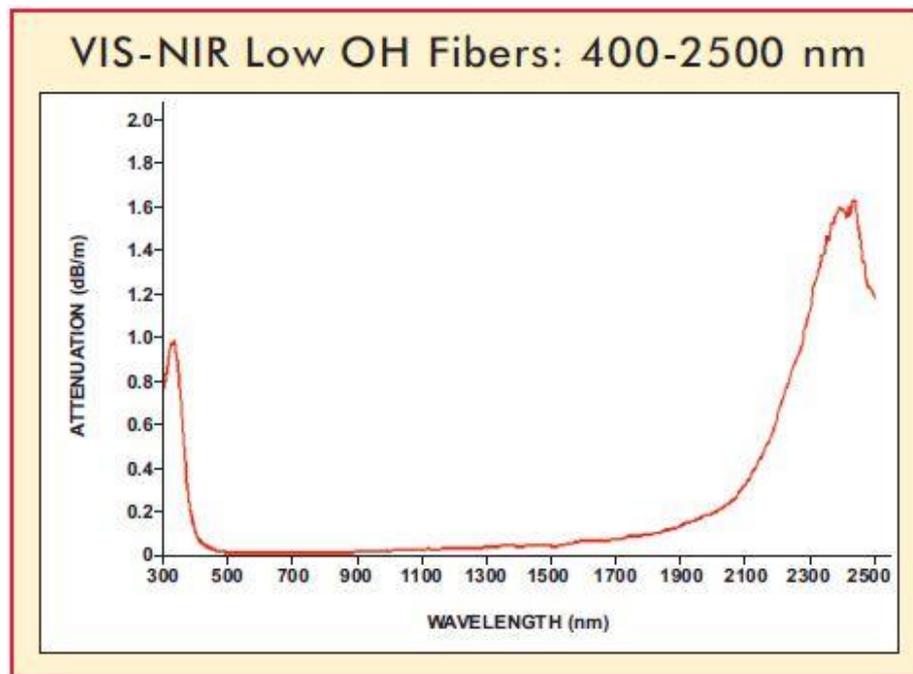


Figura 50: Atenuación espectral de la fibra óptica QP400-2-VIS-NIR [29].

Anexo B

Certificado de Calibración de la Lámpara SCL-050



**TOTAL SPECTRAL FLUX
CALIBRATION CERTIFICATE**

REPORT NUMBER: SCL-050-A41
PAGE 1 of 2

NO. DM-02008-001
REV. 08

RENDERED TO: Universidad Nacional de Ingeniería
Av. Tupa Amaru 210 Rimac
Lima 25 PERU

AUTHORIZATION: Purchase Order: SCL-050

CALIBRATION LAB: Labsphere, Inc., Optical Calibration Laboratory
231 Shaker Street
North Sutton, N.H. 03260
Tel 603-927-4266 Fax 603-927-4694

CALIBRATED STANDARD: SCL-050

CALIBRATION REQUESTED: Total Spectral Radiant Flux of an omni directional source. For use in 4 π measurement geometry

LAMP CURRENT: 1.050 A

DATE OF CALIBRATION: 7/5/12 **CALIBRATED BY:** R.C

APPLICABLE DOCUMENTS: DM-02007-000 Spectral Flux Calibration Process
DM-02010-000 FFS-100-400/1000 Calibration Process
DM-02032-000 Calibration of Total Spectral Flux Working Standards

TEST AND TEST METHOD
The spectral flux calibration is transferred from Labsphere's Primary Standard Lamp (NIST-RF0816) to Labsphere's Working Standard Lamps, then to this certified lamp standard using sphere-based spectroradiometer.

The total spectral flux of the Primary Standard Lamp is directly traceable to NIST in visible wavelength range from 360nm to 830nm. The spectral flux calibration against NIST-RF0816 is an absolute measurement. To extend the spectral flux calibration to the wavelength range from 350nm to 1050nm, Labsphere's Working Standard of Spectral Irradiance is used, which is also traceable to NIST. The spectral flux calibration against the spectral irradiance standard is a relative measurement. The relative spectral measurement is corrected against the absolute flux measurement in order to obtain calibrated spectral flux from 350nm to 360nm and from 830nm to 1050nm. Labsphere maintains twelve working standard lamps, including six 75W lamps and six 35W lamps.

The certified lamp standard is seasoned, screened and calibrated against three of the working standards with similar optical power.

Calibration of the lamp standard: The spectral flux from the working lamp standard is transferred to your lamp by the comparison to the spectral flux from the working lamp standard using an XSLMS-4030 spectral flux measurement system. The SCL-1400 lamp is calibrated in the base-up position. All other SCL and SSL lamps are calibrated in the base-down position. SSSL and ICS lamps are calibrated in the 2 π measurement geometry.

