

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SIMULADOR DE RADIACIÓN ESPECTRAL AM0 EN EL RANGO UVA Y VISIBLE UTILIZANDO LEDs

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FÍSICO**

Elaborado por:

JUAN PABLO ESPINOZA CORTEZ

Asesor:

Dr. ABEL AURELIO GUTARRA ESPINOZA

LIMA - PERÚ

2019

Resumen

Esta tesis consiste en utilizar fuentes LEDs de diferentes longitudes de onda para obtener un área iluminada con un perfil espectral similar a la del Sol fuera de la atmósfera terrestre. El diseño del simulador debe tener en cuenta una selección adecuada de longitudes de onda, en la zona UV y Visible del espectro, cuya superposición permita reproducir el perfil del espectro solar AM0. Adicionalmente determinar un número adecuado de LEDs para cada longitud de onda y potencia de trabajo necesaria. El área de trabajo objetivo es de 16 cm², por lo cual se utilizan lentes para reducir el ángulo de visión, de esta forma se reduce el área iluminada y con ello aumenta la irradiancia. Al optimizar la irradiancia de cada LED se logra el objetivo de tener una irradiancia AM0 con LEDs de menor potencia. Los LEDs seleccionados se adquirieron de la compañía Luxeon Star Z UV de 400, 405, 415, Blue, Cyan, Lime y blanco cálido 3500 K.

Para mejorar la estabilidad térmica se diseñó un disipador de calor que consiste en tres láminas circulares concéntricas de distinta inclinación, que sirven de soporte para los LEDs de tal forma que iluminen la misma área. Se determinó las ecuaciones de las magnitudes de voltaje, longitud onda pico, el ancho de media intensidad y el flujo radiante de un LED de alta potencia en función de la corriente. El uso de las ecuaciones de cada LED fue esencial para introducir los datos a un simulador como MATLAB para la determinación de la corriente necesaria en cada LED.

Así mismo se determinó que el simulador solar es de clase C para una altura de 15 cm, teniendo en cuenta los criterios de clasificación de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials - ASTM) designación E972-05.

Se implementó un software en Arduino MEGA que mide la corriente que pasa a través de cada LED.

Índice general

Índice de figuras	v
Índice de tablas	ix
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
2. Fundamento teórico	4
2.1. Radiación de un cuerpo negro	4
2.2. Espectro solar	6
2.3. Distribución espectral AM0	7
2.4. Atmósfera terrestre	8
2.5. Radiometría y fotometría	9
2.5.1. Flujo radiante espectral	9
2.5.2. Eficiencia luminosa espectral	9
2.5.3. Flujo luminoso espectral	10
2.5.4. Luminancia	11
2.5.5. Emitancia	11
2.5.6. Flujo luminoso espectral e Irradiancia espectral	11
2.6. Light Emitting Diodes (LEDs)	12
2.6.1. Distribución espacial	19
2.6.2. Distribución espectral	19

2.6.3.	Cantidades relacionadas a la distribución espectral	20
2.6.3.1.	Longitud de onda pico	20
2.6.3.2.	Ancho de banda espectral a niveles de media intensidad	20
2.7.	Métodos para aumentar la irradiancia	21
2.7.1.	Uso de lentes	21
2.8.	Análisis matemático de la aproximación a AM0	21
2.9.	Diseño del disipador de calor	22
2.10.	Estándar de clasificación de un simulador solar	23
3.	Procedimiento experimental	24
3.1.	Búsqueda de LEDs de alta potencia disponibles en el mercado	24
3.2.	Caracterización espectral	24
3.2.1.	Esfera integradora	24
3.2.1.1.	Superficie lambertiana	25
3.2.1.2.	Teoría de la esfera integradora	25
3.2.1.3.	Método de la sustitución	27
3.3.	Análisis de regresión de las variables lumínicas	29
3.4.	Determinación de la irradiancia espectral de cada LED seleccionado	29
3.5.	Medida de la distribución espacial de la irradiancia	31
3.6.	Clasificación de un simulador solar	32
3.7.	Obtención de perfil AM0 de 390 a 600 nm	33
3.8.	Determinación de la corriente necesaria de cada tipo de LED	33
3.9.	Diseño de un disipador de calor como soporte de los LEDs	34
3.10.	Construcción de un multilector de corriente para cada tipo de LED	34
4.	Resultados experimentales	35
4.1.	Medida del flujo radiante de LEDs para diferentes valores de corriente suministrada	35
4.2.	Determinación de ángulo de irradiancia	37
4.3.	Perfil AM0 simulado	40

4.4. Diseño del disipador y soporte de los LEDs	43
4.5. Clasificación del simulador solar construido	44
4.6. Construcción del circuito multilector de corriente	48
4.6.1. Lector de corriente	49
5. Discusiones	51
6. Conclusiones y perspectivas	56
6.1. Conclusiones	56
6.2. Perspectivas	57
Referencias	58
A. Fotografías del equipo	60
B. Códigos MATLAB	63
B.1. Analisis1LED	63
B.2. OptimizationLED1611	65
B.3. Espectros1611	71
C. Espectros de radiación de cada LED	75
C.1. Análisis de espectros de cada LED	79
D. Código lector de corrientes	84
E. Ficha técnica	88
E.1. LEDs del espectro visible	88
E.2. LEDs del espectro ultravioleta	99
E.3. Lentes utilizados en la tesis	111

Índice de figuras

2.1. Comparación del espectro WRC con el que se obtiene al asumir que el sol es un cuerpo negro a 5777 K.	7
2.2. Espectro solar AM1.5 y AM0.	8
2.3. Función espectral de eficiencia luminosa de la CIE para la visión fotópica.	10
2.4. Representación de la producción de luz de un LED.	13
2.5. Relación típica entre la temperatura del disipador de calor y la potencia disipada en forma de calor.	14
2.6. Circuito equivalente en estado estacionario simplificado con N LED montados en el mismo disipador de calor.	15
2.7. Diodo con resistencia shunt en serie. Un diodo con una resistencia shunt en serie muestra una desviación del comportamiento exponencial a altas corrientes hacia adelante. De acuerdo con la ley de voltaje de Kirchhoff, los voltajes a través del diodo y la resistencia se suman. Tener en cuenta que una resistencia simple tiene una forma lineal.	17
2.8. Diodo con resistencia paralela (shunt). De acuerdo con la ley de Kirchhoff, las corrientes a través del diodo y la resistencia se suman.	17
2.9. Diodo con resistencia en serie y paralela. Efectos del shunt y resistencia en serie.	17
2.10. Patrón de distribución espacial típico de radiación polar de led UV de LuxeonStarLEDs.	19

2.11. Potencia típica relativa vs longitud de onda para LUXEON Z Red, Red-Orange, Amber, Green, Cyan, Blue y Royal Blue, a 500 mA, T=25°C.	20
2.12. Vista de LEDs cuadrados de 10 y 20 mm de perfil, con lentes de 39,2° y 35° respectivamente. Se muestra el ángulo de visión con guiones y el centro del haz con línea Zigzag. Se considera un 1 mm extra para el diseño.	21
3.1. Geometría de una esfera integradora ideal de radio R	26
3.2. Pasos del método de sustitución.	28
3.3. Diámetro del área irradiada por un LED de 20 mm con un lente circular de 35° a una distancia de 150 mm (15 cm), se obtiene que el diámetro del área circular irradiada es 107,02 mm.	30
3.4. Vista desde arriba de las partes del sistema de barrido 2D. Izquierda: en la parte superior, se ensambla el sensor. Derecha: en la parte superior, se ensambla la estructura superior.	31
4.1. Espectros de radiación de un LED Blue Luxeon en Zaber Z1 de 36 lm.	36
4.2. Análisis de la data obtenida en la figura 4.1 para el LED Blue. . .	37
4.3. Patrón de distribución del lente de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. A. Patrón de distribución espacial. B. Patrón de distribución angular. Promediando se determina el ángulo en $16,10^\circ$ con una eficiencia de 88,29%.	38
4.4. Patrón de distribución del lente de $20 \times 20 \text{ cm}^2$. A. Patrón de distribución espacial. B. Patrón de distribución angular. Promediando se determina el ángulo en $20,75^\circ$ con una eficiencia de 96,27%.	39
4.5. Diagrama de flujo de los códigos MATLAB utilizados para la obtención del perfil AM0.	41
4.6. Comparación entre el espectro simulado y el espectro objetivo AM0.	42

4.7. Disipador de calor. Izquierda. Consiste en tres superficies cónicas de distinta inclinación los cuales distan 150 mm con respecto a un punto central. Derecha. Imagen vertical del disipador construido.	43
4.8. Izquierda y central. Corte realizado en lámina de acero de 1 mm de espesor para la obtención de las superficies cónicas. Derecha. Imagen inferior del disipador construido.	44
4.9. Imagen de uniformidad adquirida durante el barrido 2D por los sensores ML8511 y BPW34 de cada LED para la corriente de trabajo.	45
4.10. Uniformidad espacial simulada de clase C sobre un área de $36,5 \times 36,5 \text{ mm}^2$	46
4.11. Izquierda. Esquema del circuito empleado para amplificar la caída de voltaje en una resistencia de precisión <i>shunt</i> (R_1), mediante un amplificador operacional <i>AD620</i> . Derecha. Circuito.	48
A.1. Fotografía del equipo completo. Se observa la caja de acrílico como fuente de alimentación de los LEDs. El cabezal de los LEDs con el brazo de desplazamiento vertical. El monitor de la computadora donde se conecta el Arduino para la lectura de los valores de corriente de cada LED.	60
A.2. Fotografía del equipo sin la computadora. Se observa el frontis de la caja de acrílico, se muestran los interruptores de cada LED. Al lado derecho se muestra una fuente DC como fuente general de la caja de acrílico, alimentando a los drivers de cada LED de alta potencia.	61
A.3. Fotografía del equipo encendido.	61
A.4. Fotografía del cabezal con los LEDs encendidos.	62
C.1. Espectro de radiación de un LED UV de 400 nm en Zaber Z1 de 475 mW.	75

C.2. Espectro de radiación de un LED UV de 405 nm en Zaber Z1 de 625 mW.	76
C.3. Espectro de radiación de un LED UV de 415 nm en Zaber Z1 de 625 mW.	76
C.4. Espectro de radiación de un LED Blue Luxeon en Zaber Z1 de 36 lm.	77
C.5. Espectro de radiación de un LED Cyan Luxeon en Zaber Z5 de 240 lm.	77
C.6. Espectro de radiación de un LED Lime Luxeon en Zaber Z5 de 676 lm.	78
C.7. Espectro de radiación de un LED White Luxeon 3500K en Zaber Z5 de 496 lm.	78
C.8. Análisis de la data obtenida en la figura C.1 para el LED UV de 400 nm.	79
C.9. Análisis de la data obtenida en la figura C.2 para el LED UV de 405 nm.	80
C.10. Análisis de la data obtenida en la figura C.3 para el LED UV de 415 nm.	80
C.11. Análisis de la data obtenida en la figura C.4 para el LED Blue. . .	81
C.12. Análisis de la data obtenida en la figura C.5 para el LED Cyan. . .	81
C.13. Análisis de la data obtenida en la figura C.6 para el LED Lime. . .	82
C.14. Análisis de la data obtenida en la figura C.7 para el primer pico del LED White.	82
C.15. Análisis de la data obtenida en la figura C.7 para el segundo pico del LED White.	83

Índice de tablas

3.1. Esfera integradora y espectro radiómetro.	29
3.2. Sensores sensibles a los LEDs.	32
3.3. Clasificación según rendimiento del simulador.	32
3.4. Distribución porcentual de requerimientos de irradiancia.	33
4.1. Resultados del ángulo de visión de cada lente para una distancia de 0,15 m.	40
4.2. Corrientes de cada LED para obtener AM0.	42
4.3. Valores de irradiancia relativos según su clasificación.	45
4.4. Estabilidad temporal de cada LED en los primeros 60 minutos desde el encendido y transcurridos los primeros 30 minutos. Considerando el tiempo de encendido de 30 minutos, se observa una variación temporal menor al 3%. Se especifica las condiciones de corriente inicial (I_0) y final (I_F).	47
4.5. Requerimientos de irradiancia y la irradiancia simulada en cada rango.	47
4.6. Clasificación de la aproximación espectral alcanzada por el simulador solar en cada rango de longitud de onda. El rango alcanzado se muestra resaltado.	48
4.7. Función de corriente para cada resistencia SHUNT. EL término bits es el valor de la lectura de voltaje del Arduino, al tener un conversor ADC de 10 bits (de 0 a 1023 valores) se determina la corriente en función del número de bits para cada caso.	50
5.1. Resultados de clasificación del simulador solar construido.	55

Índice de acrónimos y símbolos

AM0: Air Mass 0

AM1.5: Air Mass 1.5

ASTM: American Society of Testing Materials

CONCYTEC: Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación

CSP: Chip Scale Package

DVD: Digital versatile disk

FONDECYT: Fondo Nacional de Desarrollo Científico y de Innovación
Tecnológica

IR: Radiación infrarrojo

LED: Light Emitting Diode

PV: Pico Voltaicos

SMD: Surface-mount device

TOMS: Total Ozone Mapping Spectrometer

UNI: Universidad Nacional de Ingeniería

UV: Radiación ultra violeta

UV-A: Radiación ultra Violeta tipo A

UV-B: Radiación ultra violeta tipo B

VIS: Radiación visible

WRC: World Radiation Center

$C_1 = 2\pi hc^2$ Primera constante de radiación

$C_2 = hc/k_B$ Segunda constante de radiación

$exp = 2,71828$ Base de logaritmo natural

$h = 6,626 \times 10^{-34}$ Js Constante de Planck

$k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K Constante de Boltzmann

$c = 3 \times 10^8$ m/s Velocidad de la luz en el vacío

$\sigma = 5,6697 \times 10^{-8}$ Wm⁻²K⁻⁴ Constante de Stefan-Boltzmann

$I_{sc} = 1361$ Wm⁻² Constante solar

T C, K Temperatura

λ nm Longitud de onda de radiación

λ_p nm Longitud de onda de radiación máxima o pico

$\phi_{e,\lambda}$ W/nm Flujo radiante espectral

$V(\lambda)$ Eficiencia luminosa espectral

ϕ_V lm/nm Flujo luminoso

$\phi_{V,\lambda}$ lm/nm Flujo luminoso espectral

$K_m = 683$ lm.W⁻¹ Máxima eficiencia luminosa espectral de radiación para la visión fotópica

L_V cd/m² Luminancia

M_V lm/m² Emitancia

I_e W/m² Irradiancia

$I_{e,\lambda}$ W/m²nm Irradiancia espectral

I_{sc} W/m² Constante solar

N Número de LEDs

E lm/W Eficacia luminosa

P_d W Potencia suministrada al diodo

V_d V Voltaje suministrado al diodo

I_d A Corriente suministrada al diodo

$I_{emission}$ W Intensidad de emisión

P_h W Potencia transformada en calor

V V Voltaje

I A Intensidad de corriente eléctrica

R_{ins}, R_{jc} Resistencia térmica

E_g Gap de energía

ν Hz Frecuencia

e C Carga del electrón

error Función de error

SR_{th} Respuesta espectral objetivo

L Respuesta espectral del LED

S_{NE} No uniformidad espacial de la irradiancia

T_{IE} Estabilidad temporal de irradiancia

SM Aproximación espectral

I_{lum} lm/m² Iluminancia

ρ Reflectancia de la superficie lambertiana

K Constante de la esfera integradora

G Ganancia

R_G Ω Resistencia de ganancia

r^2 Coeficiente de determinación o correlación al cuadrado

n Norma residual

Agradecimientos

Agradezco a Dios y mi familia por permitirme vivir esta experiencia tan importante en mi vida. Porque cada paso que damos, cada meta que alcanzamos es por esfuerzo propio y el apoyo de Dios. Con Él todo se puede, sin él nada.

Gracias a mi madre por ser la principal soporte y apoyo para que alcance mis sueños, por darme la oportunidad y medios para alcanzar cada meta que me he propuesto. Tras recorrer un largo camino y superar una serie de obstáculos, finalmente puedo decirte: *Mamá, soy un ingeniero.*

Gracias a mi padre y hermanos, por la fe depositada en mí. Gracias por la paciencia y cada palabra de aliento brindada a lo largo de los 5 años de estudios.

La siguiente persona a quien quiero agradecer es al Dr. Abel Gutarra, quien me dio la oportunidad de trabajar en el Laboratorio de Materiales Nanoestructurados desde 10^{mo} ciclo depositando su confianza en mí para el desarrollo de un gran proyecto que es tema de esta tesis. Gracias por compartir conmigo sus experiencias, enseñanzas, consejos, por la libertad de trabajo bajo mi criterio pero guiándome por el camino correcto. Gracias por la comprensión ante los problemas personales que tuve durante el desarrollo de esta tesis. Muchas gracias profesor Abel por su profesionalismo, tiene mi eterna gratitud, respeto y admiración.

Los Sres. Quinder y Farfán por el apoyo técnico en la parte mecánica del simulador solar.

Gracias al Dr. Manuel Castillo, por su apoyo y consejo durante el desarrollo de la tesis. Gracias por permitirme ser partes de otros grandes proyectos en el laboratorio Smart City.

Gracias al laboratorio Smart City del Centro de Tecnologías de Información y Comunicaciones por la oportunidad del desarrollo de nuevas habilidades aplicadas en mi tesis.

A mis compañeros de a lo largo de la carrera, Sebastián y Frank, por el intercambio de conocimientos, las charlas científicas y amicales que tuvimos en estos 5 años de carrera. A Michael por el apoyo y consejo constante durante la tesis. Gracias a Anthony por el apoyo y la voz de aliento durante la carrera. A Jacky por brindarme su apoyo el último tramo de la tesis, motivándome para culminar bien este proyecto y embarcándome a nuevas metas que se veían lejanas en un inicio.

Gracias al Laboratorio de Materiales Nanoestructurados. Al Dr. Manfred Horn, el Mg. Fernando Oscco y al Ing. Robert Chala por permitirnos usar la esfera integradora del Laboratorio de Fotometría de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Gracias a FONDECYT. Esta tesis es parte de un proyecto mayor, el convenio N°144-2017-FONDECYT "Proyecto de Investigación Básica y Aplicada", entre la Universidad Nacional de Ingeniería, Fondo Nacional de Ingeniería y el Fondo Nacional de Desarrollo Científico Tecnológico y de Innovación Tecnológica -FONDECYT.

Gracias a todos por su ayuda y momentos gratos compartidos.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

La simulación de un espectro solar AM0 se utiliza para emular las condiciones extraterrestres ópticas reales del sol, su aplicación usual es para realizar ensayos en sistemas pico voltaico (PV) para aplicaciones espaciales. Las fuentes de iluminación típicas utilizadas en los simuladores solares son lámparas de arco de xenón, lámparas de arco de haluro metálico, lámparas halógenas de tungsteno de cuarzo o lámparas de sodio tal como lo reportan Tawfik, Tonnelier y Sansom (2018) [1]. Esen, Sağlam y Oral (2017) reportan que se encuentra combinaciones entre luces LED para abarcar la zona visible del espectro con una lámpara de xenón para la zona infrarroja [2]. Sin embargo Emery, Myers y Rummel (1988) [3] explican sus mayores problemas, los cuales son su baja eficiencia luminosa, heterogeneidad temporal, alta carga de calor y costo, brindando soluciones para las aplicaciones particulares.

Por otra parte Bazzi et al. (2012) [3], Kohraku y Kurokawa (2006) [4], así como Kim, Dostart, Huynh y Krein (2014) [5] proponen el uso diodos emisores de luz (LED) de alta potencia, con los cuales, con una combinación de ellas son capaces de alcanzar el espectro AM0. Los LEDs son mucho más eficientes, de tamaño reducido, con mayor flexibilidad de control, baja carga de calor y bajo costo [4, 5].

1.2. Justificación

Teniendo en cuenta la importancia de la radiación solar como causa de los fenómenos climáticos, y biológicos, es importante para la investigación tener una fuente artificial de reproduzca sus características radiativas. Si se logra reproducir el perfil espectral de la radiación solar, antes o después de ingresar a la atmósfera terrestre, se podrán realizar innumerables experimentos desde el punto de vista energético como la evaluación de celdas fotovoltaicas en vehículos espaciales, o artefactos no tripulados, así como las modificaciones fisicoquímicas que podrían experimentar diversos materiales expuestos a este tipo de radiación AM0. Por otro lado, sobre la superficie terrestre, pueden estudiarse los procesos metabólicos de microorganismos expuestos a diferentes rangos espectrales del sol. Una de las principales justificaciones que impulsaron este proyecto, es el estudio de la protección a la radiación UV que presentan algunas cianobacterias encontradas en suelos peruanos. Esta característica las haría potencialmente aptas para sobrevivir en ambientes extraterrestres.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y construir un equipo que reproduzca el espectro solar a partir de la combinación de LEDs de varias longitudes de onda.

1.3.2. Objetivos específicos

- Reproducir el espectro solar AM0 entre 390 nm y 600 nm.
- Que el sistema permita variar las intensidades de cada LED individual.
- Que el diseño permita la incorporación de LEDs adicionales sin modificar partes mecánicas.

-
- Que el soporte de los LEDs pueda desplazarse verticalmente para modificar el área de iluminación.
 - Que tenga un programa numérico de optimización que determine las intensidades que debe tener cada LED para reproducir el espectro solar AM0.
 - Someter el sistema construido a una evaluación de uniformidad de la iluminación en el área de trabajo.

Capítulo 2

Fundamento teórico

En este capítulo se explican en líneas generales, los conceptos de cuerpo negro, espectro solar, distribución espectral AM0 y atmósfera terrestre; con la finalidad de comprender los términos asociados al espectro solar AM0. Además se explican los conceptos asociados a light emitting diode (LED), detallando la parte matemática y los métodos utilizados para concentrar el haz de luz. Finalmente se detallan los métodos utilizados para la ejecución de los programas en MATLAB.

2.1. Radiación de un cuerpo negro

Un cuerpo opaco es aquel que no permite el paso total de la luz. Cuando la radiación cae sobre un cuerpo opaco, parte de ella es reflejada y el resto es absorbida.

La radiación absorbida por el cuerpo aumenta la energía cinética de los átomos constituyentes, que oscilan alrededor de sus posiciones de equilibrio. Dado que la energía cinética de traslación media de los átomos determina la temperatura del cuerpo, la energía absorbida hace que la temperatura suba. Sin embargo, los átomos contienen cargas (electrones), y son acelerados por las oscilaciones. En consecuencia, como lo exige la teoría electromagnética, los átomos emiten radiación electromagnética. Cuando la tasa de absorción es igual a la tasa de emisión, la temperatura es constante y decimos que el cuerpo está en equilibrio térmico con su entorno [6].

La radiación electromagnética emitida en estas circunstancias se denomina radiación térmica. A temperaturas ordinarias (menor a 600 °C), la radiación térmica emitida por un cuerpo no es visible; la mayor parte de la energía se concentra en longitudes de onda mucho más largas que las de la luz visible. A medida que un cuerpo se calienta, la cantidad de radiación térmica emitida aumenta, y la energía radiada se extiende a longitudes de onda cada vez más cortas. La energía emitida depende también de la naturaleza de la superficie; así, una superficie mate o negra tiene un poder emisor mayor que una superficie brillante. La ley de Kirchhoff establece que un cuerpo que es buen emisor de energía es también buen absorbente de dicha energía. Así, los cuerpos de color negro son buenos absorbentes. Un cuerpo que absorbe toda la radiación incidente es llamado *cuerpo negro ideal* [6].