The outputs of the ICS lamps are sensitive to their orientation. To reproduce the values and uncertainty reported, position the flat side of socket face down parallel to the ground and align set screw with white indicator on sphere.

The handle of the FFS-100 must be oriented so that it is perpendicular to the ground for use as a calibrated standard.

A warm-up period must be of sufficient duration to stabilize the output of the lamp. Good electrical contacts are mandatory. The accurate current operation (see above) and warm-up time are essential when using the lamp as a calibrated standard.

Table I - NATIONAL LABORATORY TRACEABLE STANDARD(S): note only 3 Working Lamp Standards are used in a calibration

Generation	Standard	Report/File number	Calibration Date	
1a	NIST-RF0816	884/278592-09	September 30, 2009	Labsphere Primary total spectral radiant flux standard
1b	I-652	685/280517-11	April 14, 2011	Labsphere Primary standard of spectral irradiance
2	SCL-600-WL19 through SCL-600-W124	SCL-600-WL19 through SCL-600-W124	January 19, 2012	Labsphere working lamp standard of spectral flux

LABORATORY ENVIRONMENT: Temperature: 23 \pm 3°C

ESTIMATE UNCERTAINTIES
For expanded uncertainty budget see Table II and Table III.

Calibrated by: *Robert Cardon* Approved by: *[Signature]*

CAUTION: Do not touch the lamp with your bare hands as the oils in your hand may damage the bulb
This certificate shall not be reproduced except in full, without the written approval of Labsphere, Inc.




Figura 51: Certificado de calibración de la lámpara patrón de trabajo SCL-050.

Anexo C

Nuevo sistema de medición



Figura 52: Nuevo sistema de medición, vista superior.



Figura 53: Nuevo sistema de medición, vista frontal.

Anexo D

Algunos espectros radiométricos obtenidos con el nuevo sistema de medición

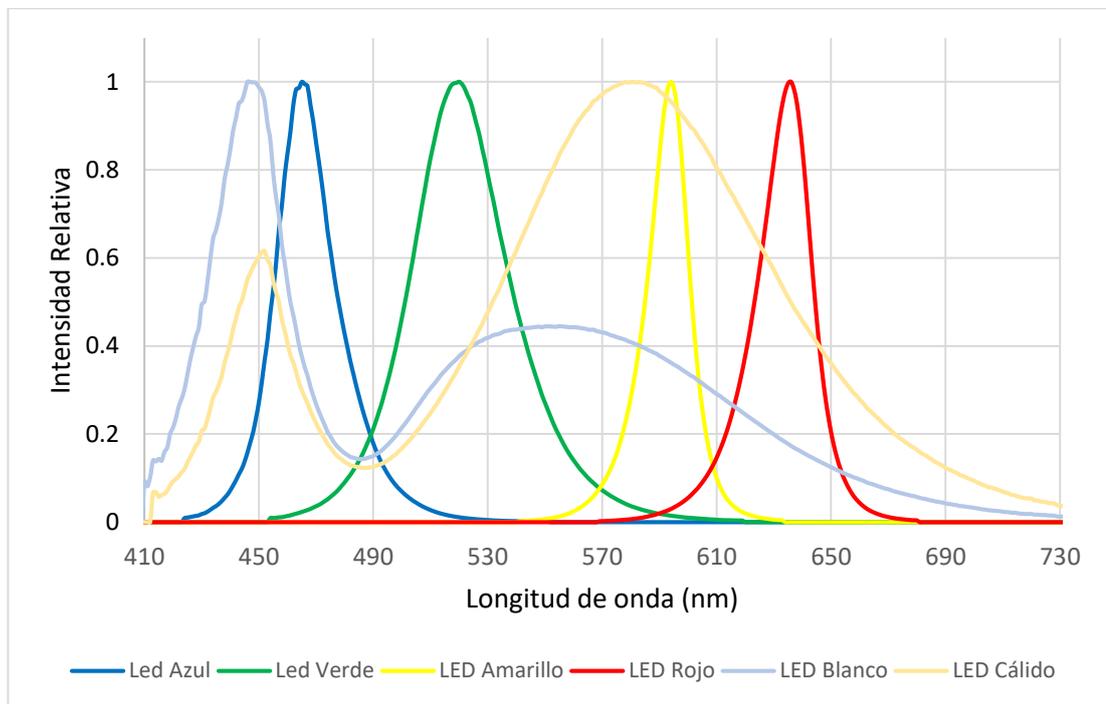


Figura 54: Espectros radiométricos relativos obtenidos de distintos LEDs de alta potencia evaluados en el nuevo sistema de medición.