El término cuerpo negro es usado para describir una superficie ideal que sigue las leyes de Planck, Stefan-Boltzmann [6, 7] y Wien;

Planck

$$I_{e,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 [exp^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1]}, \quad (2.1)$$

Stefan- Boltzmann

$$I_e = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5 [exp^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1]} d\lambda = \left(\frac{C_1 \pi^4}{15 C_2^4} \right), \quad (2.2)$$

Wien

$$\lambda_{max} T = 2897,8 \mu\text{mK}, \quad (2.3)$$

donde la ley de Planck es para la potencia emisiva espectral hemisférica de un cuerpo negro, donde $C_1 = 2\pi hc^2$ es la primera constante de radiación y $C_2 = hc/k_B$ es la segunda constante de radiación, siendo $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Js constante de Planck y $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K la constante de Boltzmann y $c = 3 \times 10^8$ m/s la velocidad de la luz en el vacío, reemplazando estos valores se obtiene, $C_1 = 3,7427 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4\text{m}^{-2}$ y $C_2 = 1,4385 \times 10^4 \text{ W}\mu\text{mK}$ con estos valores se determina la constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$; y finalmente la ley de Wien se deduce de la ley de

Planck relacionando la temperatura del cuerpo negro con la longitud de onda con máxima emisión [7].

2.2. Espectro solar

El sol es un cuerpo completamente gaseoso compuesto principalmente de hidrógeno. Sobre el núcleo se encuentra el interior, que contiene prácticamente toda la masa del sol: el núcleo y el interior son considerados como un gran reactor nuclear y la fuente de casi toda su energía. Esta energía se propaga principalmente por radiación a las regiones externas, que a su vez transportan esta energía hacia afuera por convección y reradiación. La temperatura en la región más externa es 4000-6000 K[7].

La constante solar es la tasa de energía solar total en todas las longitudes de onda que inciden en una unidad de área expuesta normalmente a los rayos del sol, teniendo en cuenta que la intensidad varía con la distancia Tierra-Sol que toma el valor promedio de $1,496 \times 10^6$ km. La constante solar se determina en la parte más alta de la atmósfera, fluctúa ligeramente cada año [8]. Frolich et al. examinaron ocho valores de la constante solar de 1969 a 1980 recomendando el valor $I_{sc} = 1\,367 \text{ Wm}^{-2}$ [7] aceptado por World Radiation Center (WRC) , sin embargo, mediciones más actuales (2011) revelan un valor de $I_{sc} = 1\,361 \text{ Wm}^{-2}$ [8]. Utilizando este valor, considerando la distancia de la Tierra al Sol, el tamaño del Sol y la ley de Stefan-Boltzmann (ec. 2.2) se determina que la temperatura del sol es $T = 5\,777\text{K}$ [7]; con este valor de temperatura y la ley de Wien (ec. 2.3) se calcula que la longitud de onda de radiación máxima corresponde a $\lambda_{max} = 0,501 \mu\text{m}$.

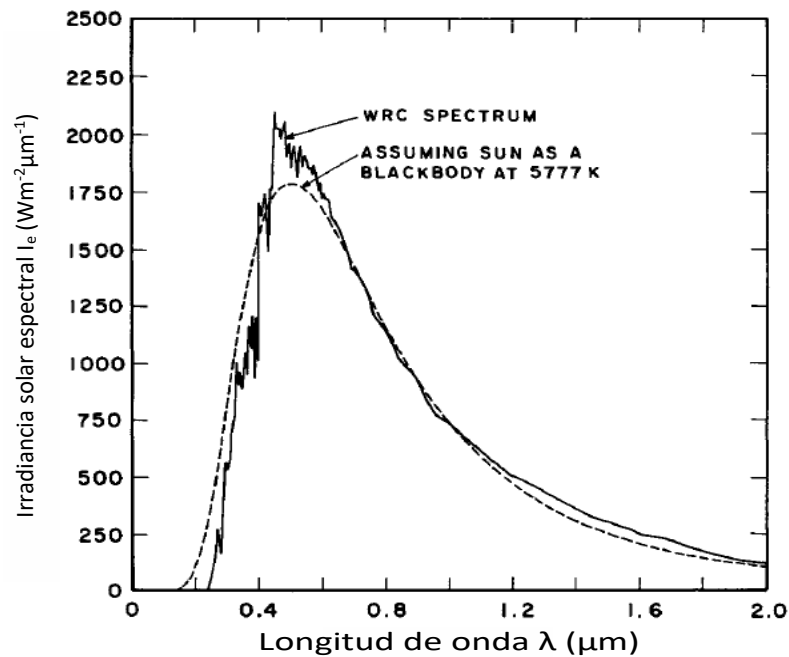


Figura 2.1. Comparación del espectro WRC con el que se obtiene al asumir que el sol es un cuerpo negro a 5777 K[7].

2.3. Distribución espectral AM0

La *masa de aire* se define como el cociente entre el recorrido óptico de un rayo solar y el correspondiente a la normal a la superficie terrestre (ángulo cenital cero) y que está relacionada con la altura solar [8]. La distribución espectral Air Mass Zero (Masa de Aire Cero o AM0), es la distribución de la radiación espectral en la parte más alta de la atmósfera; es decir, la longitud de la masa de aire que atraviesa la radiación es nula [8]. La distribución espectral AM0 es la distribución espectral extraterrestre mostrado en la figura 2.2,

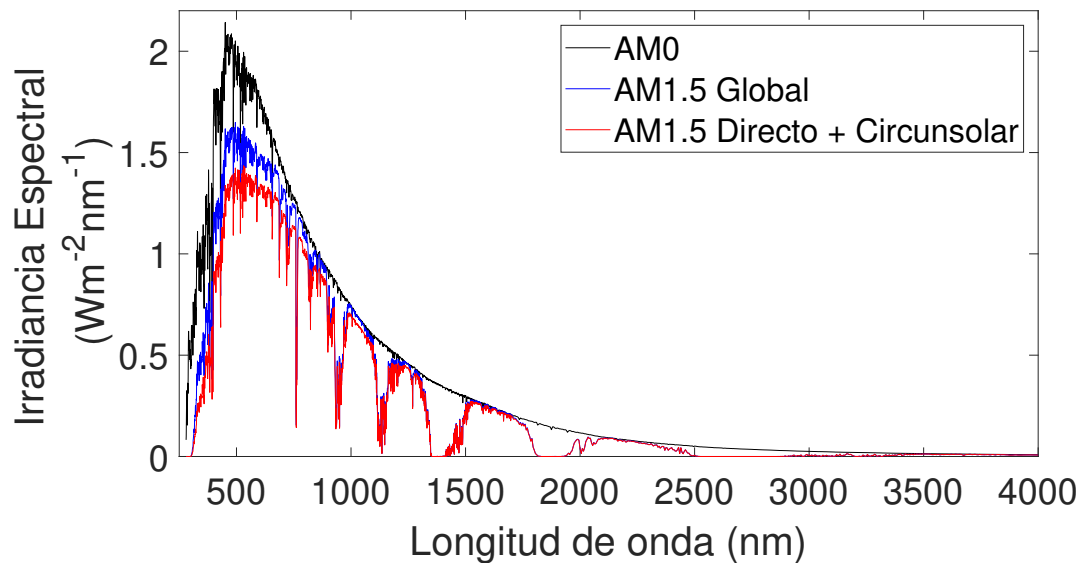


Figura 2.2. Espectro solar AM1.5 y AM0. La curva roja corresponde al espectro solar AM1.5 Directo + Circunsolar, la azul es AM1.5 Global y la negra, de mayor intensidad, es AM0 (extraterrestre) [9].

Actualmente se utiliza el espectro extraterrestre estándar ASTM E490-00 en el cual se han recopilado datos de diferentes instrumentos de diferente resolución espectral y centros de intervalos espectrales [9].

2.4. Atmósfera terrestre

La atmósfera de la Tierra consiste principalmente en nitrógeno molecular y oxígeno molecular. El aire limpio y seco contiene aproximadamente 78 % de nitrógeno, 21 % de oxígeno, 1 % de argón y 0,33 % de dióxido de carbono por volumen. Además, la atmósfera de la tierra contiene vapor de agua y partículas (aerosoles) como polvo, hollín, gotas de agua y cristales de hielo, que son muy variables en el tiempo y el espacio. En consecuencia, la atmósfera total de la tierra se divide generalmente en tres grupos: moléculas de aire seco, vapor de agua y aerosoles. La radiación solar que entra a la atmósfera terrestre se atenúa por cada uno de estos grupos. Entre las moléculas de aire seco, los principales absorbentes son CO_2 , O_3 , N_2O , CO , O_2 , CH_4 , N_2 . Los absorbentes menores son óxidos de nitrógeno NO_2 , N_2O_4 , N_2O_5 ; combinaciones

de hidrocarburos C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8 y gas sulfuroso H_2S . El vapor de agua y los gases descritos anteriormente se denominan generalmente absorbentes moleculares, la mayoría de los cuales son activos principalmente en las regiones de longitud de onda del infrarrojo cercano y lejano. El término absorbentes moleculares se emplea para distinguirlos de los gases atómicos como O y N , que absorben principalmente el máximo de UV y longitudes de onda más cortas [7].

2.5. Radiometría y fotometría

La medida de la radiación, transferencia de energía de una fuente a un detector, en términos físicos constituye el campo de la radiometría, conteniendo la medida de la radiación en todo el espectro electromagnético. El principal objetivo de la *fotometría* es la medida de la radiación en el rango visible. La radiometría describe la transferencia de energía desde una fuente a un detector, admitiendo validez del modelo geométrico de los caminos ópticos y la conservación de la energía a lo largo de un haz de rayos. Cuando esta transferencia de energía del emisor al detector se normaliza a la respuesta espectral del ojo de un observador humano, se denomina **fotometría** [8, 10, 11, 12].

2.5.1. Flujo radiante espectral ($\phi_{e,\lambda}$)

Flujo radiante o potencia radiante espectral es la potencia emitida, transferida o recibida en forma de radiación por nanómetro [11].

2.5.2. Eficiencia luminosa espectral ($V(\lambda)$)

La eficiencia luminosa espectral (de una radiación monocromática de longitud de onda λ) es definida según la CIE 18.2 [11] como la relación del flujo radiante en la longitud de onda λ_m y la longitud de onda λ , tal que ambas radiaciones producen sensaciones luminosas igualmente intensas bajo

condiciones fotométricas específicas y λ_m se elige de manera que el valor máximo de esta relación sea igual a 1.

Según la CIE hay 3 funciones particulares para la eficiencia luminosa espectral, en este caso se usará la eficiencia luminosa espectral para la visión fotópica, la cual se da para altos niveles de iluminación. El intervalo de valores para esta función en la visión fotópica es de 360 a 830 nanómetros, teniendo un máximo en 555 nanómetros [11].

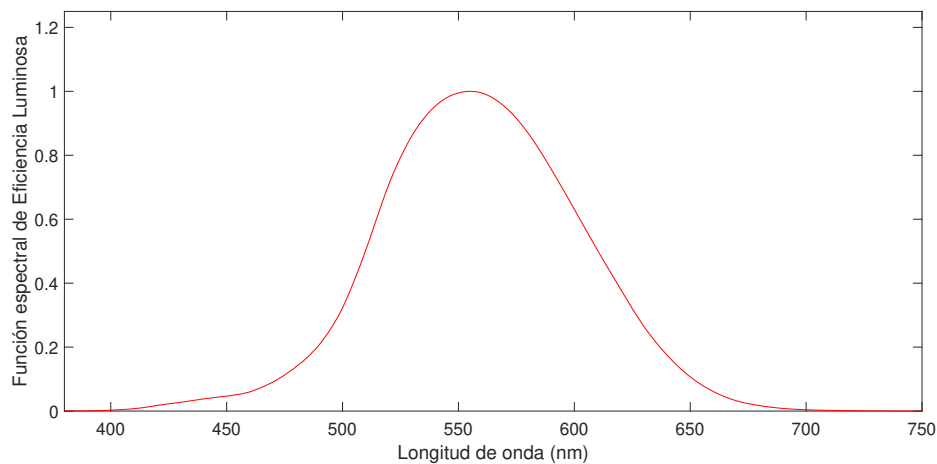


Figura 2.3. Función espectral de eficiencia luminosa de la CIE para la visión fotópica ($V(\lambda)$) [11].

2.5.3. Flujo luminoso espectral ($\phi_{V,\lambda}$)

El flujo luminoso espectral es una cantidad derivada del flujo radiante espectral $\phi_{e,\lambda}$. Su valor para la visión fotópica viene dado por [11],

$$\phi_{V,\lambda} = K_m \phi_{e,\lambda} V(\lambda), \quad (2.4)$$

donde K_m es un factor escalar conocido como máxima eficiencia luminosa espectral de radiación para la visión fotópica, su valor es $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ [11].

2.5.4. Luminancia (L_V)

Es el flujo luminoso de un elemento de superficie que rodea un punto dado, emitida en un pequeño ángulo sólido que contiene una dirección dada, por unidad de área del elemento proyectada sobre un plano perpendicular a la dirección dada. Se define como [13],

$$L_V = \frac{d^2\phi_V}{d\Omega dA \cos \theta}, \quad (2.5)$$

donde ϕ_V es el flujo luminoso emitido (reflejado o transmitido) por un haz elemental que pasa a través de un punto dado y se propaga en el ángulo sólido $d\Omega$ que contiene dicha dirección; dA es el área de una sección de ese haz que contiene dicho punto; θ es el ángulo entre la normal de dicha sección y la dirección del haz.

2.5.5. Emitancia (M_V)

Es la razón entre flujo luminoso que emite una fuente de luz y su área. Se define como [13],

$$M_V = \frac{d\phi_V}{dA}. \quad (2.6)$$

2.5.6. Flujo luminoso espectral e Irradiancia espectral

Para mediciones en el rango visible se toma en cuenta la respuesta espectral del ojo humano, por lo cual las mediciones se hacen en términos del flujo luminoso (lm) [8].

La *irradiancia espectral* ($I_{e,\lambda}$) es una cantidad radiométrica que relaciona el flujo radiante espectral con el área irradiada, su unidad es vatio por unidad de área por unidad de longitud de onda ($\text{W}/\text{m}^2\text{nm}$), se define [11],

$$I_{e,\lambda} = \frac{\phi_{e,\lambda}}{A} \text{ W}/\text{m}^2\text{nm}, \quad (2.7)$$

donde A es el área irradiada o iluminada cuya unidad es m^2 .

La relación entre el flujo luminoso espectral y la irradiancia, es resultado de la relación entre el flujo radiante espectral ($\phi_{e,\lambda}$) y flujo luminoso espectral ($\phi_{V,\lambda}$) (ec. 2.4), por lo cual la irradiancia en términos del flujo luminoso espectral se define [11],

$$I_e = \int \frac{\phi_{V,\lambda}}{K_m V(\lambda) A} d\lambda \text{ W/m}^2. \quad (2.8)$$

2.6. Light Emitting Diodes (LEDs)

El término LED se aplica únicamente a los diodos que emiten luz visible; sin embargo es común denominar LEDs a los diodos que emiten radiación infrarroja o ultravioleta, aunque en realidad se deberían llamar IREDs (Infrared Emitting Diodes) y UVEDs (Ultraviolet Emitting Diodes) respectivamente [12]. En el presente informe se referirá indistintamente como LEDs a menos que presente confusión, en este caso se aclarará apropiadamente.

Un LED está conformado por dos materiales semiconductores que han sido dopados con impurezas, un semiconductor dopado con impurezas negativas (tipo N) y un semiconductor dopado con impurezas positivas (tipo P), en la unión de estos dos tipos de semiconductores se obtiene una juntura P-N. Cuando el flujo de electrones va desde el lado N al lado P debido a un potencial eléctrico externo, los electrones y los huecos (portadores de carga positivos) se encuentran en la juntura combinándose, para que esta combinación suceda, los electrones caen de un nivel superior (banda de conducción) a un nivel inferior de energía (banda de valencia) y el cambio de energías es liberada en fotones (figura 2.4). El ancho de banda (Band Gap) es igual a la diferencia del nivel de energía de la banda de conducción y la banda de valencia [13],

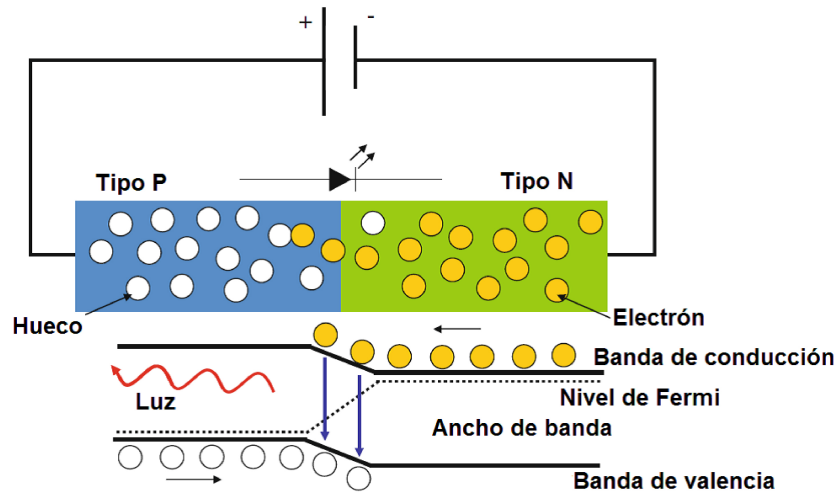


Figura 2.4. Representación de la producción de luz de un LED [13].

El flujo luminoso para N dispositivos LEDs del mismo tipo y conectados térmicamente a un mismo disipador de calor, conectados en serie (misma corriente) es [14],

$$\phi_V = N \times E \times P_d, \quad (2.9)$$

donde E es la eficacia luminosa (lm/W) que relaciona la cantidad de luz emitida por la lámpara para una potencia suministrada P_d (W).

La intensidad de emisión ($I_{emision}$) de los LED disminuye al aumentar la temperatura. Cerca de la temperatura ambiente, la intensidad de emisión sigue una función de disminución exponencial [14],

$$I_{emision} = I_{25^\circ C} \exp\left(-\frac{T-25^\circ C}{T_1}\right), \quad (2.10)$$

donde T_1 es la temperatura característica. En términos fotométricos, esta relación se refleja en la eficacia luminosa (E) dependiente de la temperatura de los LED. Siendo dispositivos semiconductores, los LEDs no deberían funcionar en una temperatura de la juntura (temperatura en la unión de los semiconductores tipo P y tipo N) por encima de $125^\circ C$. La curva exponencial de la ecuación 2.10 dentro de este rango práctico de temperatura de operación

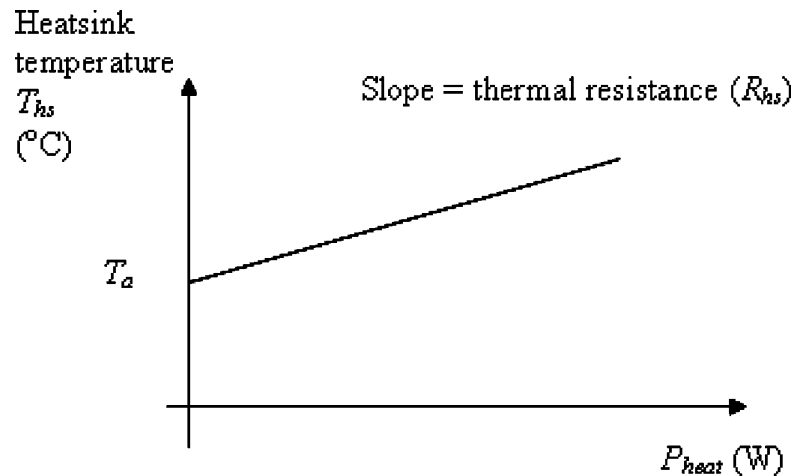


Figura 2.5. Relación típica entre la temperatura del disipador de calor y la potencia disipada en forma de calor [14]

es bastante lineal y por lo que se puede aproximar [14],

$$E = E_0[1 + k_e(T_j - T_0)] \text{ para } T_j \geq T_0 \text{ y } E \geq 0, \quad (2.11)$$

donde E_0 es la eficacia alcanzada a la temperatura T_0 (temperatura nominal típicamente de 25°C), k_e es la tasa relativa de reducción de eficacia con el incremento de temperatura y T_j es la temperatura de la juntura.

En general, la potencia suministrada al LED se puede definir como $P_d = V_d \times I_d$, donde I_d es la corriente en el diodo y V_d es el voltaje del diodo. Pero solo parte de la potencia se disipará en forma de calor. Por lo tanto, la potencia transformada en calor en un LED se define como [14],

$$P_h = k_h P_d = k_h V_d I_d, \quad (2.12)$$

donde k_h es una constante menor que 1, y representa la porción de la potencia del LED que se convierte en calor.

Considerando una relación lineal típica entre la temperatura del disipador de calor y el calor generado en el sistema LED como se muestra en la figura 2.5. Un circuito equivalente dinámico térmico simplificado del sistema LED se muestra en la figura 2.6, suponiendo que i) los N LEDs del mismo tipo se colocan en el mismo disipador de calor con una resistencia térmica de R_{hs} , ii) el LED tiene

su unión a un empaque con resistencia térmica R_{jc} ; y iii) una pasta conductora térmica y aislante eléctrica con una resistencia térmica de R_{ins} .

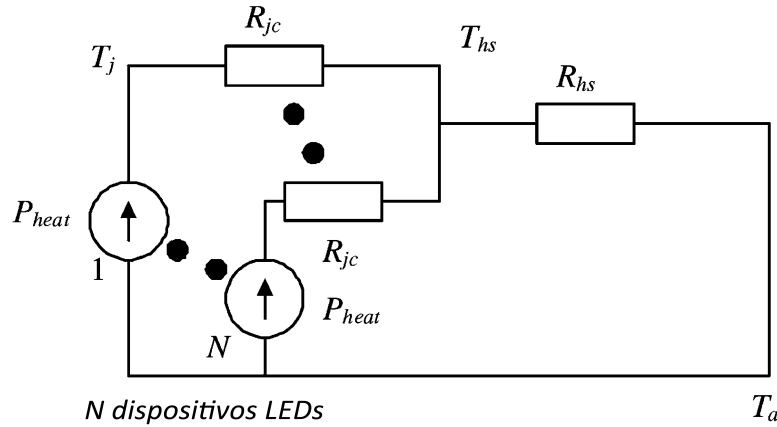


Figura 2.6. Circuito equivalente en estado estacionario simplificado con N LED montados en el mismo disipador de calor [14].

En condiciones de estado estable, el modelo térmico es como se muestra en la figura 2.6. En la práctica, el compuesto del disipador de calor o la equivalencia se pueden usar entre los LEDs y el disipador de calor para garantizar una buena temperatura contacto. La resistencia térmica (R_{ins}) de dicho conductor térmico/aislador eléctrico es relativamente pequeño en comparación con R_{jc} de LED y se desprecia en la figura 2.6 y en las ecuaciones a utilizar. El modelo de la figura 2.6, funciona de forma análoga a un circuito eléctrico donde la temperatura T es equivalente a voltaje, la potencia perdida en forma de calor P_{heat} es la corriente y la resistencia térmica R_{jc} es una resistencia eléctrica. El disipador de calor de estado estacionario la temperatura puede expresarse como [14],

$$T_{hs} = T_a + R_{hs}(NP_{heat}) = T_a + R_{hs}(Nk_h P_d), \quad (2.13)$$

donde T_a es la temperatura ambiente.

De la figura 2.6 y la ecuación 2.13, la temperatura de la unión de cada LED es por lo tanto [14],

$$T_j = T_{hs} + R_{jc}(P_{heat}) = T_{hs} + R_{jc}(k_h P_d) = T_a + (R_{jc} + NR_{hs})k_h P_d, \quad (2.14)$$

Reemplazando el valor T_j obtenido en la ecuación 2.14 se puede usar en la ecuación 2.11 [14]:

$$\begin{aligned} E &= E_0[1 + k_e(T_j - T_0)], \\ &= E_0[1 + k_e(T_a + (R_{jc} + NR_{hs})k_h P_d - T_0)], \\ &= E_0[1 + k_e(T_a - T_0) + k_e k_h (R_{jc} + NR_{hs})P_d], \end{aligned} \quad (2.15)$$

por lo tanto, de la ecuación (2.9), el flujo luminoso es [14],

$$\begin{aligned} \phi_V &= N \times E \times P_d, \\ &= NE_0[1 + k_e(T_a - T_0) + k_e k_h (R_{jc} + NR_{hs})P_d]P_d, \\ &= NE_0[1 + k_e(T_a - T_0)]P_d + k_e k_h (R_{jc} + NR_{hs})P_d^2] \end{aligned} \quad (2.16)$$

se observa que la relación entre el flujo luminoso y la potencia suministrada al LED es de la forma,

$$\phi_V = \alpha_1 P_d + \alpha_2 P_d^2, \quad (2.17)$$

considerando R_{jc} constante, recomendado en la referencia [14] para los casos óptimos de potencias utilizados en el presente proyecto.

A continuación, se muestran gráficas características para algunos casos comunes de conexión en diodos. Al lado izquierdo se muestra el circuito, la imagen central es la curva característica con líneas punteadas los

componentes por separado y la tercera imagen la curva característica del sistema especificando desde donde empieza el comportamiento lineal [15],

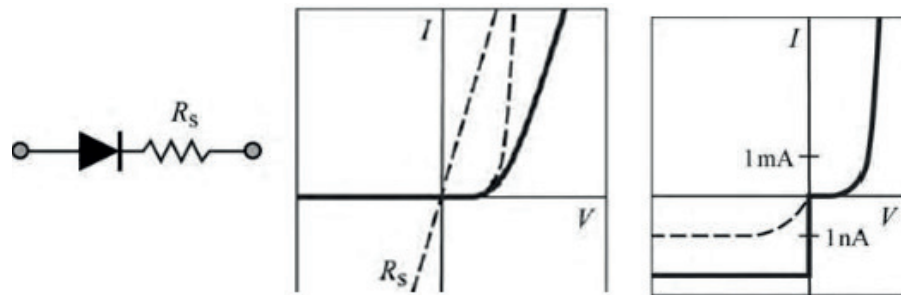


Figura 2.7. Diodo con resistencia en serie. Un diodo con una resistencia en serie muestra una desviación del comportamiento exponencial a altas corrientes hacia adelante. De acuerdo con la ley de voltaje de Kirchhoff, los voltajes a través del diodo y la resistencia se suman. Tener en cuenta que una resistencia simple tiene una forma lineal [15],

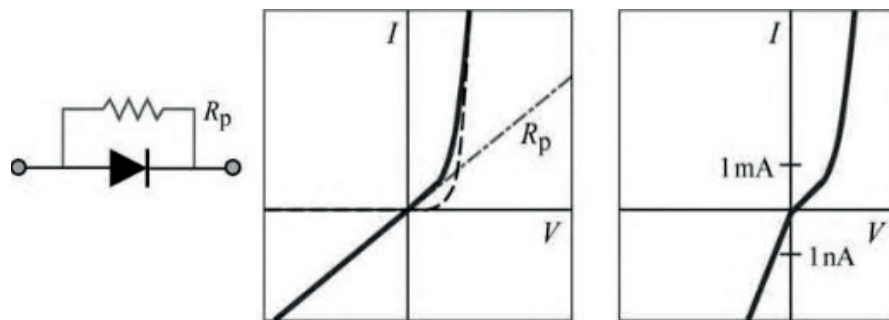


Figura 2.8. Diodo con resistencia paralela (shunt). De acuerdo con la ley de Kirchhoff, las corrientes a través del diodo y la resistencia se suman [15],

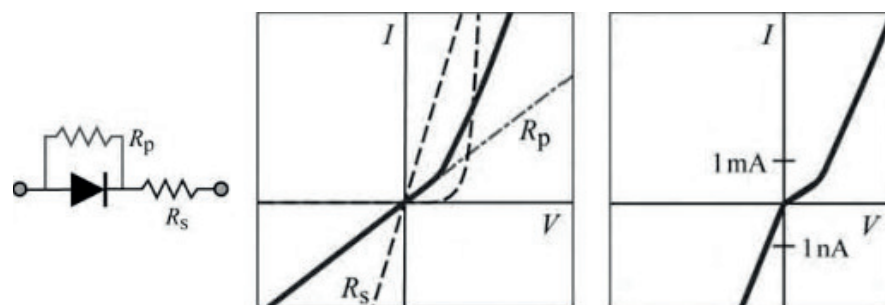


Figura 2.9. Diodo con resistencia en serie y paralela. Efectos de la resistencia y una shunt en serie [15].

En todos los casos, para corrientes mayores a 1 mA, la relación entre corriente y voltaje es lineal, por lo cual una aproximación válida sería,

$$V_d = aI_d + b, \quad (2.18)$$

donde a y b son constantes.

Utilizando la ecuación 2.17, el resultado en la ecuación 2.18 y que $P_d = V_d \times I_d$, la relación entre corriente y flujo luminoso ϕ_V es de la forma,

$$\phi_V = a_0 + a_1 I_d + a_2 I_d^2 + a_3 I_d^3 + a_4 I_d^4, \quad (2.19)$$

En un diodo ideal, cada electrón inyectado en la región activa generará un fotón (luz). La conservación de la energía requiere que la energía con la que se inyecta un electrón sea igual a la energía del fotón. Por lo tanto la conservación de energía requiere [15],

$$E_g = h\nu = eV, \quad (2.20)$$

donde e es la carga del electrón, V la diferencia de potencial, h la constante de Planck, $\nu = c/\lambda$ es la frecuencia y E_g es el Gap de energía, es la energía necesaria para que un semiconductor emita un fotón. El Gap de energía es característica de cada semiconductor y nos indica la longitud de onda a la cual se emite radiación.

A medida que la temperatura aumenta, el band gap de los semiconductores generalmente disminuye. La dependencia con la temperatura puede expresarse mediante la fórmula Varshni [15],

$$E_g = h\nu = E_{g,0K} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (2.21)$$

donde T es la temperatura del semiconductor, α y β son parámetros de ajuste conocidos como parámetros de Varshni y $E_{g,0K}$ es el gap de energía del

semiconductor a $0K$.

2.6.1. Distribución espacial

La radiación óptica producida por un LED se genera mediante un chip semiconductor montado en alguna forma de empaque. El empaque protege el chip durante el funcionamiento, incorpora los contactos eléctricos y lo soporta para su manipulación. El empaque cambia con frecuencia la distribución espectral y espacial de la potencia radiante emitida desde el chip hacia los reflectores o lentes incorporados [15]. Se muestra un patrón polar de distribución espacial típico en la figura 2.10 [16].

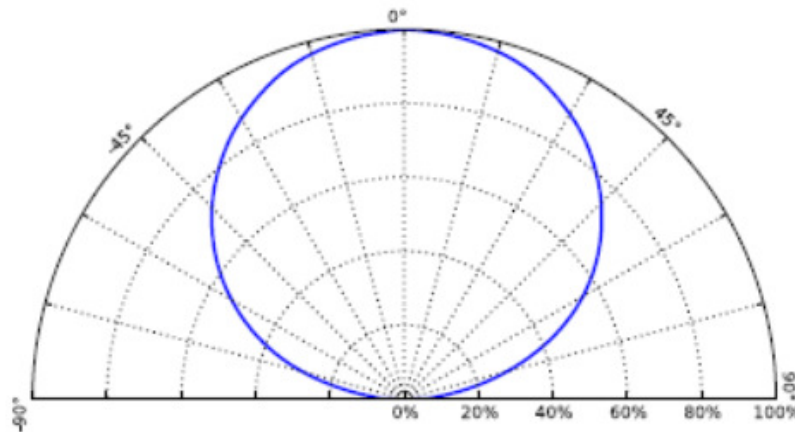


Figura 2.10. Patrón de distribución espacial típico de radiación polar de led UV de LuxeonStarLEDs [16].

2.6.2. Distribución espectral

La distribución espectral de la radiación óptica emitida por los LED es característica de estos dispositivos y difiere en varios aspectos de la de otras fuentes de radiación óptica. La distribución espectral típica de los LEDs de un solo color no es monocromática (como la emiten los láseres) ni de banda ancha (como las lámparas incandescentes), sino algo intermedio, con un ancho de banda espectral de algunas decenas de nanómetros [15]. Las distribuciones espectrales relativas típicas de los LED para la región visible se muestran en la figura 2.11 [16].

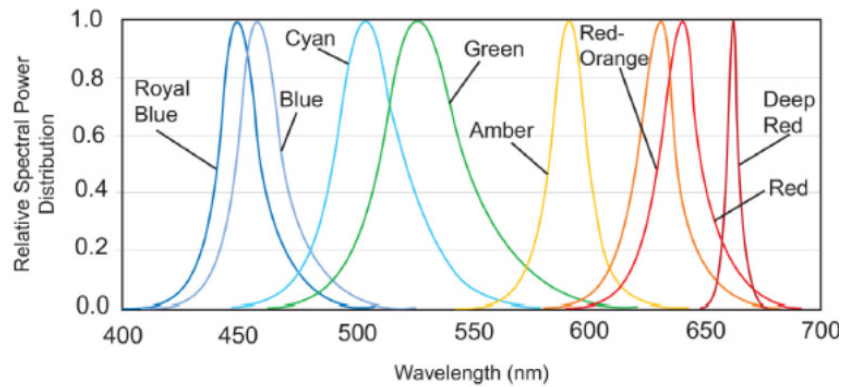


Figura 2.11. Potencia típica relativa vs longitud de onda para LUXEON Z Red, Red-Orange, Amber, Green, Cyan, Blue y Royal Blue, a 500 mA, $T=25^{\circ}\text{C}$ [16].

Generalmente la hoja de datos de los LEDs se encuentra disponible en la página del vendedor. La distribución espectral se muestra de forma relativa ya que ofrecen el mismo tipo (color) de LED de distintas potencias. La distribución espectral se presenta en forma acampanada, por lo cual se asemeja a funciones gaussianas.

2.6.3. Cantidades relacionadas a la distribución espectral

2.6.3.1. Longitud de onda pico (λ_p)

La longitud de onda al máximo de la distribución espectral se conoce como la longitud de onda pico. La distribución espectral (absoluta) normalmente se normaliza a esta longitud de onda en lugar de a una longitud de onda arbitraria, para dar una distribución espectral relativa con un valor máximo de unidad [12].

2.6.3.2. Ancho de banda espectral a niveles de media intensidad ($\Delta\lambda_{0,5}$)

El ancho de banda espectral a niveles de media potencia es calculada a partir de la diferencia de las dos longitudes de onda donde la intensidad del pico cae a 50% λ_p [12].

2.7. Métodos para aumentar la irradiancia

Generalmente los LEDs tienen un ángulo del haz de $120^\circ - 140^\circ$ [16]; donde el ángulo del haz es el ángulo formado entre dos vectores desde la fuente hasta la superficie de proyección en los puntos donde la intensidad se reduce al 50 % [12] con respecto al centro. Debido a que necesita una alta intensidad de radiación en un área pequeña y que la potencia máxima del LED es limitada por el fabricante, se puede reducir el área irradiada para concentrar la irradiancia.

2.7.1. Uso de lentes

El uso de lentes circulares o elípticos en los LEDs puede reducir el ángulo del haz, con una alta transmitancia que permita el paso de la luz. Por ejemplo la línea Luxeon tiene disponibles distintos lentes circulares entre $17,7^\circ - 39,2^\circ$ con una transmitancia mayor al 78 % [16].

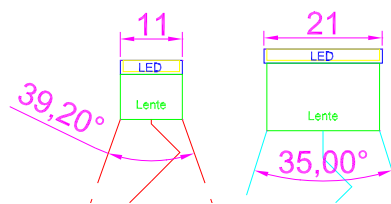


Figura 2.12. Medidas en mm. Vista de LEDs cuadrados de 10 y 20 mm de perfil, con lentes de $39,2^\circ$ y 35° respectivamente. Se muestra el ángulo de visión con guiones y el centro del haz con línea Zigzag. Se considera un 1 mm extra para el diseño.

2.8. Análisis matemático de la aproximación a AM0

La relación espectral se define como la relación entre la respuesta espectral de los LED y la del AM0. El valor de error de la norma residual es utilizado para el ajuste. Minimizando el error entre el valor real del espectro solar y el valor predicho por la suma de las irradiancias de los LED. Similar a lo desarrollado

por Plyta [17], se obtiene el error en función de las corrientes de cada LED (I_1, I_2, \dots, I_N),

$$error = |SR_{th} - I_e|, \quad (2.22)$$

donde

$$error = \begin{bmatrix} error(\lambda_1) \\ error(\lambda_2) \\ \vdots \\ error(\lambda_n) \end{bmatrix}, SR_{th} = \begin{bmatrix} SR_{th}(\lambda_1) \\ SR_{th}(\lambda_2) \\ \vdots \\ SR_{th}(\lambda_n) \end{bmatrix} \text{ y}$$

$$I_e = \begin{bmatrix} I_e(\lambda_1) \\ I_e(\lambda_2) \\ \vdots \\ I_e(\lambda_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1(\lambda_1) \\ L_1(\lambda_2) \\ \vdots \\ L_1(\lambda_n) \end{bmatrix}_{I_1} + \begin{bmatrix} L_2(\lambda_1) \\ L_2(\lambda_2) \\ \vdots \\ L_2(\lambda_n) \end{bmatrix}_{I_2} + \dots + \begin{bmatrix} L_N(\lambda_1) \\ L_N(\lambda_2) \\ \vdots \\ L_N(\lambda_n) \end{bmatrix}_{I_N}$$

Todos los componentes se expresan de forma matricial. La función de error $error(\lambda_j)$ es la diferencia entre el valor modelado y objetivo [9] para la longitud de onda λ_j . $SR_{th}(\lambda_j)$ es la respuesta espectral objetivo para la longitud de onda λ_j . $I_e(\lambda_j)$ es la irradiancia espectral obtenida de la superposición de irradiancias espectrales de cada LED en la longitud de onda λ_j . $L_i(\lambda_j)_{I_i}$ es la respuesta espectral del i -ésimo LED de un total N LEDs distintos para la longitud de onda λ_j , por el cual pasa una corriente I_i .

2.9. Diseño del disipador de calor

Los disipadores de calor son un tipo de intercambiadores de calor utilizados para refrigerar los dispositivos electrónicos debido a la simplicidad de su fabricación, bajo costo y confiabilidad. Las superficies extendidas de los disipadores de calor son aletas de placa plana o formas de aletas de clavijas [18]. Para el diseño particular del proyecto se debe tener en cuenta que es necesario tener planos inclinados del disipador donde se colocan los LEDs, con el objetivo de que todos los haces de luz tengan un mismo punto central de iluminación.

2.10. Estándar de clasificación de un simulador solar

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials - ASTM) designación E972-05 [3] especifica los criterios para la clasificación de un simulador solar. Los criterios de clasificación de un simulador solar son la *no uniformidad espacial de la irradiancia*, la *estabilidad temporal de la irradiancia* y la *aproximación espectral* [3].

La *no uniformidad espacial de la irradiancia* (S_{NE}) se determina como [3],

$$S_{NE} = \frac{I_{e,max} - I_{e,min}}{I_{e,max} + I_{e,min}} \times 100 \%, \quad (2.23)$$

donde I_e es la irradiancia medida en distintos puntos en el área iluminada.

La *estabilidad temporal de la irradiancia* (T_{IE}) se determina como [3],

$$T_{IE} = \frac{I_{e,max} - I_{e,min}}{I_{e,max} + I_{e,min}} \times 100 \%, \quad (2.24)$$

donde I_e es la irradiancia medida en un mismo punto en el área iluminada en distintos tiempos.

La *aproximación espectral* (SM) es la relación del porcentaje real de irradiancia total sobre un intervalo de longitud de onda definido al porcentaje requerido especificado en la Tabla 3.3 para ese mismo intervalo.

Capítulo 3

Procedimiento experimental

3.1. Búsqueda de LEDs de alta potencia disponibles en el mercado

Se investigaron diversas empresas distribuidoras de LEDs de alta potencia, tales como LuxeonStar, Tao Yuan, Thorlabs, Irtronix, UVphotonics, Vishay, Mouser, entre otros.

3.2. Caracterización espectral

Con el objetivo de caracterizar los LEDs, se utilizó la esfera integradora para determinar su espectro de radiación para distintos valores de corriente suministrados. Midiendo, a la vez, sus parámetros de voltaje, desplazamiento de pico y ancho de banda espectral a niveles de media intensidad.

3.2.1. Esfera integradora

El método de la esfera integradora es un método para obtener el flujo luminoso o flujo radiante. El funcionamiento de la esfera integradora se basa en el uso de una superficie lambertiana [13].

3.2.1.1. Superficie lambertiana

Una superficie lambertiana es una superficie, la cual emite o refleja en todas direcciones una luminancia constante, es decir la luminancia en la dirección perpendicular a la superficie ($L_{V,0}$) es igual a la luminancia ($L_{V,\theta}$) en una dirección con un ángulo θ respecto a la normal de la superficie [13],

$$L_{V,0} = L_{V,\theta} = cte. \quad (3.1)$$

De las ecuaciones (2.5) y (2.6),

$$M_V = \int_{2\pi sr} L_V \cos \theta d\Omega = L_V \cos \theta d\Omega = L_V \pi. \quad (3.2)$$

Si sobre una superficie lambertiana de reflectancia ρ incide una iluminancia E_0 , la emitancia sería $M_V = \rho E_0$. Por lo tanto [13],

$$L_V = \frac{\rho E_0}{\pi}, \quad (3.3)$$

y no dependería de la dirección.

3.2.1.2. Teoría de la esfera integradora

La esfera integradora es un dispositivo óptico muy versátil que está diseñado para obtener por múltiples reflexiones en su superficie interna, que es homogénea y lambertiana, un valor de iluminancia proporcional al flujo luminoso de fuente de luz [13]. Es como su nombre lo dice una esfera y debe cumplir con ciertas propiedades:

- La puerta de entrada(s) y salida(s) deben ser muy pequeñas en comparación con el radio de la esfera.
- Todos los objetos que se encuentren en la esfera deben ser pequeños en comparación con el radio de la esfera de tal manera que su influencia en las reflexiones sea irrelevante.

- La superficie interna de la esfera debe ser una superficie lambertiana con una alta reflectancia. Si el detector fuera un luxómetro la reflectancia debe ser independiente de la longitud de onda.

Para explicar el funcionamiento de la esfera integradora se considera una esfera integradora perfecta como muestra la figura 3.1, donde la iluminancia I_{lum_0} es causada exclusivamente por la fuente de luz y las iluminancias $I_{lum_1}, I_{lum_2}, \dots$ son causadas por la primera, segunda, . . . reflexión en la superficie de la esfera.

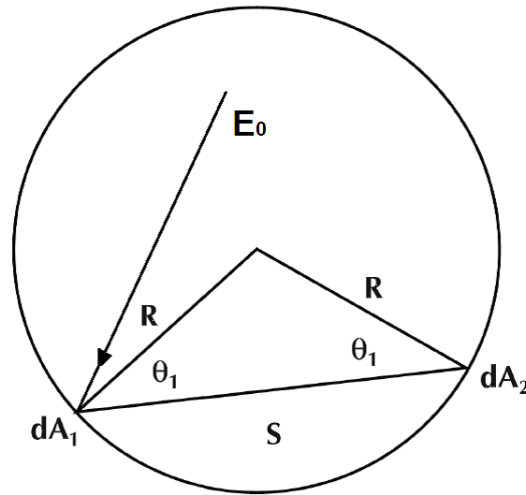


Figura 3.1. Geometría de una esfera integradora ideal de radio R [13],

La iluminancia tras la primera reflexión es [13],

$$I_{lum} = \int_{esfera} \frac{I_{lum_0} \rho}{4\pi R^2} dA_1 = \frac{\rho}{4\pi R^2} \int_{esfera} E_0 dA_1 = \frac{\rho \phi_0}{4\pi R^2}, \quad (3.4)$$

de igual forma se determina la iluminancia para la segunda reflexión, pero en lugar de I_{lum_0} se coloca I_{lum_1} obteniendo,

$$I_{lum_2} = \frac{\rho^2 \phi_0}{4\pi R^2}, \quad (3.5)$$

la iluminancia en k -ésima reflexión es,

$$I_{lum_k} = \frac{\rho^k \phi_0}{4\pi R^2}, \quad (3.6)$$

por lo tanto, la suma de iluminancias en un punto donde no incide directamente la luz es [13],

$$Illum_T = Illum_1 + Illum_2 + Illum_3 + \dots = \sum_0^{\infty} \frac{\rho^k \phi_0}{4\pi R^2} = \frac{\phi_0}{A_{esfera}} \frac{\rho}{1 - \rho}, \quad (3.7)$$

donde $K = \rho/(A_{esfera}(1 - \rho))$ se le denomina constante de la esfera y es la relación entre la iluminancia y el flujo luminoso de la fuente de luz y depende solo de dos factores, la reflectancia y el área de la esfera, en un caso ideal. Sin embargo en un caso real también incluye la puerta de entrada y de salida, la superficie de la lámpara que se encuentra dentro de la esfera que también absorbe luz, la superficie de los obstáculos y otros. Se obtiene que la iluminancia total en cualquier punto de la esfera donde se evite la luz directa de la fuente es proporcional al flujo luminoso de la fuente. Cabe resaltar que los cálculos realizados corresponden a una esfera ideal.

3.2.1.3. Método de la sustitución

La esfera integradora halla el flujo luminoso por comparación entre 2 lámparas, la primera es la lámpara que se desea medir a la que se llama lámpara de test (T) y una lámpara cuyo flujo luminoso es conocido a la que se le llama lámpara de referencia (S). Debido a que no siempre T y S son iguales y esto influye en la comparación debido a que dos diferentes lámparas pueden absorber la luz de diferentes maneras, es necesario introducir una nueva característica en el proceso de medición, la lámpara auxiliar (A) [13].

En las figuras 3.2A y 3.2B se logra apreciar que S y A están en la esfera; la absorción en esos 2 casos es la misma y el valor de la constante de la esfera no cambia. De manera similar para las 3.2C y 3.2D donde T y A están dentro de la esfera [13].

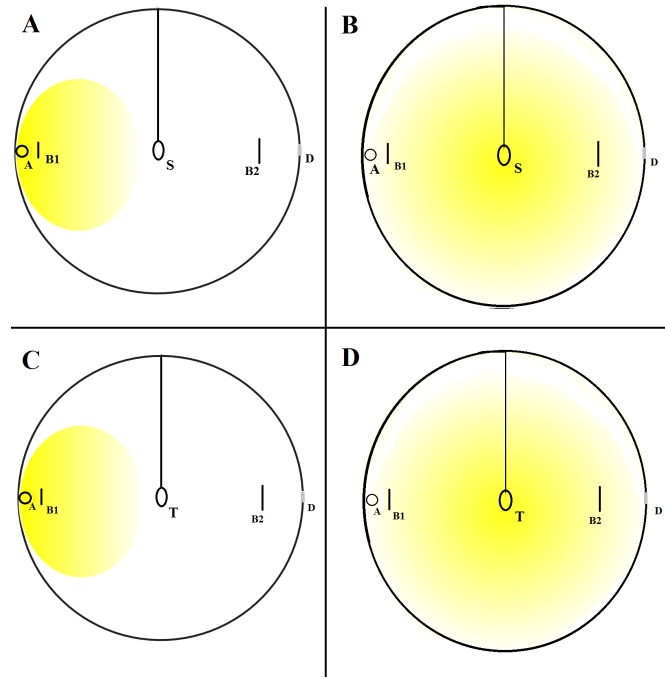


Figura 3.2. Pasos del método de sustitución [13].

Por lo cual se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 K_R &= \frac{\phi_R}{E_R} = \frac{\phi_a}{E_{aR}} \\
 K_T &= \frac{\phi_T}{E_T} = \frac{\phi_a}{E_{aT}},
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

donde K_R es la constante de la esfera con la lámpara de referencia dentro de la esfera, K_T es la constante de la esfera con la lámpara de test dentro de la esfera, ϕ_R es el flujo luminoso de la lámpara de referencia, ϕ_T es el flujo luminoso de la lámpara de test, ϕ_a es el flujo luminoso de la lámpara auxiliar, E_{aR} es la iluminancia debido al flujo de la lámpara auxiliar con la lámpara de referencia dentro de la esfera, E_{aT} es la iluminancia debido al flujo de la lámpara auxiliar con la lámpara de test dentro de la esfera, E_R es la iluminancia debido al flujo de la lámpara de referencia y E_T es la iluminancia debido al flujo de la lámpara de test [13].

En ambas ecuaciones se tiene el valor de flujo luminoso de lámpara auxiliar (ϕ_a), al igualar se obtiene,

$$\phi_T = \frac{E_T}{E_{aT}} \times \frac{E_{aR}}{E_R} \times \phi_R,
 \tag{3.9}$$

con lo cual se determina el flujo de la lámpara de test a partir del flujo conocido de la lámpara de referencia (ϕ_R).

Las esferas acopladas con un espectro radiómetro se obtiene el flujo luminoso por unidad de longitud de onda [13],

$$\phi_{T,\lambda} = \frac{E_{T,\lambda}}{E_{aT,\lambda}} \times \frac{E_{aR,\lambda}}{E_{R,\lambda}}, \quad (3.10)$$

donde el subíndice λ indica que los valores dependen de la longitud de onda, y donde $\phi_{T,\lambda}$ y $\phi_{R,\lambda}$ son las concentraciones espectrales de flujo radiante de las lámparas de test y referencia respectivamente (W/nm) [13]. En particular en el proyecto se utiliza,

Tabla 3.1. Esfera integradora y espectro radiómetro [19].

Marca-modelo	Diámetro (cm)	Lámpara Auxiliar	Sensor/Rango (nm)
Labsphere-LMS-400	100	Sí	Espectro radiómetro Labsphere CDS-1100 / 250-800 nm

3.3. Análisis de regresión de las variables lumínicas

Se utilizó MATLAB para realizar un análisis de regresión a funciones concordantes con lo detallado en el marco teórico. Tomando en cuenta lo detallado en las secciones 2.6.3.1, 2.6.3.2, 2.5.1 y 2.18.

3.4. Determinación de la irradiancia espectral de cada LED seleccionado

Se fijó la altura del juego de LEDs con respecto al área irradiada en $h=15$ cm, luego de ser reducida por el uso de lentes, se determina el área irradiada de

cada tipo de LED. Por ejemplo en la figura 3.3 se muestra el diámetro del área irradiada,

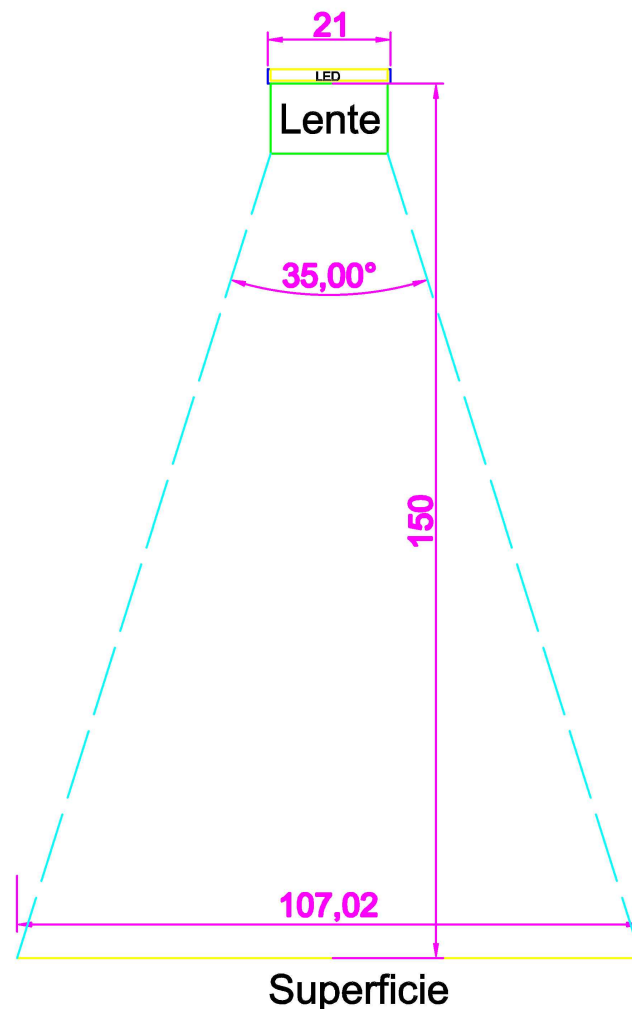


Figura 3.3. Diámetro del área irradiada por un LED de 20 mm con un lente circular de 35° a una distancia de 150 mm (15 cm), se obtiene que el diámetro del área circular irradiada es 107,02 mm.

Con la caracterización realizada a los LEDs, en la cual se mide la flujo radiante espectral, y con la integral de la curva se determina el flujo radiante total. Con el flujo radiante y el área iluminada, se obtiene la irradiancia (ec. 2.8). Para el cálculo del mismo se utiliza el software MATLAB.

3.5. Medida de la distribución espacial de la irradiancia

Con el objetivo de determinar de valor exacto de el ángulo de visión del LED con lente, se construye un sistema de barrido en dos dimensiones con el uso de dos estructuras internas de DVD's y un sensor, todos conectados a un Arduino UNO. Se ensamblan dos estructuras internas de DVD's de manera perpendicular uno sobre otro, de tal forma que el movimiento del primer cabezal pueda mover la estructura completa del otro. Ambas estructuras cuentan con un sistema basado en un motor DC para realizar el movimiento, ambos motores DC se controlan directamente por los pines digitales de un Arduino.

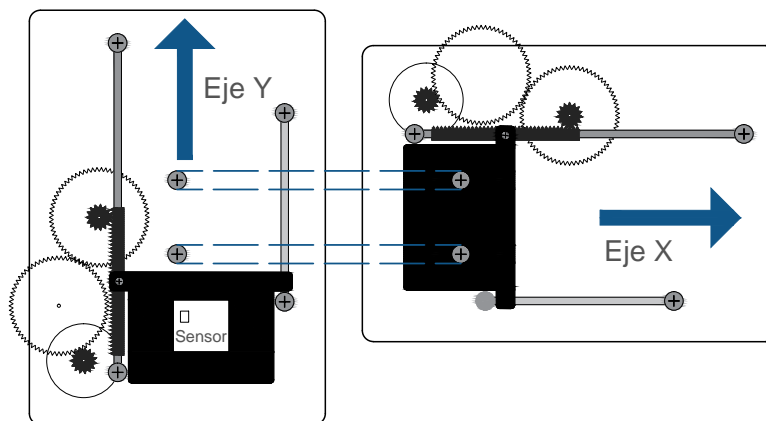


Figura 3.4. Sistema de barrido diseñado en AutoCAD 2013. Vista desde arriba de las partes del sistema de barrido 2D. **Izquierda:** en la parte superior, se ensambla el sensor. **Derecha:** en la parte superior, se ensambla la estructura superior. Ambas estructuras están unidas por tornillos una sobre otra (línea punteada azul),

donde ambas estructuras se programan tal que 230 pasos sean equivalentes a 36,5 mm, es decir cada paso es equivalente a $158,7 \mu\text{m}$ aproximadamente.

En el segundo cabezal se coloca un sensor sensible a la luz a analizar. En la siguiente tabla se especifica las características de los sensores a utilizados.

Tabla 3.2. Sensores sensibles a los LEDs [20].

Parámetro	Sensor	
	ML8511	BPW34
Espectro	UV-A / UV-B	VIS / NIR
Rango espectral (nm)	280 – 440	430 – 1100
Pico de máxima sensibilidad (nm)	365	900
Tipo de señal	Análoga	Análoga
Ángulo de visión (°)	88,8	130
Área sensible (mm ²)	15	7,5
Tiempo de respuesta (μ s)	1×10^3	0,2

3.6. Clasificación de un simulador solar

Los criterios de clasificación se especifican en esta sección en base al criterio utilizado por Bazzi et al [3].

Tabla 3.3. Clasificación según rendimiento del simulador [20],

Característica	Clase A	Clase B	Clase C
SM	0,75 – 1,25	0,6 – 1,4	0,4 – 2,0
S_{NE}	$\leq 2\%$	$\leq 5\%$	$\leq 10\%$
T_{IE}	$\leq 2\%$	$\leq 5\%$	$\leq 10\%$

donde S_{NE} es *no uniformidad espacial de la irradiancia*, T_{IE} es la *estabilidad temporal de la irradiancia* y SM es la *aproximación espectral* [3].

Para el caso de S_{NE} y T_{IE} se utilizan las ecuaciones 2.23 y 2.24, para determinar SM se trabaja de forma porcentual con respecto al total del espectro a analizar.

Tabla 3.4. Distribución porcentual de requerimientos de irradiancia [3]

I_e total (mW/m ²)	Longitud de onda (nm)	% del total de I_e	I_e requerida (mW/m ²)
382,59	390 - 425	14,17	54,21
	425 - 460	16,83	64,4
	460 - 495	18,11	69,29
	495 - 530	17,22	65,88
	530 - 565	17,06	65,28
	565 - 600	16,61	63,54

3.7. Obtención de perfil AM0 de 390 a 600 nm

Se utilizó la función *fmincon* de MATLAB para determinar los valores de corriente necesario para cada tipo LED (ec. 2.22) y así lograr aproximarse al espectro objetivo AM0. En caso de que se supere el máximo de corriente permitido por el fabricante, se utiliza un LED adicional del mismo tipo espectral.

3.8. Determinación de la corriente necesaria de cada tipo de LED

La potencia óptica correspondiente a cada LED se especifica en la hoja de datos [16] para una corriente de trabajo. Sin embargo, para el objetivo del proyecto, se necesita trabajar con una potencia óptica específica determinada por la corriente de trabajo. Por ello con la data obtenida de la esfera integradora se realiza un análisis de regresión, dando la forma de la ecuación 2.19.

Adicionalmente, se toma en cuenta los criterios de desplazamiento de longitud de onda pico y el ancho de banda espectral a niveles de media intensidad (sección 2.6.3.2), que varían en consecuencia de la variación de corriente.

3.9. Diseño de un disipador de calor como soporte de los LEDs

El diseño del disipador de calor se realizó considerando el tamaño de los tipos de LEDs con lentes a utilizar, así como el punto iluminado en el centro del haz de cada tipo de LED a una distancia de 15 cm. También se consideró que no haya ningún obstáculo en el camino del haz de cada LED. Se utilizó el software AutoCAD 2013 para el diseño en dos y tres dimensiones.

3.10. Contrucción de un multilector de corriente para cada tipo de LED

La optimización realizada se basa en la corriente suministrada a cada LED, por ello es necesario conocer la corriente que pasa en cada uno casi al mismo tiempo.

Basándose en la *ley de Ohm*, al conocer el valor de la resistencia y leyendo la caída de voltaje, se obtiene la corriente.

Entonces, se agrega al circuito de alimentación del LED una resistencia de precisión *shunt*, al ser una resistencia muy pequeña, se utiliza un amplificador de voltaje AD620. Una vez amplificada la caída de voltaje es posible leer dicho valor con un controlador como Arduino.

La amplificación depende del valor de resistencia colocado en los pines R_G del amplificador operacional AD620 según,

$$G = \frac{49,4k\Omega}{R_G} + 1. \quad (3.11)$$

Adicionalmente se agrega un portafusible para la protección del circuito.

Capítulo 4

Resultados experimentales

4.1. Medida del flujo radiante de LEDs para diferentes valores de corriente suministrada

Para los LEDs en el espectro visible y ultravioleta cercano, sus características se midieron con la esfera integradora y fueron detalladas en la tabla 3.1.

Las medidas se realizaron para distintos valores de corriente, con su respectivo lente para concentrar la luz.

La data obtenida fue recopilada en una misma gráfica para cada tipo de LED, detallando la corriente en cada curva. Se utilizó el programa *Analisis1LED* realizada en MATLAB, el código utilizado se especifica en el apéndice B.1.

A continuación se muestran los espectros para el LED Blue de la línea Luxeon Z. Todos los espectros obtenidos de los LEDs se detallan en el apéndice C, figuras C.1 hasta C.7.

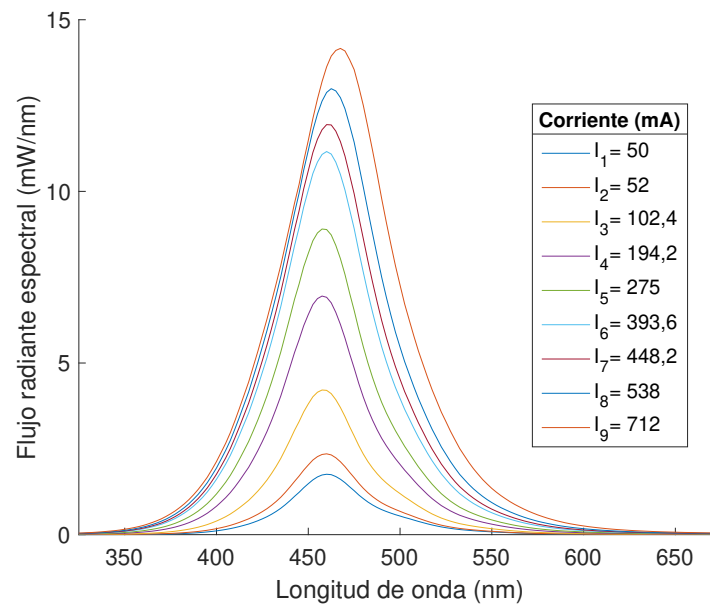


Figura 4.1. Espectros de radiación de un LED Blue Luxeon en Zaber Z1 de 36 lm [16].

Con la data obtenida de cada LED, se realizó un análisis de regresión (3.3) para obtener las ecuaciones en función de la corriente de los desplazamientos de picos, el ancho de media intensidad, el flujo radiante y voltaje.

A continuación se muestra el análisis realizado para el LED Blue de línea Luxeon Z. Todos las curvas características obtenidas de los LEDs se detallan en el apéndice C, figuras C.8 hasta C.15 del apéndice C. El programa utilizado se detalla en el apéndice B.1.

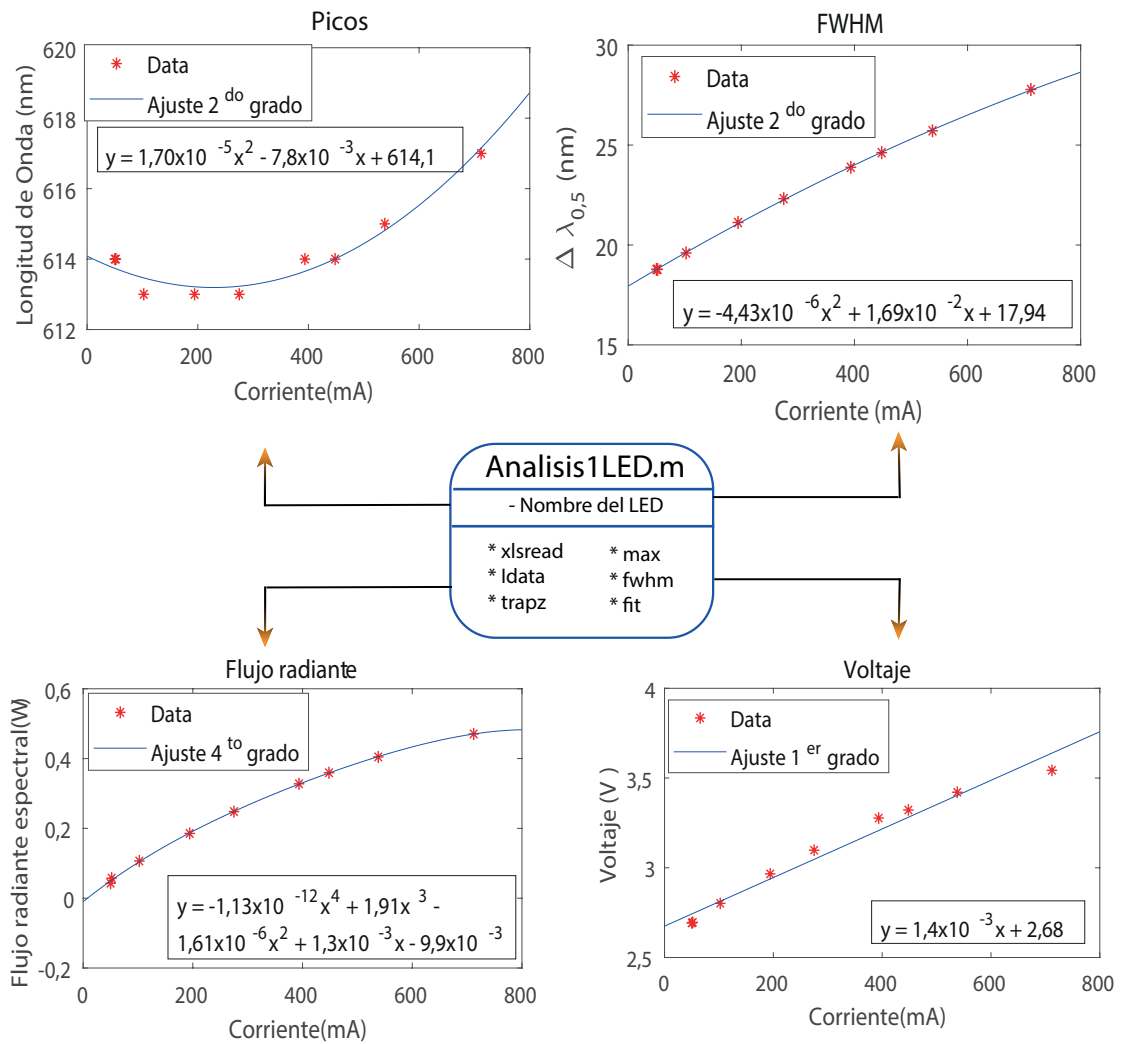


Figura 4.2. Análisis de la data obtenida en la figura 4.1 para el LED Blue. Ajustes de curvas y gráficos realizados en MATLAB. Los “*” son las funciones utilizadas en el programa principal de MATLAB y “-” son los valores entrantes necesarios para ejecutarse.

4.2. Determinación de ángulo de irradiancia

Los ángulos de irradiancia de cada lente, de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y $20 \times 20 \text{ cm}^2$, se determinan utilizando el sistema de barrido descrito en la sección 3.5. Se miden en 5 casos de diferentes alturas, en cada caso se determina el ángulo de visión así como la eficiencia del lente.

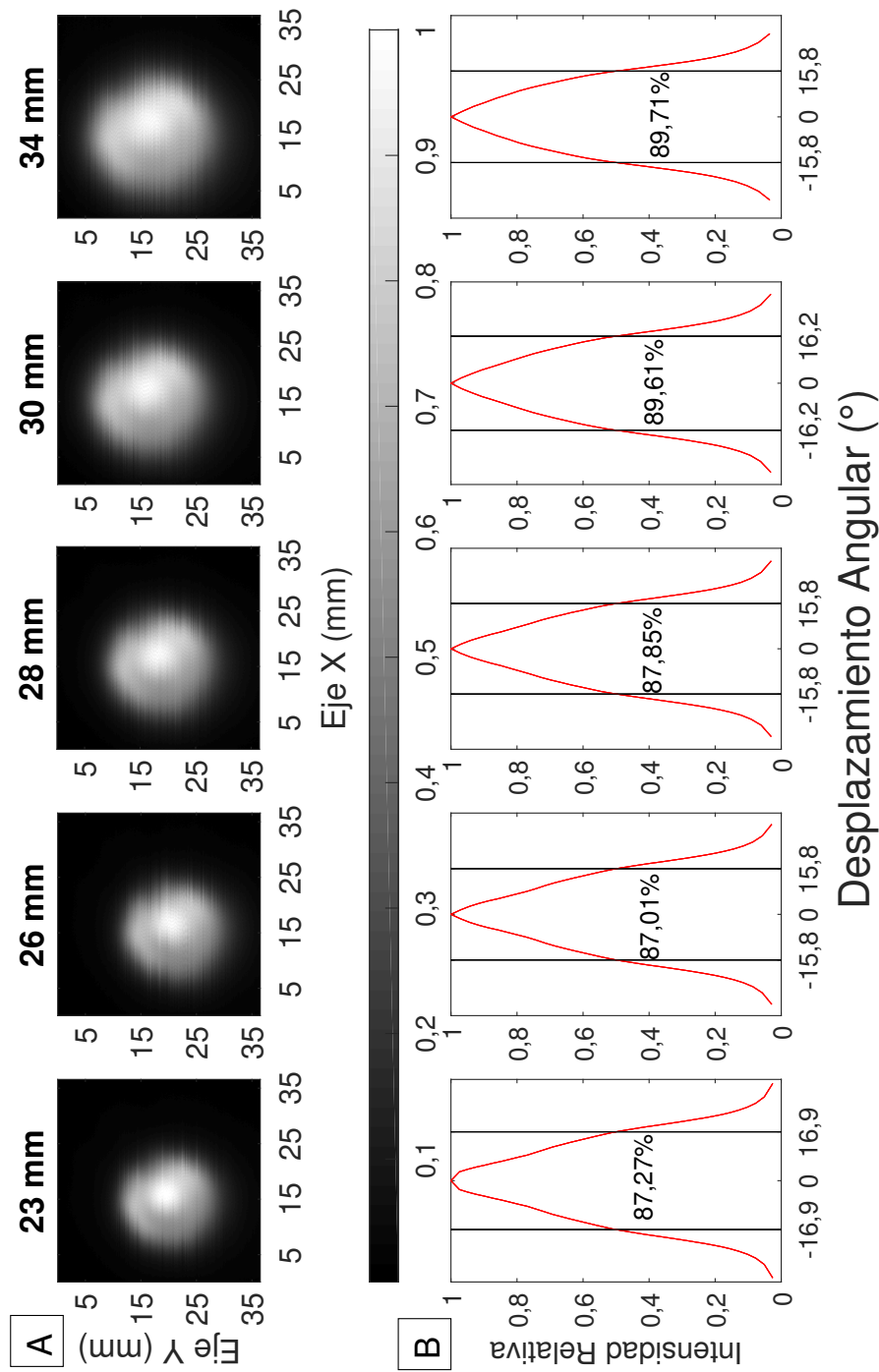


Figura 4.3. Patrón de distribución del lente de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. A. Patrón de distribución espacial. B. Patrón de distribución angular. Promediando se determina el ángulo en $16,10^\circ$ con una eficiencia de 88,29%.

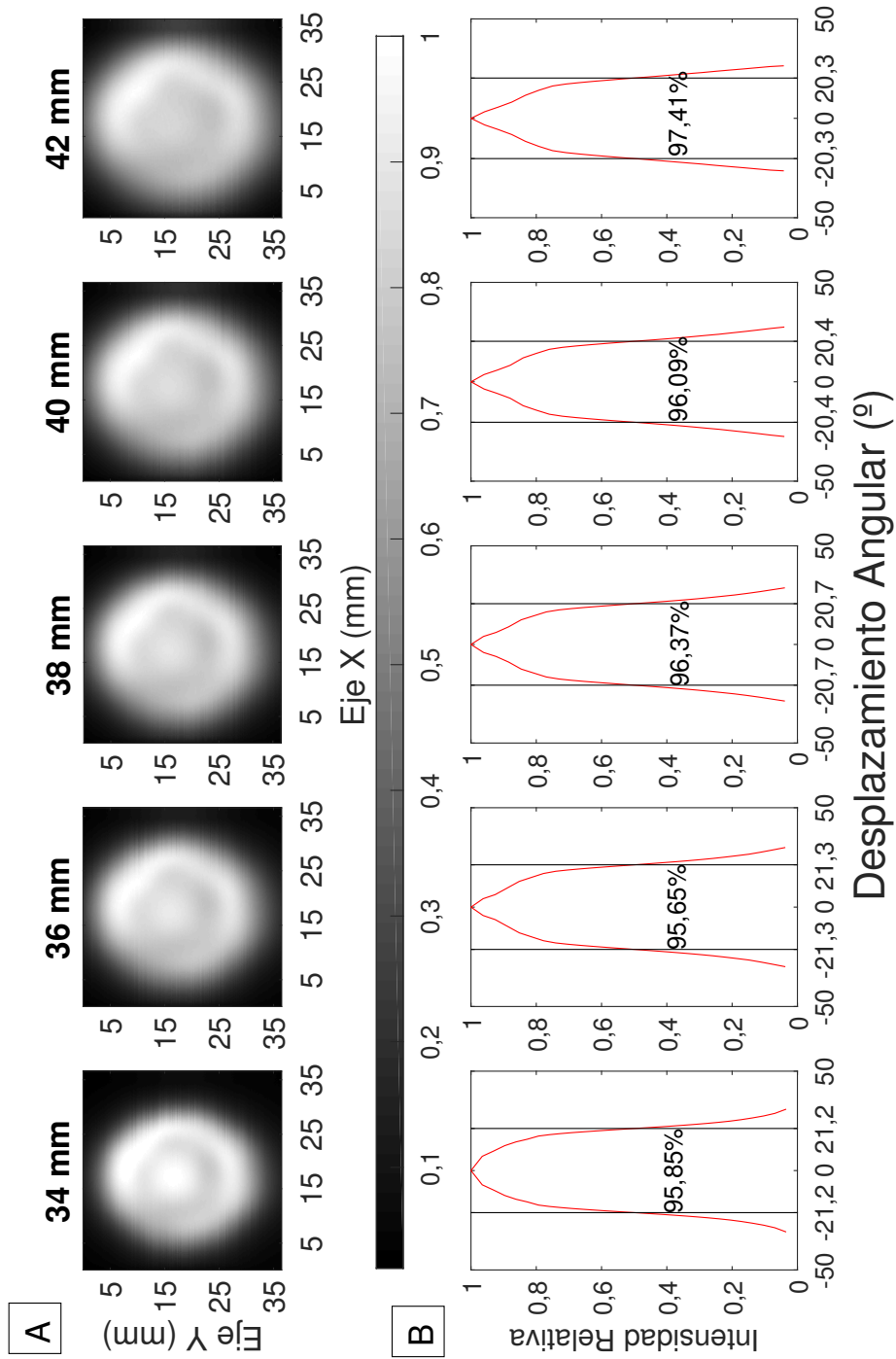


Figura 4.4. Patrón de distribución del lente de $20 \times 20 \text{ cm}^2$. **A.** Patrón de distribución espacial. **B.** Patrón de distribución angular. Promediando se determina el ángulo en $20,75^\circ$ con una eficiencia de $96,27\%$.

Tabla 4.1. Resultados del ángulo de visión de cada lente para una distancia de 0,15 m.

	Lente de $10 \times 10 \text{ cm}^2$	Lente de $20 \times 20 \text{ cm}^2$
Ángulo de visión ($^\circ$)	16, 10	20, 75
Área iluminada (10^{-3} m^2)	5, 89	10, 15
Eficiencia (%)	88, 29	96, 27

4.3. Perfil AM0 simulado

Se utilizó el programa en MATLAB llamado *OptimizationLED1611* especificado en el apéndice B.2. Dicha función se basa la función de MATLAB *fmincon*, que es utilizada para minimizar la suma de errores, definido en la ecuación 2.22, a través de la función objetivo *funobj1611* (B.2). La función *OptimizationLED1611* utiliza a su vez la función *Espectros1611* para determinar la irradiancia total, la irradiancia parcial y el área de cada LED. Para determinar el área, y con ello la irradiancia, se utiliza el ángulo hallado en las figuras 4.3 y 4.4 con su respectiva eficiencia.

La función *Espectros1611* (B.2) utiliza las funciones *predictorCurva* (B.3) e *Irradiance1611* (B.3). La primera se utiliza para obtener una curva de radiación espectral de un tipo de LED para una corriente dada, se basa en las figuras correspondientes al análisis de regresión (figuras C.8 a C.15). El segundo utiliza la radiación espectral que devuelve la función *predictorCurva*, al dividirlo por el área correspondiente devuelve la irradiancia espectral y el área.

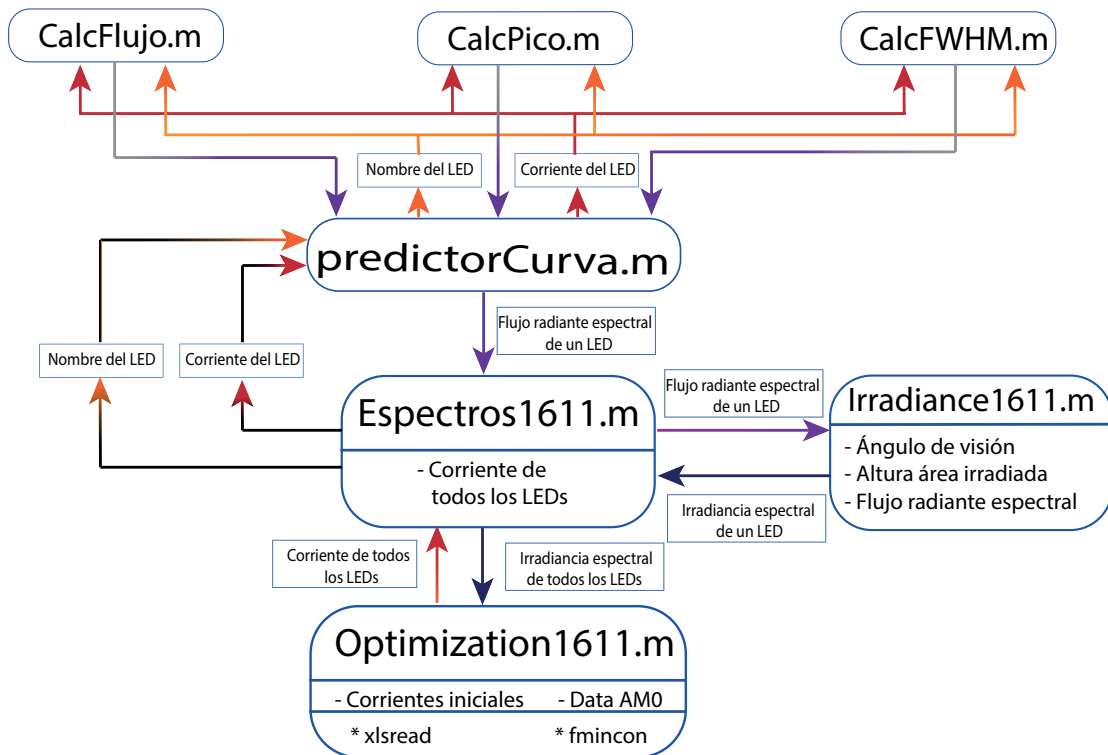


Figura 4.5. Diagrama de flujo de los códigos MATLAB utilizados para la obtención del perfil AM0. Al omitirse el programa *Optimization1611* se utiliza como un simulador de espectros para las corrientes suministradas. Los "*" son las funciones utilizadas en el programa principal de MATLAB y "-" son los valores entrantes necesarios para ejecutarse.

Finalmente todos los resultados se almacenan en un archivo de Excel. En dicho archivo se obtienen los valores de corriente que debe pasar por cada LED para obtener el espectro objetivo.

Tabla 4.2. Corrientes de cada LED para obtener AM0.

LED	Longitud de onda pico (nm)	Corriente (mA)
UV2	400	330,91
UV3	405	103,40
UV4	415	182,55
Blue	465	583,51
Cyan	505	233,33
Lime	538	368,77
White	445/460	496,03

Los valores obtenidos de corriente para cada tipo de LED son ingresados al simulador de espectros, se obtiene el espectro simulado en la figura 4.6,

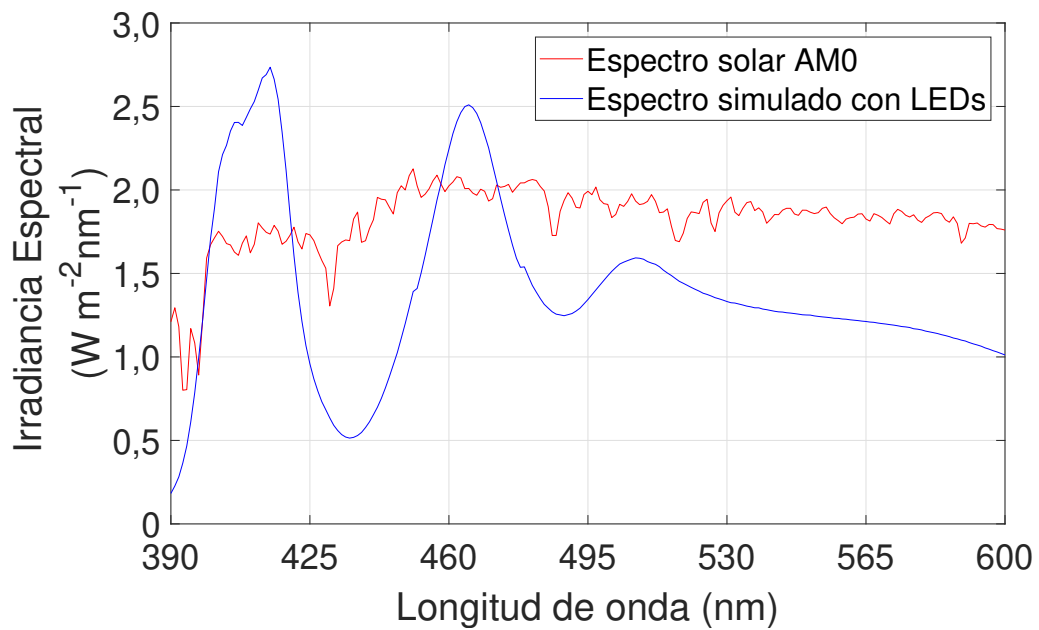


Figura 4.6. Comparación entre el espectro simulado y el espectro objetivo AM0.

4.4. Diseño del disipador y soporte de los LEDs

El diseño fue realizado en AutoCAD 2013. Consiste en tres láminas circulares concéntricas de distinta inclinación, los cuales se encuentran distanciados 150 mm a un punto central. Los ángulos de inclinación de cada nivel (10° y 20°), son determinantes para enfocar todos los LEDs en un mismo punto central.

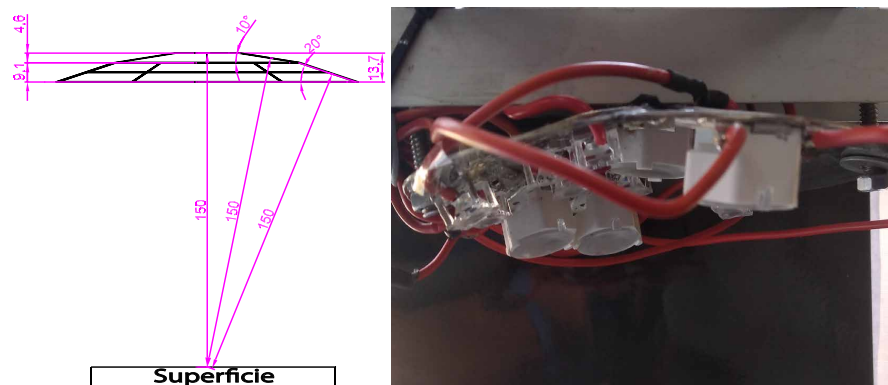


Figura 4.7. Unidades en mm. Disipador de calor diseñado en AutoCAD 2013. **Izquierda.** Consiste en tres superficies cónicas de distinta inclinación los cuales distan 150 mm con respecto a un punto central. **Derecha.** Imagen vertical del disipador construido.

El material utilizado es acero inoxidable de espesor 1 mm. Cada nivel consiste en una superficie cónica. Se parte de una corona circular, cuyo ancho se define a partir del ancho del LED del cual será soporte. Luego se corta un ángulo específico, convirtiéndolo en un trapecio circular. Este ángulo de corte definirá la inclinación de la superficie cónica. Finalmente se une las partes cortadas, obteniendo la forma cónica.

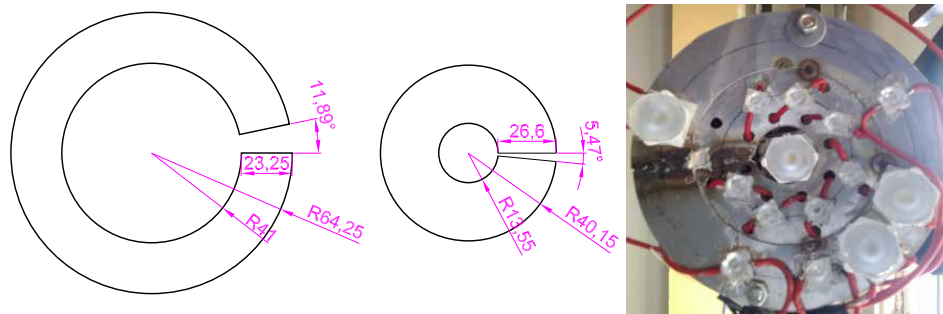


Figura 4.8. Izquierda y central. Corte realizado en lámina de acero de 1 mm de espesor para la obtención de las superficies cónicas. Derecha. LEDs montados en el disipador.

4.5. Clasificación del simulador solar construido

Se midió un área de $36,5 \times 36,5 \text{ mm}^2$ con el sistema de barrido 2D descrito en la sección 3.5 para cada LED luego de transcurridos 30 minutos de encendido. Así mismo se realizó un barrido previo con todos los LEDs apagados para posteriormente descartar la iluminación artificial del laboratorio de trabajo, que es influida únicamente por iluminación artificial de fluorescentes encendidos al menos 2 horas antes de cada medida.

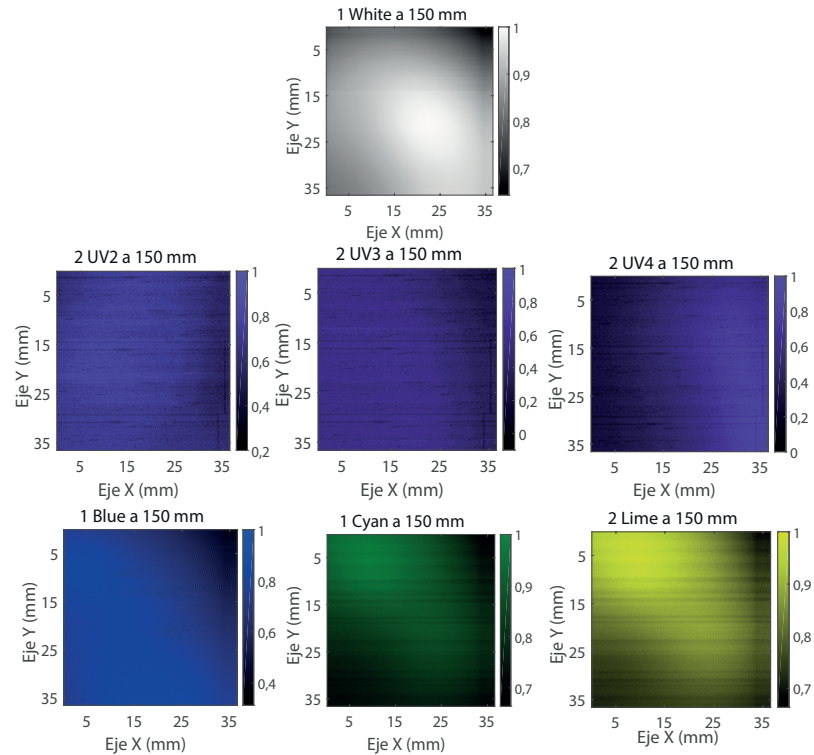


Figura 4.9. Imagen de uniformidad adquirida durante el barrido 2D por los sensores ML8511 y BPW34 de cada LED para la corriente de trabajo. Software utilizado para el manejo y gráfico de datos es MATLAB R2017b.

Por simplicidad, se especifica los valores de los estándares S_{NE} , T_{IE} para los valores de irradiancia $I_{e,max}$ y $I_{e,min}$ normalizados para cada clasificación,

Tabla 4.3. Valores de irradiancia relativos según su clasificación.

Clase	S_{NE}, T_{IE}	$I_{e,max}$	$I_{e,min}$
A	$\leq 2\%$	1	0,9608
B	$\leq 5\%$	1	0,9048
C	$\leq 10\%$	1	0,8182

Con el objetivo de clasificar el simulador solar realizado se analizó por zonas que cumplen la categoría o clase C, es decir que la irradiancia mínima normalizada es mayor a 0,82.

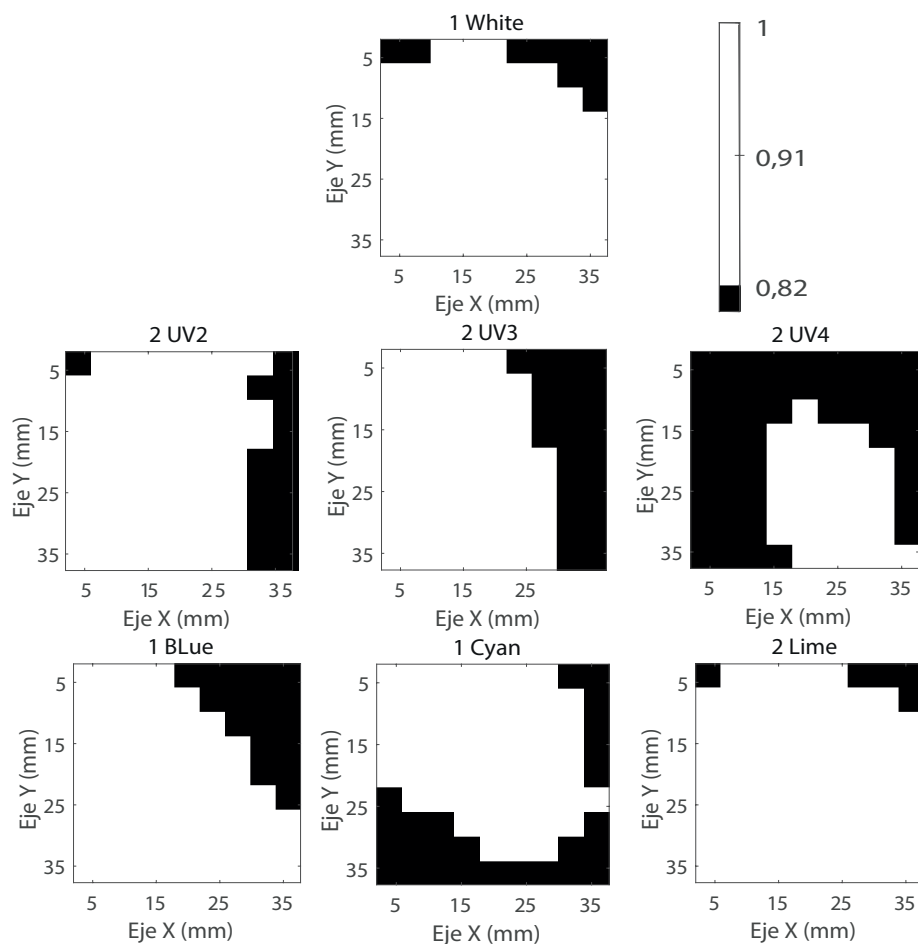


Figura 4.10. Uniformidad espacial simulada de clase C sobre un área de $36,5 \times 36,5 \text{ mm}^2$.

Para el caso de la estabilidad temporal se analizó cada LED individualmente durante una hora desde su encendido, se realizó los cálculos de estabilidad según la ecuación 2.24 para el tiempo total de 60 minutos y después de transcurridos los 30 minutos típicos del tiempo de encendido de un LED de alta potencia.

Tabla 4.4. Estabilidad temporal de cada LED en los primeros 60 minutos desde el encendido y transcurridos los primeros 30 minutos. Considerando el tiempo de encendido de 30 minutos, se observa una variación temporal menor al 3%. Se especifica las condiciones de corriente inicial (I_0) y final (I_F).

LED	I_0 (mA)	I_F (mA)	T_{IE} (%)	
			Primeros 60'	Transcurridos 30'
UV2	331,1	355	1,11	1,11
UV3	104,3	102,3	1,13	1,13
UV4	184,9	179,6	0,90	0,67
Blue	584,4	583,2	2,91	1,94
Cyan	233,3	230,0	5,02	2,80
Lime	369,5	366,6	4,17	1,17
White	497,2	495,9	12,02	1,06

En el caso de la aproximación espectral (SM) se analizó en rangos de 35 nm de ancho y se compara con cada clasificación (Tabla 3.3),

Tabla 4.5. Requerimientos de irradiancia y la irradiancia simulada en cada rango.

Longitud de onda (nm)	I_e requerida		I_e simulado	
	(mW/m ²)	%	(mW/m ²)	%
390 - 425	54,21	14,17	61,67	20,94
425 - 460	64,40	16,83	35,79	12,15
460 - 495	69,29	18,11	61,73	20,96
495 - 530	65,88	17,22	51,5	17,49
530 - 565	65,28	17,06	44,19	15,01
565 - 600	63,54	16,61	39,61	13,45

A continuación se detalla los rangos permisibles de cada clasificación de la aproximación espectral de forma numérica con los datos de la tabla 3.3. Se resalta dentro de qué clasificación entraría cada intervalo espectral.

Tabla 4.6. Clasificación de la aproximación espectral alcanzada por el simulador solar en cada rango de longitud de onda. El rango alcanzado se muestra resaltado.

Longitud de onda (nm)	Clase A (mW/m ²)	Clase B (mW/m ²)	Clase C (mW/m ²)	I _e simulado (mW/m ²)
390 - 425	40,66 - 67,76	32,53 - 75,89	21,68 - 108,42	61,67
425 - 460	48,3 - 80,5	38,64 - 90,16	25,76 - 128,8	35,79
460 - 495	51,97 - 86,61	41,57 - 97,01	27,72 - 138,58	61,73
495 - 530	49,41 - 82,35	39,53 - 92,23	26,35 - 131,76	51,5
530 - 565	48,96 - 81,6	39,17 - 91,39	26,11 - 130,56	44,19
565 - 600	47,66 - 79,43	38,12 - 88,96	25,41 - 127,08	39,61

4.6. Construcción del circuito multilector de corriente

Amplificando la caída de voltaje en el *shunt* (*R1* en la figura 4.11) mediante el amplificador operacional *AD620* se obtiene una salida amplificada (*V1*). La salida es filtrada por circuito RC conformado por *R2* y *C6*, luego de esto ya está lista para ser leída por Arduino en *X2-2* y *X2-1* que es una bornera PCB .

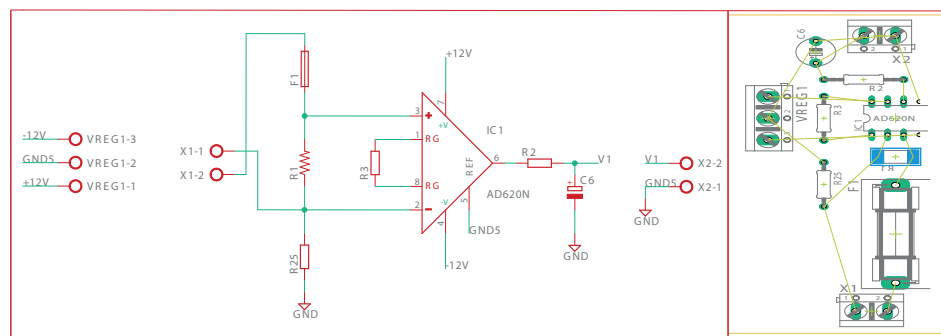


Figura 4.11. Izquierda. Esquema del circuito empleado para amplificar la caída de voltaje en una resistencia de precisión *shunt* (*R1*), mediante un amplificador operacional *AD620*. Derecha. Circuito. Diseño realizado en el programa EAGLE.

Al reemplazar el valor de $R_G = R_3 = 1k\Omega$ en la ecuación de ganancia (3.11), se obtiene una ganancia de,

$$G = 50,4. \quad (4.1)$$

Al ser necesario conocer el valor de corriente que pasa por cada LED, se replica el circuito anterior en 2 placas con capacidad para conectar hasta 8 LEDs en cada una. Teniendo un total de 16 salidas amplificadas disponibles para ser conectadas a un lector de voltaje Arduino.

4.6.1. Lector de corriente

Se diseñó un código en Arduino diseñado para un Arduino MEGA que cuenta con 16 puertos análogos (Apéndice D). De la tarjeta diseñada se lee la caída de voltaje amplificada $\times 50$ en la resistencia de precisión SHUNT. Al estar conectado en serie con un tipo de LED el valor de corriente que pasa a través de la resistencia es la misma. Se determinó el valor de corriente utilizando la ley de Ohm.

Se realizó un ajuste lineal para determinar el valor de corriente en función de la caída del voltaje en la resistencia SHUNT respectiva a la salida de cada amplificador obteniendo las siguientes ecuaciones,

Tabla 4.7. Función de corriente para cada resistencia SHUNT. EL término bits es el valor de la lectura de voltaje del Arduino, al tener un conversor ADC de 10 bits (de 0 a 1023 valores) se determina la corriente en función del número de bits para cada caso. Donde r^2 es el coeficiente de determinación o correlación al cuadrado, mide la bondad del ajuste de la recta a los datos.

$I(mA) = a \times bits + b$		
a	b	r^2
2,05	6,09	1
2,08	4,25	1
2,05	0,13	1
2,04	-0,14	0,99
2,05	1,88	1
2,08	5,06	1
2,03	2,84	1
2,05	6,51	1
2,03	5,26	0,99
2,03	4,11	0,99
1,97	1,53	0,99
2,02	2,08	0,99
2,02	1,81	0,99
2,01	0,81	0,99
2,05	1,57	1
2,02	1,81	0,99
2,02	2,65	1

Capítulo 5

Discusiones

El criterio desarrollado en esta tesis es similar al de Plyta [17] que busca aproximarse al espectro AM1.5. Con la diferencia en la cantidad de LEDs utilizados, Plyta utiliza 26 tipos de LEDs diferentes, y el rango trabajado (350 nm a 1300 nm), Plyta alcanza un simulador solar de Clase A.

La caracterización de los LEDs se realizó en la esfera integradora Labsphere -LMS-400 con un espectrorradiómetro Labsphere CDS-1100 que es sensible en el rango 250 - 800 nm. El análisis realizado por Kohraku [4] de la variación de la irradiancia en función de la corriente concluye una relación lineal, sin embargo en su trabajo varió como máximo 20 mA en un LED mientras que en esta tesis se varió un promedio de 500 mA. Por ello fue necesario realizar una mejor aproximación a una función de grado cuatro para el valor de flujo radiante espectral e irradiancia espectral.

Con el objetivo de determinar la irradiancia de cada LED en función de la corriente, se midió el flujo radiante espectral para distintos valores de corriente. De las mismas medidas también se obtienen los parámetros: ancho de intensidad media, picos y voltaje en función de la corriente. Adicionalmente se determina la irradiancia al dividir el área irradiada determinada en la sección 4.2. Con las medidas se realiza un análisis de regresión, mostrado en el apéndice, obteniendo las ecuaciones de las curvas características de cada LED con su respectiva norma residual n :

- White

Primer pico:

$$\lambda_p = 2,27 \times 10^{-5} I^2 + 1,12 \times 10^{-2} I + 448,39 \text{ nm} \quad n = 0,68 \quad (5.1)$$

$$\Delta\lambda_{0,5} = 5,08 \times 10^{-5} I^2 + 2,10 \times 10^{-2} I + 22,04 \text{ nm} \quad n = 0,61 \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \phi_{e,\lambda} = 5,72 \times 10^{-12} I^4 - 7,89 \times 10^{-9} I^3 + 3,30 \times 10^{-6} I^2 - \\ 5,10 \times 10^{-5} I + 3,21 \times 10^{-2} \text{ W} \quad n = 0,02 \quad (5.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_e = 5,59 \times 10^{-14} I^4 - 7,71 \times 10^{-11} I^3 + 3,23 \times 10^{-8} I^2 - \\ 4,98 \times 10^{-7} I + 3,14 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2 \quad n = 0,02 \quad (5.4) \end{aligned}$$

Segundo pico:

$$\lambda_p = 1,98 \times 10^{-5} I^2 - 3,62 \times 10^{-2} I + 461,26 \text{ nm} \quad n = 2,18 \quad (5.5)$$

$$\Delta\lambda_{0,5} = 3,97 \times 10^{-5} I^2 - 2,18 \times 10^{-2} I + 151,57 \text{ nm} \quad n = 0,82 \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} \phi_{e,\lambda} = 2,36 \times 10^{-11} I^4 - 2,99 \times 10^{-8} I^3 + 9,13 \times 10^{-6} I^2 + \\ 1,36 \times 10^{-3} I + 0,10 \text{ W} \quad n = 0,01 \quad (5.7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_e = 2,30 \times 10^{-13} I^4 - 2,92 \times 10^{-10} I^3 + 8,92 \times 10^{-8} I^2 + \\ 1,33 \times 10^{-5} I + 9,78 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2 \quad n = 0,01 \quad (5.8) \end{aligned}$$

- UV2

$$\lambda_p = 1,83 \times 10^{-6} I^2 + 9,40 \times 10^{-3} I + 397,3 \text{ nm} \quad n = 0,91 \quad (5.9)$$

$$\Delta\lambda_{0,5} = 3,06 \times 10^{-6} I^2 + 4,24 \times 10^{-2} I + 10,28 \text{ nm} \quad n = 0,14 \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} \phi_{e,\lambda} = 1,60 \times 10^{-12} I^4 - 2,23 \times 10^{-9} I^3 + 8,53 \times 10^{-7} I^2 + \\ 3,09 \times 10^{-4} I - 1,53 \times 10^{-3} \text{ W} \quad n = 0,001 \quad (5.11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_e = 8,32 \times 10^{-15} I^4 - 1,16 \times 10^{-11} I^3 + 4,44 \times 10^{-9} I^2 + \\ 1,61 \times 10^{-6} I - 7,94 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2 \quad n = 0,001 \quad (5.12) \end{aligned}$$

- UV3

$$\lambda_p = 1,08 \times 10^{-5} I^2 + 3,22 \times 10^{-3} I + 405,76 \text{ nm} \quad n = 0,83 \quad (5.13)$$

$$\Delta\lambda_{0,5} = -3,67 \times 10^{-12} I^2 + 8,88 \times 10^{-3} I + 10,48 \text{ nm} \quad n = 0,17 \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} \phi_{e,\lambda} = 3,10 \times 10^{-12} I^4 - 4,09 \times 10^{-9} I^3 + 1,16 \times 10^{-6} I^2 + \\ 8,23 \times 10^{-4} I - 3,42 \times 10^{-3} \text{ W} \quad n = 0,01 \quad (5.15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_e = 1,61 \times 10^{-14} I^4 - 2,13 \times 10^{-11} I^3 + 6,06 \times 10^{-9} I^2 + \\ 4,28 \times 10^{-6} I - 1,78 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2 \quad n = 0,01 \quad (5.16) \end{aligned}$$

- UV4

$$\lambda_p = 4,39 \times 10^{-6} I^2 + 5,15 \times 10^{-3} I + 414,69 \text{ nm} \quad n = 0,68 \quad (5.17)$$

$$\Delta\lambda_{0,5} = 1,03 \times 10^{-7} I^2 + 7,39 \times 10^{-3} I + 11,71 \text{ nm} \quad n = 0,10 \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} \phi_{e,\lambda} = -1,08 \times 10^{-13} I^4 + 6,38 \times 10^{-11} I^3 - 5,64 \times 10^{-7} I^2 + \\ 1,45 \times 10^{-3} I - 2,86 \times 10^{-3} \text{ W} \quad n = 0,0003 \quad (5.19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_e = -5,63 \times 10^{-16} I^4 + 3,32 \times 10^{-13} I^3 - 2,93 \times 10^{-9} I^2 + \\ 7,54 \times 10^{-6} I - 1,49 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2 \quad n = 0,0003 \quad (5.20) \end{aligned}$$

- Blue

$$\lambda_p = 1,70 \times 10^{-5} I^2 - 7,78 \times 10^{-3} I + 464,08 \text{ nm} \quad n = 0,80 \quad (5.21)$$

$$\Delta\lambda_{0,5} = -4,43 \times 10^{-6} I^2 + 1,69 \times 10^{-2} I + 17,94 \text{ nm} \quad n = 0,12 \quad (5.22)$$

$$\begin{aligned} \phi_{e,\lambda} = -1,14 \times 10^{-12} I^4 + 1,91 \times 10^{-9} I^3 - 1,61 \times 10^{-6} I^2 + \\ 1,26 \times 10^{-3} I - 9,93 \times 10^{-3} \text{ W} \quad n = 0,009 \quad (5.23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_e = -5,91 \times 10^{-15} I^4 + 9,94 \times 10^{-12} I^3 - 8,38 \times 10^{-9} I^2 + \\ 6,57 \times 10^{-6} I - 5,16 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2 \quad n = 0,009 \quad (5.24) \end{aligned}$$

- Cyan

$$\lambda_p = 1,40 \times 10^{-5} I^2 + 3,47 \times 10^{-3} I + 503,47 \text{ nm} \quad n = 2,91 \quad (5.25)$$

$$\Delta\lambda_{0,5} = -1,78 \times 10^{-5} I^2 + 4,52 \times 10^{-2} I + 24,09 \text{ nm} \quad n = 0,83 \quad (5.26)$$

$$\begin{aligned} \phi_{e,\lambda} = & -2,13 \times 10^{-11} I^4 + 3,12 \times 10^{-8} I^3 - 1,77 \times 10^{-5} I^2 + \\ & 4,94 \times 10^{-3} I \text{ W} \quad n = 0,04 \quad (5.27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_e = & -2,08 \times 10^{-13} I^4 + 3,05 \times 10^{-10} I^3 - 1,73 \times 10^{-7} I^2 + \\ & 4,82 \times 10^{-5} I \text{ W/m}^2 \quad n = 0,004 \quad (5.28) \end{aligned}$$

- Lime

$$\lambda_p = -4,37 \times 10^{-5} I^2 + 4,76 \times 10^{-2} I + 534,04 \text{ nm} \quad n = 1,21 \quad (5.29)$$

$$\Delta\lambda_{0,5} = -5,00 \times 10^{-7} I^2 - 5,12 \times 10^{-3} I + 105,52 \text{ nm} \quad n = 1,05 \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} \phi_{e,\lambda} = & 7,22 \times 10^{-11} I^4 - 7,27 \times 10^{-8} I^3 + 2,11 \times 10^{-5} I^2 + \\ & 6,26 \times 10^{-4} I + 0,13 \text{ W} \quad n = 0,006 \quad (5.31) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_e = & 7,05 \times 10^{-13} I^4 - 7,10 \times 10^{-10} I^3 + 2,06 \times 10^{-7} I^2 + \\ & 6,12 \times 10^{-6} I + 1,32 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2 \quad n = 0,006 \quad (5.32) \end{aligned}$$

Cada ecuación de cada LED es utilizada por el programa *Espectros1611*, que al ingresar el valor de corriente de cada LED puede determinar la curva espectral correspondiente a dicho LED, es decir calcula la longitud de onda pico, el ancho de media intensidad, el flujo radiante y la irradiancia para el LED a una corriente definida.

El programa *OptimizationLED1611* va probando distintos valores de corriente y minimiza la diferencia entre el espectro simulado y el espectro objetivo AM0 utilizando el programa *Espectros1611*.

El simulador solar construido se encuentra en su máximo de intensidad, resultado similar a lo desarrollado por Hui [14] que encontró un máximo de flujo luminoso para una corriente dada, que al aumentar dicho valor de corriente el flujo decrece por pérdidas en forma de calor, lo que es concordante

con la ecuación 2.10.

Bazzi desarrolló un simulador AM1.5, alcanzando la clasificación C [3] en un área de $100mm \times 50mm$ en el rango de 400 nm a 600 nm utilizando un total 59 LEDs. En esta tesis se utilizó 7 LEDs para cubrir un rango de 390 nm a 600 nm para alcanzar el AM0, que como se observa en la figura 2.2 es de mayor intensidad. Se utiliza el mismo criterio de Bazzi para la clasificación del simulador solar realizada en esta tesis. Tomando en cuenta el valor más alejado del perfil AM0, de determina la clasificación del simulador solar, de acuerdo los valores obtenidos en S_{NE} , T_{IE} y SM en 4.10, 4.4 y 4.6 respectivamente,es,

Tabla 5.1. Resultados de clasificación del simulador solar construido.

Uniformidad espacial (S_{NE})	Estabilidad temporal (T_{IE})	Aproximación espectral (SM)
C	B	C

Capítulo 6

Conclusiones y perspectivas

6.1. Conclusiones

En esta tesis se ha presentado un simulador solar basado en LEDs monocromáticos o blancos. Los resultados obtenidos demuestran que los LEDs de alto brillo con controladores de intensidad se pueden usar para construir un eficiente simulador solar. Se han revisado los estándares en la simulación de luz, específicamente la simulación solar, mostrándose como una alternativa a los simuladores convencionales. Se ha presentado un procedimiento completo para diseñar y construir un simulador solar basado en LED. El procedimiento se ha utilizado para diseñar un simulador que cubra el espectro solar AM0. Se ha desarrollado, simulado, construido y probado un prototipo que cubre el espectro UV parcial y visible. Se ha desarrollado el programa *predictorCurva* (B.3) en MATLAB capaz de reproducir el espectro esperado por el conjunto de LEDs para una determinada corriente proporcionada de cada LED. Se implementó un circuito capaz de leer el valor de corriente de cada LED en tiempo real cada 5 segundos. Los resultados experimentales y de simulación han demostrado que el simulador propuesto alcanza la uniformidad de Clase C en un área de $20 \times 20 \text{ mm}^2$. Los resultados experimentales también han demostrado que se rastrea con éxito las corrientes de LED deseadas para determinar el flujo de cada tipo de LED.

6.2. Perspectivas

Como trabajo a futuro se puede observar algunos puntos para obtener una mejor clasificación como simulador solar. Es posible agregar hasta 9 tipos de LEDs adicionales ya que el lector de corriente está habilitado para trabajar con 16 tipos de LEDs. El adicionar otros tipos de LEDs puede mejorar la aproximación espectral o ampliar el rango de cobertura que actualmente es de UVA y visible, cada LED nuevo agregado debe ser caracterizado de acuerdo al método utilizado en el presente proyecto.

Adicionalmente se puede agregar el mismo tipo de LED en serie con el objetivo de ampliar el área de irradiancia o mejorar la distribución espacial. Para aumentar el área irradiada se puede variar la altura del cabezal verticalmente. La data de corrientes adquiridas en tiempo real puede ser utilizada como fuente para un programa que muestre gráficamente el espectro total esperado trabajando en conjunto con el programa *predictor de curva* (B.3).

Referencias

- [1] M Tawfik, X Tonnellier, and C Sansom. Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90:802–813, 2018.
- [2] Vedat Esen, Şafak Sağlam, and Bülent Oral. Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77:1240–1250, 2017.
- [3] Ali M Bazzi, Zach Klein, Micah Sweeney, Kevin P Kroeger, Pradeep S Shenoy, and Philip T Krein. Solid-state solar simulator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(4):1195–1202, 2012.
- [4] Shogo Kohraku and Kosuke Kurokawa. A fundamental experiment for discrete-wavelength led solar simulator. *Solar energy materials and solar cells*, 90(18-19):3364–3370, 2006.
- [5] Katherine A Kim, Nathan Dostart, Julia Huynh, and Philip T Krein. Low-cost solar simulator design for multi-junction solar cells in space applications. In *Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, pages 1–6, 2014.
- [6] Paul A Tipler and Ralph A Llewellyn. *Modern physics*. Freeman, 2008.
- [7] Muhammad Iqbal. *An introduction to solar radiation*. Elsevier, 2012.
- [8] Daryl Ronald Myers. *Solar radiation: practical modeling for renewable energy applications*. CRC press, 2016.
- [9] Varios Autores. Solar spectra: Standard air mass zero. 2000 astm standard extraterrestrial spectrum reference e-490-00.

- [urlhttps://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra.html](https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra.html), 2000.
Accedido 10-01-2019.
- [10] Daryl R Myers, Keith Emery, and Christian Gueymard. Revising and validating spectral irradiance standards for photovoltaic performance. Technical report, National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US), 2002.
- [11] CIE The basis of physical photometry. Cie 18.2-1983publication. *CIE, Paris*, pages 3,7,15,22, 1983.
- [12] CIE Measurements of LEDs. Cie 127:2007 publication. *CIE, Paris*, pages 1–5,12,24, 2007.
- [13] Oscco Choque and Fernando Miguel Andrés. Caracterización fotométrica de lámparas led. 2016.
- [14] SY Ron Hui and YX Qin. A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (led) systems. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE*, pages 554–562. IEEE, 2009.
- [15] E Fred. *Light-emitting diodes*. Cambridge University Press, 2006.
- [16] Varios Autores. Fichas técnicas de lámparas leds luxeon. [urlhttps://www.luxeonstar.com](https://www.luxeonstar.com), 2015. Accedido 10-01-2019.
- [17] Foteini Plyta, Thomas R Betts, and Ralph Gottschalg. Towards a fully led-based solar simulator-spectral mismatch considerations. 2013.
- [18] Hamdi E Ahmed, BH Salman, A Sh Kherbeet, and MI Ahmed. Optimization of thermal design of heat sinks: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118:129–153, 2018.
- [19] Varios Autores. Fichas técnicas de espectro radiómetro labsphere cds-1100. [urlhttp://www.pro-lite.co.uk/File/LAB2012](http://www.pro-lite.co.uk/File/LAB2012). Accedido 29-01-2019.
- [20] Varios Autores. Fichas técnicas de artículos electrónicos de sparkfun. [urlhttp://http://sparkfun.com](http://http://sparkfun.com), 2019. Accedido 14-10-2019.

Apéndice A

Fotografías del equipo

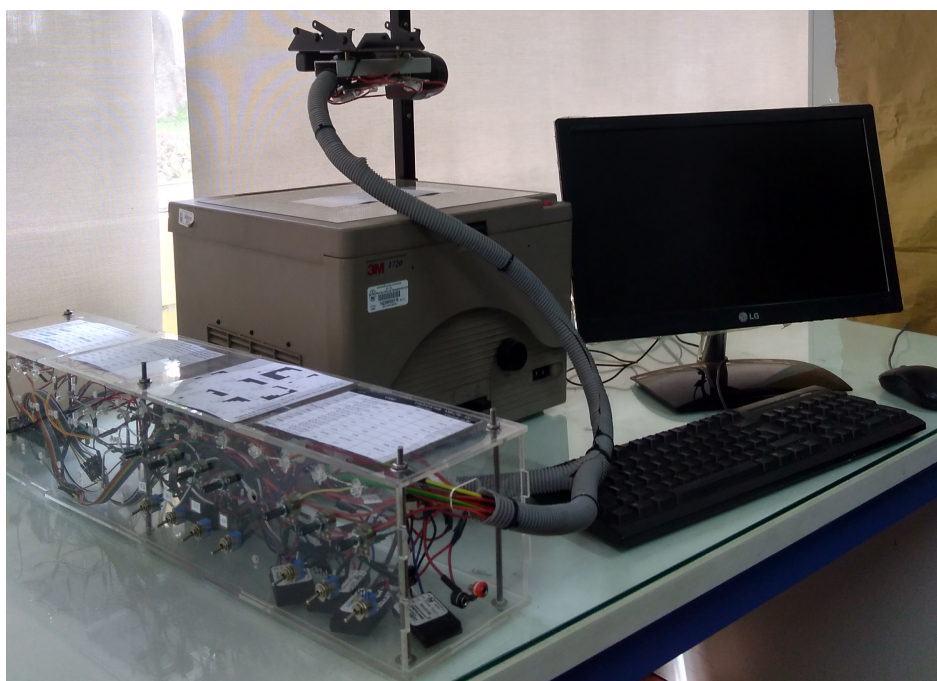


Figura A.1. Fotografía del equipo completo. Se observa la caja de acrílico como fuente de alimentación de los LEDs. El cabezal de los LEDs con el brazo de desplazamiento vertical. El monitor de la computadora donde se conecta el Arduino para la lectura de los valores de corriente de cada LED.

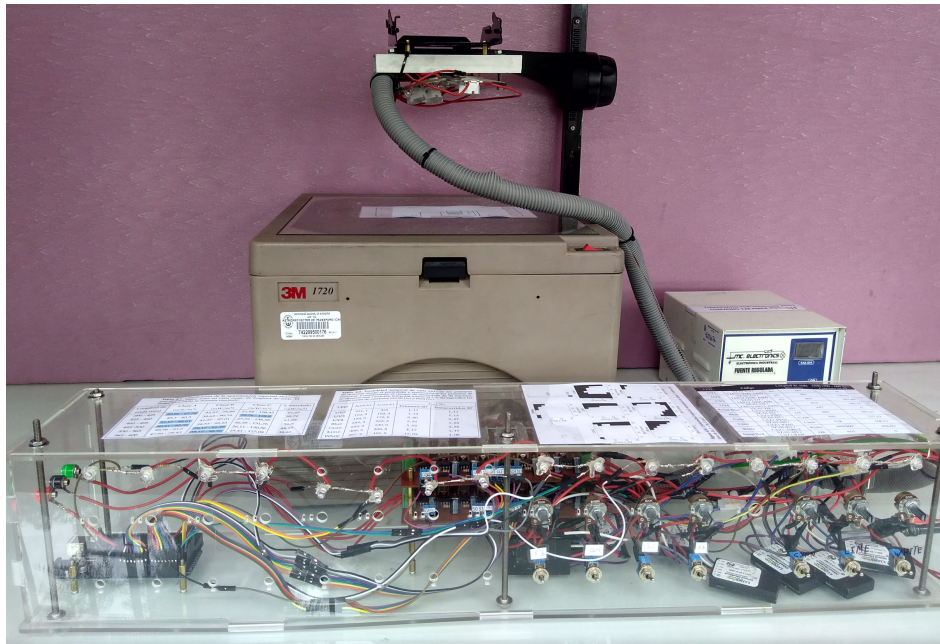


Figura A.2. Fotografía del equipo sin la computadora. Se observa el frontis de la caja de acrílico, se muestran los interruptores de cada LED. Al lado derecho se muestra una fuente DC como fuente general de la caja de acrílico, alimentando a los drivers de cada LED de alta potencia.



Figura A.3. Fotografía del equipo encendido.



Figura A.4. Fotografía del cabezal con los LEDs encendidos.

Apéndice B

Códigos MATLAB

B.1. Analisis1LED

La siguiente función se utilizó para recopilar toda la data obtenida y realizar un único gráfico. Se lee la data que fue almacenada en el documento de Excel llamado '*dataTOTAL*' en la pestaña sheet, donde sheet toma el valor de 'UV2','UV3','UV4','B2', 'DR', 'RB', 'Lime' o 'White' dependiendo del LED en cuestión.

La función además grafica las curvas de corriente versus longitud de onda pico, corriente versus ancho de banda espectral a niveles de media intensidad (FWHM) y corriente versus flujo radiante espectral

```
1 function [FWHM,picos , flujo ,V]= Analisis1LED( sheet)
2
3 Id2=Idata( sheet );
4 Id=Id2( : ,1 );
5 V=Id2( : ,2 );
6
7 [NUM,~,~]=xlsread( 'dataTOTAL' , sheet );
8 x=NUM( : ,1 );
9 l=length( NUM( 1 ,: ) );
10 %subplot( 1 ,3 ,1 ) ,
11 hold on;
12 for i=2:l
13     %plot( x ,NUM( : , i ) , '-' );
14     y=NUM( : , i );
15     flujo( i - 1 ,1)=trapz( x , y );
```

```
16 [top indice]=max(y);
17 picos(i-1,1)=349+indice;
18 FWHM(i-1,1)=fwhm(y,x);
19 end
20
21 % xlabel('Longitud de Onda (nm)');
22 % ylabel('Flujo radiante espectral (W/nm)');
23 % title('Espectro de Radiacion');
24 % dotsTOcomma();
25
26 a=subplot(2,2,1);plot(Id,picos,'*r');
27
28 p1=fit(Id,picos,'poly2'),
29 hold(a,'on');
30 plot(p1,'-b');
31 xlabel('Corriente (mA)');
32 ylabel('Longitud de Onda (nm)');
33 title('Picos');
34 legend('Data','Ajuste 2^{do} grado','Location','best');
35 dotsTOcomma();
36
37 b=subplot(2,2,2), plot (Id,FWHM,'*r');
38
39 p2=fit(Id,FWHM,'poly2'),
40 hold(b,'on');
41 plot(p2,'-b');
42 xlabel('Corriente (mA)');
43 ylabel('\Delta \lambda_{0,5} (nm)');
44 title('FWHM');
45 legend('Data','Ajuste 2^{do} grado','Location','best');
46 dotsTOcomma();
47
48 c=subplot(2,2,3), plot (Id,flujo,'*r');
49
50 p3=fit(Id,flujo,'poly4'),
51 hold(c,'on');
52 plot(p3,'-b');
```

```

53 xlabel('Corriente(mA)');
54 ylabel('Flujo radiante espectral(W)');
55 title('Flujo radiante');
56 legend('Data','Ajuste 4^{to} grado','Location','best');
57 dotsTOcomma();
58
59 d=subplot(2,2,4), plot(Id,V,'*r');
60
61 p4=fit(Id,V,'poly1'),
62 hold(d,'on');
63 plot(p4,'-b');
64 xlabel('Corriente(mA)');
65 ylabel('Voltaje (V)');
66 title('Voltaje');
67 legend('Data','Ajuste 1^{er} grado','Location','best');
68 dotsTOcomma();

```

MATLAB/Análisis1LED.m

donde la función *dotsTOcomma* se utiliza para cambiar la notación decimal de punto a coma,

```

1 function dotsTOcomma()
2
3 yl = get(gca,'YTickLabel');
4 new_yl = strrep(yl(:),'.','');
5 set(gca,'YTickLabel',new_yl);

```

MATLAB/dotsTOcomma.m

B.2. OptimizationLED1611

```

1 function [x,y,P]=OptimizationLED1611()
2
3 text=['Inicio ',datestr(now)];
4 disp(text);
5 format long
6

```

```
7 % Interpolando con y = interp1(x,num,xq);
8 [NUM,~,~]=xlsread('Rad_Sol_AM0_VIS','AM0_interpoladoW');
9
10 x=NUM(:,1);
11 y=NUM(:,2);
12 [%~,Irad,A]=Espectros1611(I);
13 Au=[]; Bu=[]; Aeq=[]; Beq=[];
14 % Probado el 03/11/2019 a las 20:05 (hasta 600nm)
15
16 P0=[330.9105449;103.396206;182.5484598;0;583.5176631;233.3257571;...
17     369.7663749;0;496.0263437];
18
19 %lb=[116.2;29.8;75.2;9.6;50;115;79.2;109.4;104];
20 %ub=[571;579.6;550.6;557;712;515.2;444.2;669.2;516];
21
22 % Modificacion de condicion sin Royal Blue
23 lb=[116.2;29.8;75.2;0;50;115;79.2;0;104];
24 ub=[571;579.6;550.6;0;712;515.2;444.2;0;516];
25
26 P(:,1)=[400,405,415,447,...
27     465,505,538,657,3500];
28 %P(:,2) = fminsearch(@funobj1611,P0);
29 P(:,2)=fmincon(@funobj1611,P0,Au,Bu,Aeq,Beq,lb,ub);
30 xlswrite('Factores161119.xlsx',P,'Corrientes');
31
32 [y,Irad,Iradtotal,A]=Espectros1611(P(:,2));
33
34 xlswrite('Factores161119.xlsx',y,'RadEspectral');
35 xlswrite('Factores161119.xlsx',Irad,'Irradiancias');
36 xlswrite('Factores161119.xlsx',Iradtotal,'IradTotal');
37 xlswrite('Factores161119.xlsx',A,'Areas');
38
39 % Irad=I*P(:,2);
40 r=y-Iradtotal;
41 resto=0;
42 for i=1:length(r)
43     resto=resto+abs(r(i));
```

```

44 end
45
46 text=[ 'Final ', datestr(now) ];
47 disp(text);

```

MATLAB/OptimizationLED1611.m

```

1 function resto=funobj1611(I)
2
3 [NUM,~,~]=xlsread('Rad_Sol_AM0_VIS','AM0_interpoladoW');
4 y=NUM(:,2)*1000; % Pasa a mW
5 [~,I,~]=Espectros();
6 fprintf(num2str(I));
7 fprintf(' ');
8 [~,~,espectro_test,~]=Espectros1611(I);
9 r=y-espectro_test;
10 %m=mean(r);
11 resto=0;
12 for i=1:length(r)
13     resto=resto+abs(r(i));
14 end
15
16 fprintf('r =');
17 disp(resto);

```

MATLAB/funobj1611.m

```

1 function [y,Irad,Iradtotal,A]=Espectros1611(I)
2
3 %%Radiación Solar AM0. Lectura de datos en Excel
4 [NUM,~,~]=xlsread('Rad_Sol_AM0');
5 x=NUM(:,1);
6 AM0=NUM(:,2);
7 h=0.15; % Altura del simulador 15 cm;
8 i=1;
9 ef1=0.8829;
10 ef2=0.9627;
11 format short g
12 alpha10=16.1; % sexagesimales

```

```
13 alpha20=20.75;    % sexagesimales
14
15 % %385nm LUXEON Z Ultraviolet on a Saber Z1 10mm Square Base –
16 % 225 mW @ 500mA
17 % % Carclo 39.2    Frosted 10 mm Circular Beam Optic – Integrated Legs
18 % %DATA
19 % lambda_pico=385.18;
20 % sigma=4.8;
21 % alpha=19.6;    % sexagesimales
22 % Pt=225*0.78;    % Potencia total en mW
23 %
24 % %Calculo
25 % y_385=ledGauss(x,sigma,lambda_pico,type);
26 % [y_385,I_385,A_385]=Irradiance(x,y_385,alpha,h,Pt);
27 % A(1:2,i)=[385;A_385];i=i+1;
28 % %400nm LUXEON Z Ultraviolet on a Saber Z1 10mm Square Base –
29 % 475 mW @ 500mA
30 % Carclo 39.2    Frosted 10 mm Circular Beam Optic – Integrated Legs
31 % DATA
32
33 %Calculo
34 y_400=predictorCurva('UV2',I(1),ef1);
35 [Irad_400,A_400]=Irradiance1611(alpha10,h,y_400);
36 A(1:2,i)=[400;A_400];i=i+1;
37 % %405nm LUXEON Z Ultraviolet on a Saber Z1 10mm Square Base –
38 % 625 mW @ 500mA
39 % Carclo 39.2    Frosted 10 mm Circular Beam Optic – Integrated Legs
40 % DATA
41
42 %Calculo
43 y_405=predictorCurva('UV3',I(2),ef1);
44 [Irad_405,A_405]=Irradiance1611(alpha10,h,y_405);
45 A(1:2,i)=[405;A_405];i=i+1;
46 % %415nm LUXEON Z Ultraviolet on a Saber Z1 10mm Square Base –
47 % 625 mW @ 500mA
48 % Carclo 39.2    Frosted 10 mm Circular Beam Optic – Integrated Legs
49 % DATA
```

```
50
51 %Calculo
52 y_415=predictorCurva('UV4',I(3),ef1);
53 [Irad_415,A_415]=Irradiance1611(alpha10,h,y_415);
54 A(1:2,i)=[415;A_415];i=i+1;
55 %%Royal-Blue LUXEON Z on a Saber Z1 10mm Square Base -
56 % 575 mW @ 500mA
57 % Carclo 39.2 Frosted 10 mm Circular Beam Optic - Integrated Legs
58 %DATA
59
60 %Calculo
61 y_447=predictorCurva('RB',I(4),ef1);
62 [Irad_447,A_447]=Irradiance1611(alpha10,h,y_447);
63 A(1:2,i)=[447;A_447];i=i+1;
64 %%Blue LUXEON Z on a Saber Z1 10mm Square Base - 36 lm @ 500mA
65 % Carclo 39.2 Frosted 10 mm Circular Beam Optic - Integrated Legs
66 %DATA
67
68 %Calculo
69 y_465=predictorCurva('B2',I(5),ef1);
70 [Irad_465,A_465]=Irradiance1611(alpha10,h,y_465);
71 A(1:2,i)=[465;A_465];i=i+1;
72 %%4 Series Connected LUXEON Z Cyan LEDs on a Saber Z5 20mm Base -
73 % 240 lm @ 500mA
74 % Carclo 35 Frosted 20 mm Circular Beam Optic - No Holder
75 %DATA
76
77 %Calculo
78 y_505=predictorCurva('Cyan',I(6),ef2);
79 [Irad_505,A_505]=Irradiance1611(alpha20,h,y_505);
80 A(1:2,i)=[505;A_505];i=i+1;
81 %%4 Series Connected LUXEON Z Lime LEDs on a Saber Z5 20mm Base -
82 % 676 lm @ 500mA
83 % Carclo 35 Frosted 20 mm Circular Beam Optic - No Holder
84 %DATA
85
86 %Calculo
```



```

87 y_538=predictorCurva('Lime',I(7),ef2);
88 [Irad_538,A_538]=Irradiance1611(alpha20,h,y_538);
89 A(1:2,i)=[538;A_538];i=i+1;
90 %%Deep Red LUXEON Z on a Saber Z1 10mm Square Base – 325 mW @ 500mA
91 % Carclo 39.2 Frosted 10 mm Circular Beam Optic – Integrated Legs
92 %DATA
93
94 %Calculo
95 y_657=predictorCurva('DR',I(8),ef1);
96 [Irad_657,A_657]=Irradiance1611(alpha10,h,y_657);
97 A(1:2,i)=[657;A_657];i=i+1;
98 %%4 Series Connected LUXEON Z 3500K White LEDs on a Saber Z5 20mm
99 % Base – 496 lm @ 500mA
100 % Carclo 35 Frosted 20 mm Circular Beam Optic – No Holder
101
102 %DATA
103
104 %Calculo
105 %disp('White');
106 y_3500K1=predictorCurva('White1',I(9),ef2);
107 y_3500K2=predictorCurva('White2',I(9),ef2);
108 y_3500K=vertcat(y_3500K1,y_3500K2);
109 [Irad_3500K,A_3500K]=Irradiance1611(alpha20,h,y_3500K);
110 A(1:2,i)=[3500;A_3500K];i=i+1;
111 %%Curva AMO
112 Irad=[Irad_400,Irad_405,Irad_415,Irad_447,...
113      Irad_465,Irad_505,Irad_538,Irad_657,Irad_3500K]*1000;
114
115 Iradttotal0=Irad_400+Irad_405+Irad_415+Irad_447+...
116      Irad_465+Irad_505+Irad_538+Irad_657+Irad_3500K;
117
118 y0=[y_400,y_405,y_415,y_447,...
119     y_465,y_505,y_538,y_657,y_3500K];
120
121
122 % Se trunca datos de 200 a 600 nm
123 %Iradtotal = Iradttotal0(1:401);

```

```
124
125 % Se trunca datos de 390 a 600 nm
126 Iradtotal = Iradtotal0(191:401); %mW/m^2
127 y = y0(191:401); %mW/m^2
128
129 plot(x,AM0, '-r ');
130 hold on
131 plot(x,Iradtotal0, '-b');
```

MATLAB/Espectros1611.m

B.3. Espectros1611

```
1 function [y]=predictorCurva(sheet,I)
2
3 [NUM,~,~]=xlsread('dataTOTAL',sheet);
4 x=NUM(:,1);
5 xlength=length(x);
6
7 Id2=Idata(sheet);
8 Id=Id2(:,1);
9
10 busq=length(Id);
11 encontrado=0;
12 %%Busqueda curva de referencia
13 for m=1:busq
14     if (abs(Id(m)-I)<1)
15         encontrado=1;
16         y=NUM(:,m+1);
17         Iref=Id(m);
18         flujoOBJ=trapz(x,y);
19         [fwhmOBJ,extremes]=fwhm(y,x);
20         hw2=fwhmOBJ;
21         break;
22     end
23     if (Id(m)>I && ~encontrado && m>1)
24         if ((Id(m)-I)<(I-Id(m-1)))
```

```
25         yref=NUM(:,m+1);
26         Iref=Id(m);
27     else
28         yref=NUM(:,m);
29         Iref=Id(m-1);
30     end
31     break;
32 end
33 end
34
35 if(~encontrado)
36     % Calculo de parametros
37     flujoOBJ=CalcFlujo(I,sheet);
38     fwhmOBJ=CalcFWHM(I,sheet);
39     pico=CalcPico(I,sheet);
40
41     [~,indice]=max(yref);
42     picoref=349+indice;
43     desp=pico-picoref;
44     for j=1:length
45         x(j)=x(j)+desp;
46     end
47
48     Fref=trapz(x,yref);
49     F=flujoOBJ/Fref;
50     y=yref*F;
51     [hw,extremes]=fwhm(y,x);
52
53     % plot(x,yref,'-r');
54     % hold on;
55     hw2=hw;
56 end
57
58     It=0;
59
60 % Deforma la curva de referencia hasta obtener la curva que cumpla
61 % con los parametros calculados
```

```

62 while (abs (fwhmOBJ-hw2) >0.00005 && It <75000 && ~encontrado)
63     switch sheet
64         case 'White1'
65             fprintf(' ');break;
66         otherwise
67             It=It+1;
68         for i=x(1):x(xlength)
69             if (extremes(1)<i && i <extremes(2))
70                 k=find (x==i);
71                 if (fwhmOBJ-hw2>0)
72                     y(k)=y(k)*0.99999;
73                 else
74                     y(k)=y(k)*1.00001;
75                 end
76             end
77         end
78
79 flujo=trapz(x,y);
80 F2=flujoOBJ/flujo;
81 y=y*F2;
82 [hw2,extremes]=fwhm(y,x);
83 plot(x,y, ':');
84     end
85 end
86
87 hw=hw2;
88 disp(sheet);
89 text=['Se realizaron ',num2str(It),' iteraciones.'];
90 disp(text);
91 disp(pico);
92
93 plot(x,y, '-k');

```

MATLAB/predictorCurva.m

```

1 function [Irad ,A]=Irradiance1611(alpha ,h,y)
2
3 % alpha: angulo medio ( sexagesimal)

```

```
4 %h: altura del simulador(m)
5 A=pi*(h*tan(alpha*pi/180))^2;      % Area irradiada en m^2
6 Irad=y/A;                          % Irradiancia espectral en w/(nm*m^2)
7                                     %en el centro del area irradiada
```

MATLAB/Irradiance1611.m

Apéndice C

Espectros de radiación de cada LED

Espectros de radiación de cada LED para distintos valores de corriente suministrado. Desde la figura C.1 hasta C.7.

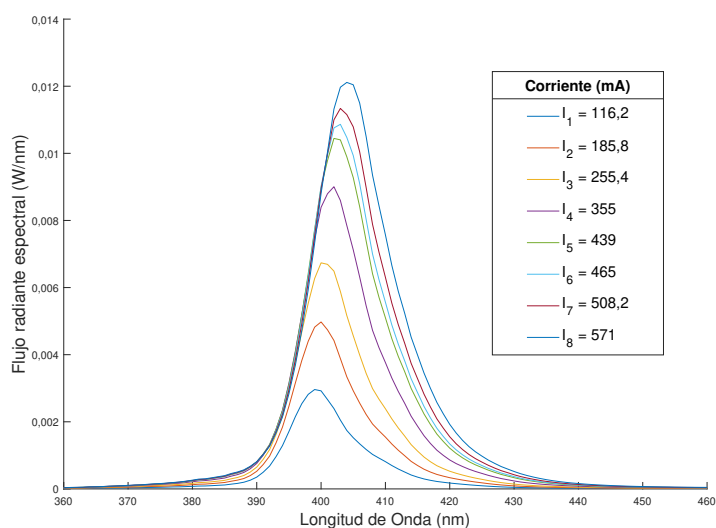


Figura C.1. Espectro de radiación de un LED UV de 400 nm en Zaber Z1 de 475 mW [16].

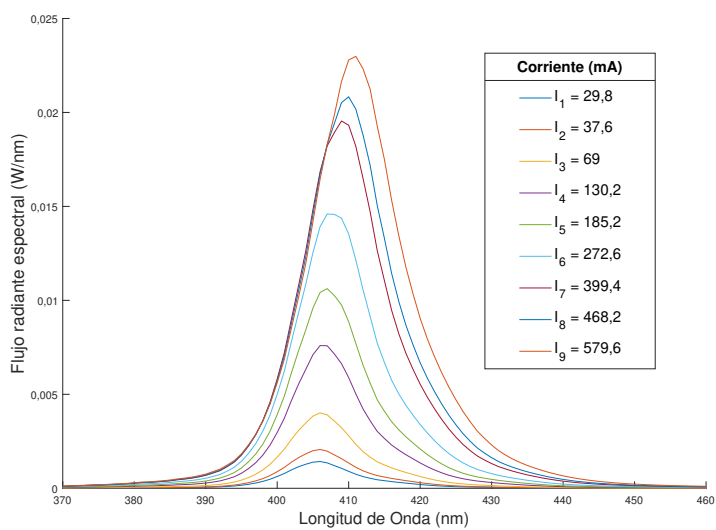


Figura C.2. Espectro de radiación de un LED UV de 405 nm en Zaber Z1 de 625 mW [16].

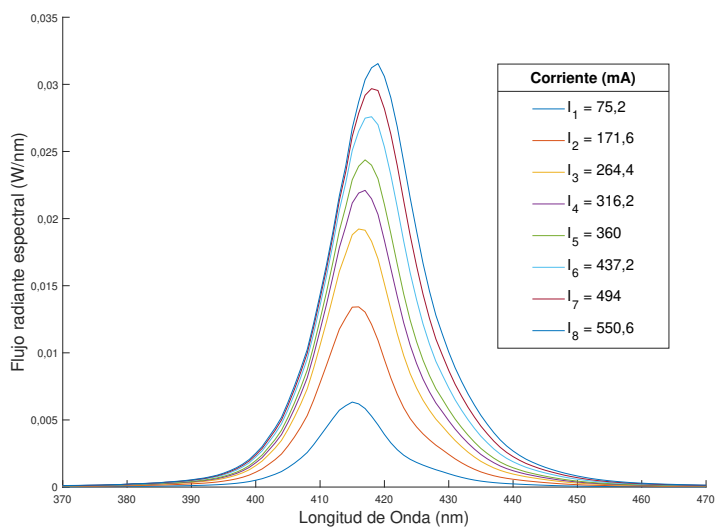


Figura C.3. Espectro de radiación de un LED UV de 415 nm en Zaber Z1 de 625 mW [16].

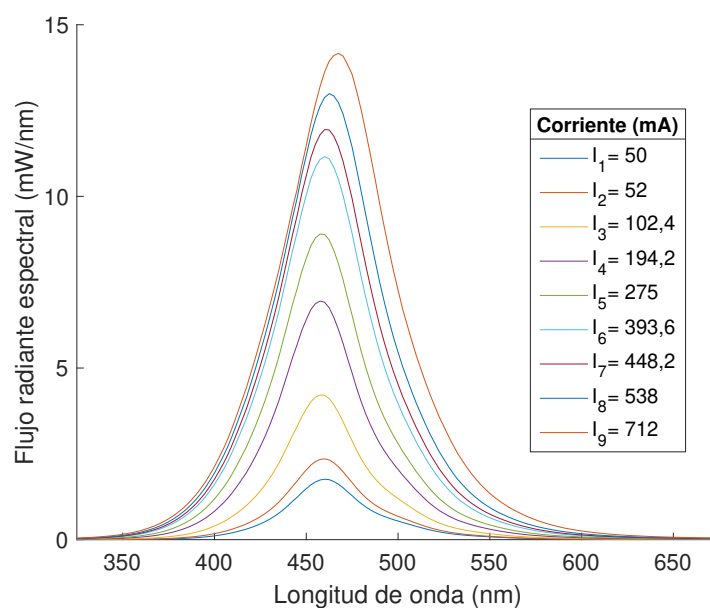


Figura C.4. Espectro de radiación de un LED Blue Luxeon en Zaber Z1 de 36 lm [16].

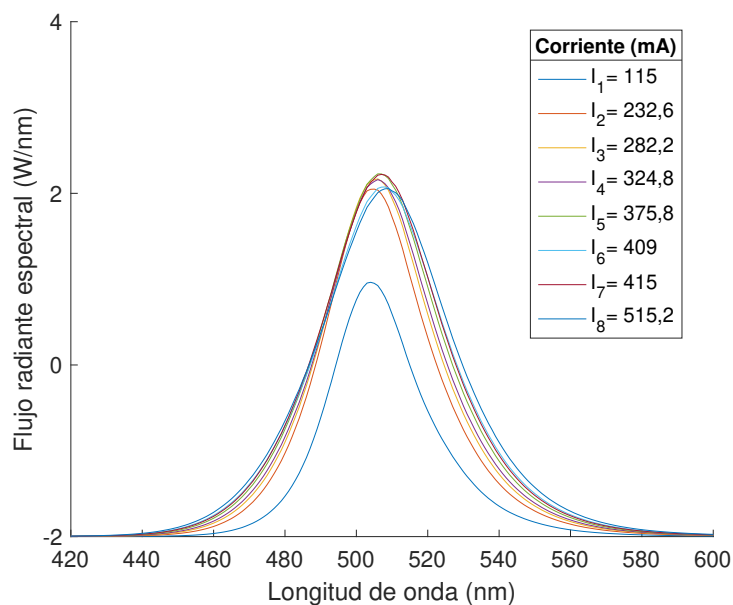


Figura C.5. Espectro de radiación de un LED Cyan Luxeon en Zaber Z5 de 240 lm [16].

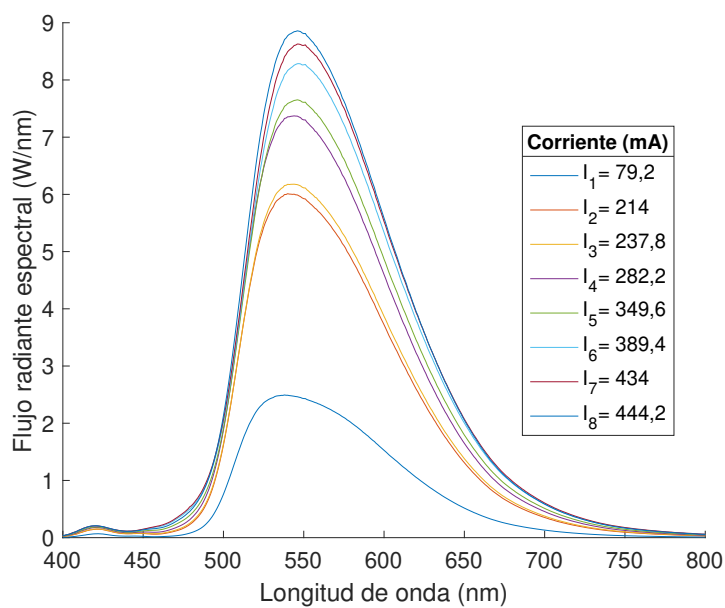


Figura C.6. Espectro de radiación de un LED Lime Luxeon en Zaber Z5 de 676 lm [16].

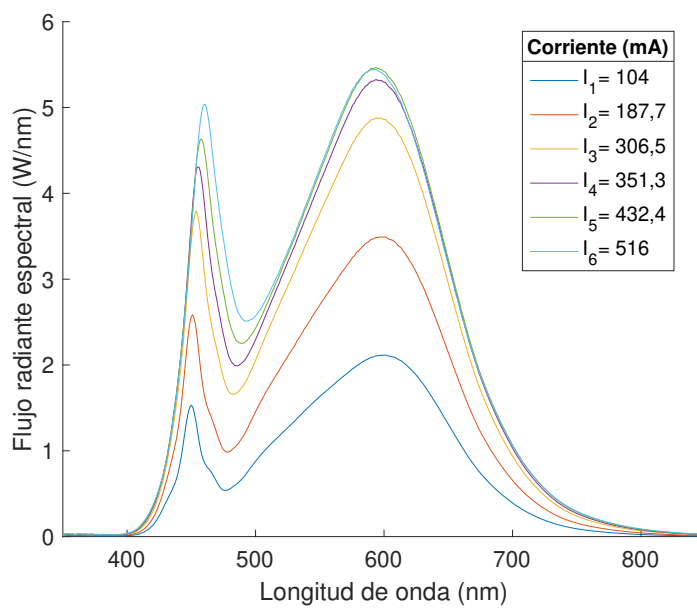


Figura C.7. Espectro de radiación de un LED White Luxeon 3500K en Zaber Z5 de 496 lm [16].

C.1. Análisis de espectros de cada LED

Con la data obtenida en de los multiples espectros de cada LED. Realizando un análisis de regresión (3.3) para los desplazamientos de picos, el ancho de media intensidad, el flujo radiante y voltaje. Se obtiene las figuras de C.8 hasta C.15. El programa utilizado se detalla en la sección B.1.

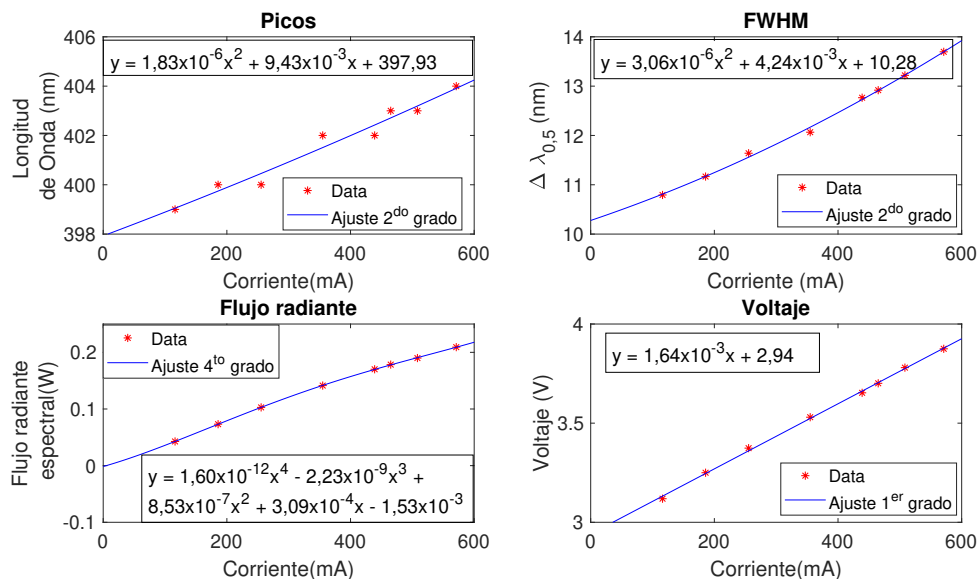


Figura C.8. Análisis de la data obtenida en la figura C.1 para el LED UV de 400 nm. Ajustes de curvas y gráficos realizados en MATLAB.

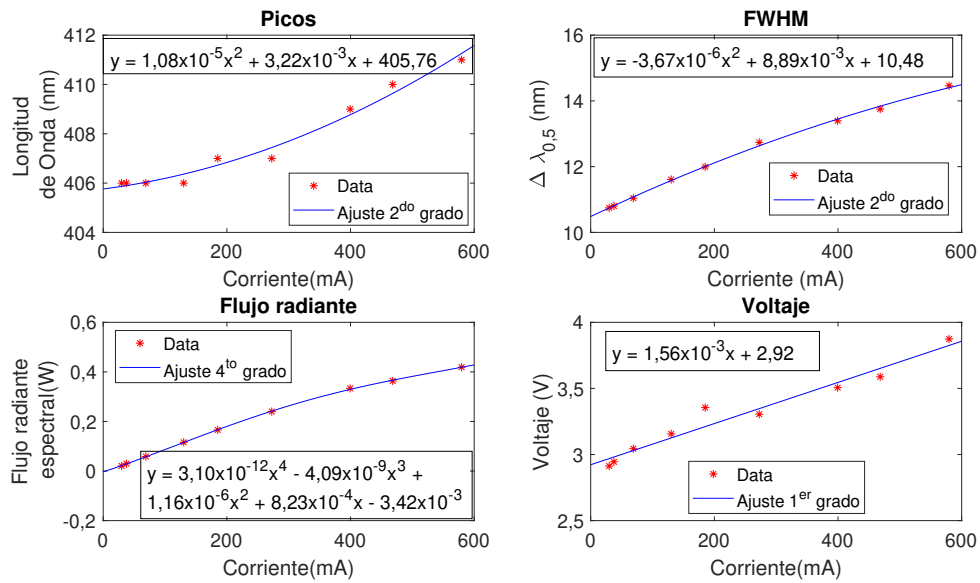


Figura C.9. Análisis de la data obtenida en la figura C.2 para el LED UV de 405 nm. Ajustes de curvas y gráficos realizados en MATLAB.

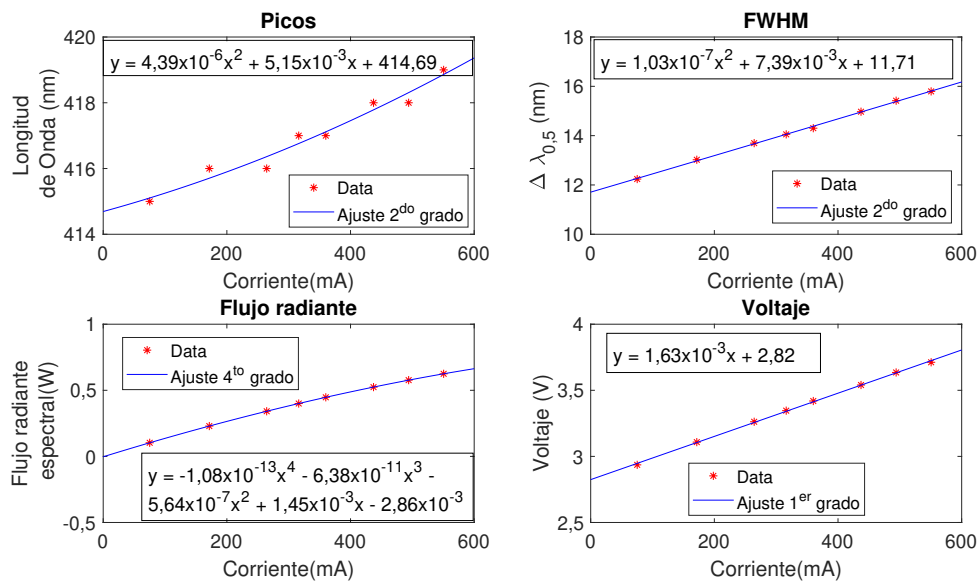


Figura C.10. Análisis de la data obtenida en la figura C.3 para el LED UV de 415 nm. Ajustes de curvas y gráficos realizados en MATLAB.

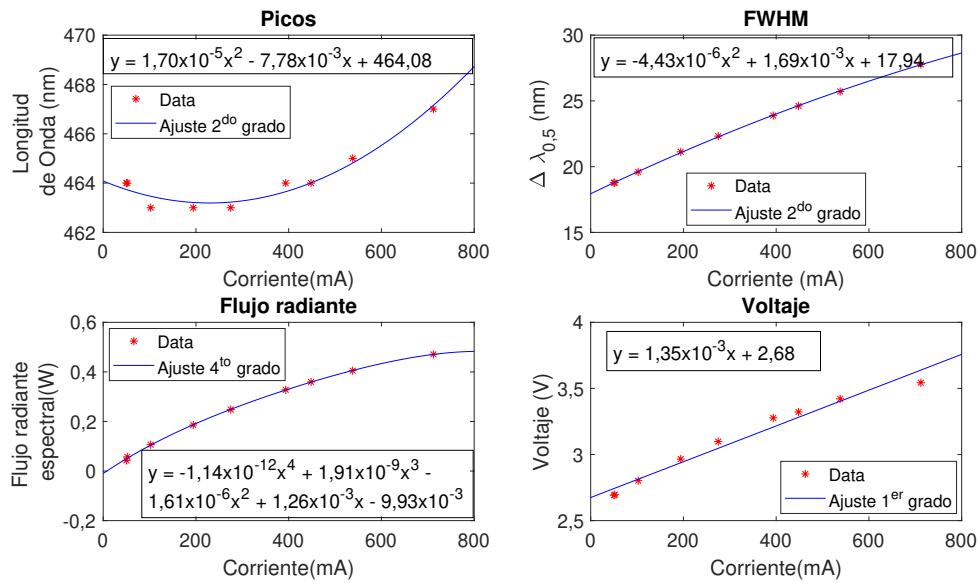


Figura C.11. Análisis de la data obtenida en la figura C.4 para el LED Blue. Ajustes de curvas y gráficos realizados en MATLAB.

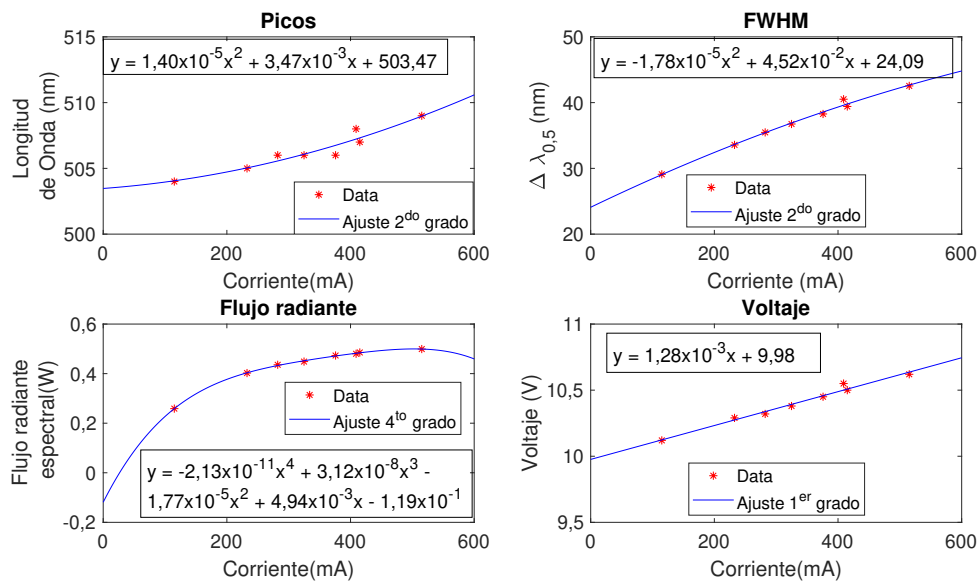


Figura C.12. Análisis de la data obtenida en la figura C.5 para el LED Cyan. Ajustes de curvas y gráficos realizados en MATLAB.

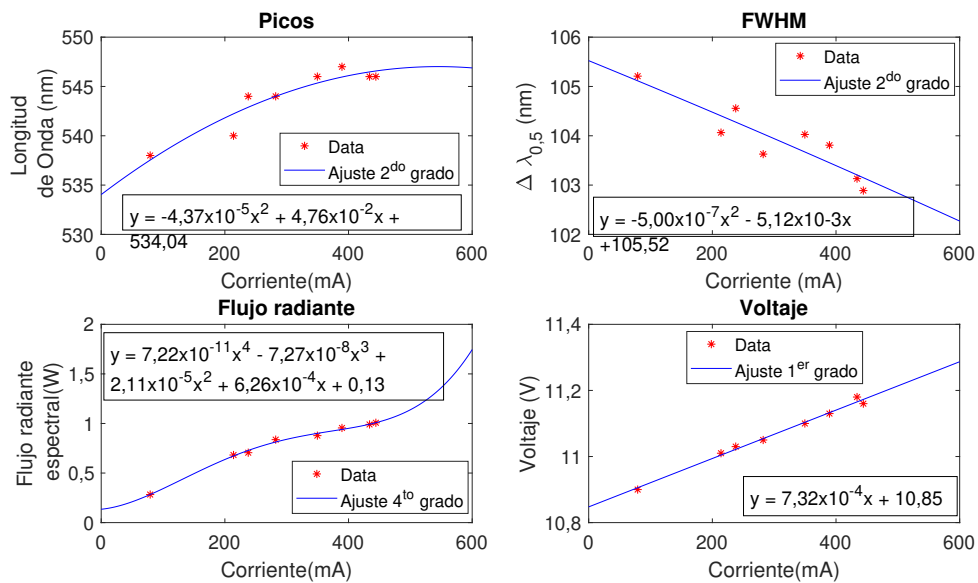


Figura C.13. Análisis de la data obtenida en la figura C.6 para el LED Lime. Ajustes de curvas y gráficos realizados en MATLAB.

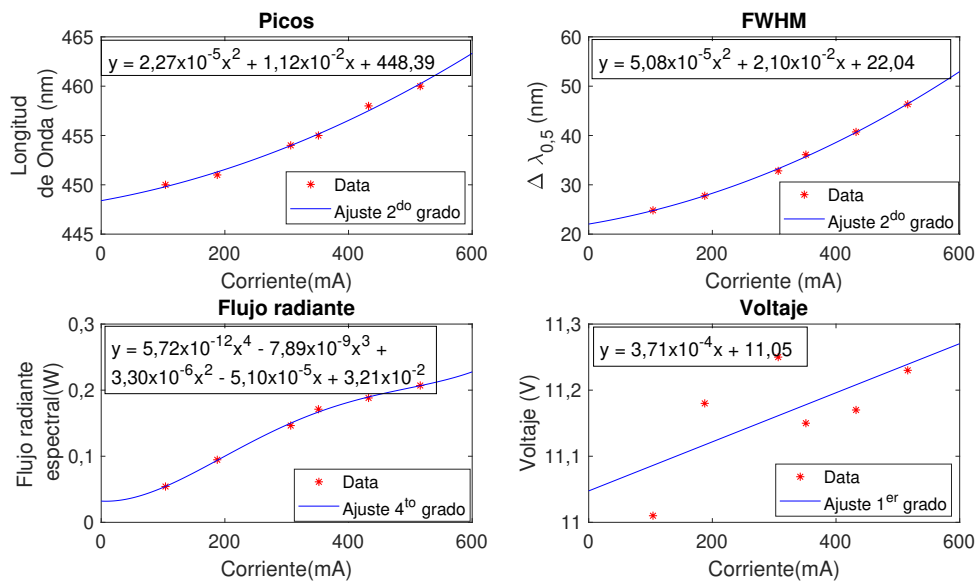


Figura C.14. Análisis de la data obtenida en la figura C.7 para el primer pico del LED White. Ajustes de curvas y gráficos realizados en MATLAB.

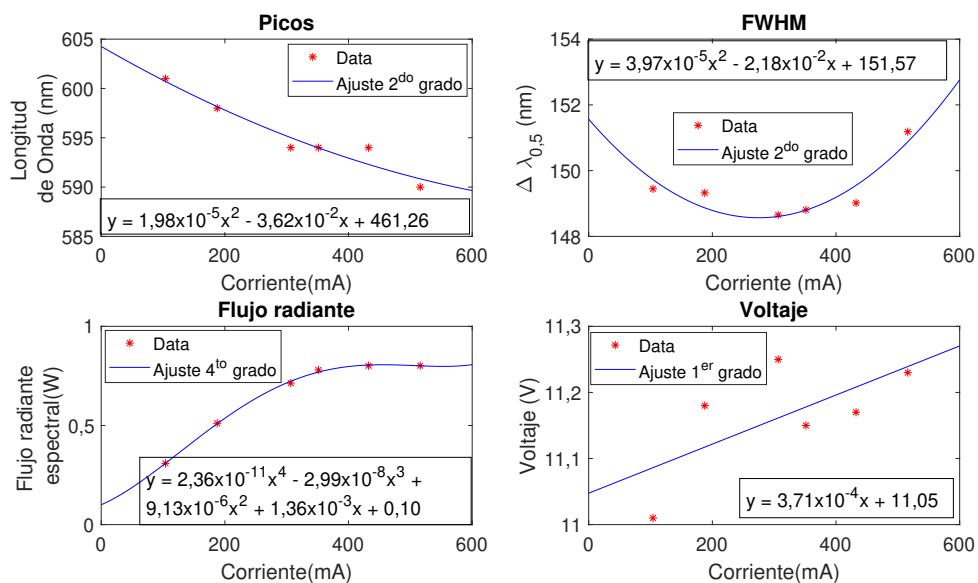


Figura C.15. Análisis de la data obtenida en la figura C.7 para el segundo pico del LED White. Ajustes de curvas y gráficos realizados en MATLAB.

Apéndice D

Código lector de corrientes

```
/*
Codigo en Arduino diseñado para un Arduino MEGA que
cuenta con 16 puertos analogos.
De la tarjeta diseñada se lee la caída de voltaje
amplificada x50 en la resistencia de precisión SHUNT.
Al estar conectado en serie con un tipo de LED, se
determino el valor de corriente. Utilizando la ley de Ohm
de determino el valor de corriente que pasa por el mismo.
*/
float bits1=0;
int prom=10;
// the setup routine runs once when you press reset:

float I[16];
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  analogReference(INTERNAL1V1);
  analogWrite(9,200);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
```

```
// read the input on analog pin 0:
for(int i=0;i<16;i++){
    for(int j = 0; j < prom; j++){
        bits1=bits1+analogRead(i);
        delay(25);
    }
    I[i]=corriente(bits1/prom,i);
    bits1=0;
    delay(50); // delay in between reads for stability
    Serial.print(I[i]);
    Serial.print("\t");
}
Serial.println();
}

float corriente(float bits0,int caso){
    float a,b;
    switch (caso) {
    case 0:
        a=2.046359315;b=6.093648352;
        break;
    case 1:
        a=2.076876452;b=8.351736711;
        break;
    case 2:
        a=2.042860261;b=4.258093361;
        break;
    case 3:
        a=2.044127164;b=3.043704539;
        break;
    case 4:
```



```
a=2.05104583;b=3.151870645;
    break;
case 5:
a=2.088028311;b=7.386158326;
    break;
case 6:
a=2.031707756;b=6.758410681;
    break;
case 7:
a=0;b=0;
    break;
case 8:
a=2.040593726;b=6.176964269;
    break;
case 9:
a=2.047916465;b=5.831105764;
    break;
case 10:
a=1.982154497;b=3.015298652;
    break;
case 11:
a=2.038267805;b=3.471656449;
    break;
case 12:
a=2.036267629;b=3.145662139;
    break;
case 13:
a=2.049683118;b=2.996585888;
    break;
case 14:
a=2.051369064;b=3.371575416;
```

```
        break;
    case 15:
        a=2.000892134;b=2.800260224;
        break;
    default:
        a=0;b=0;
        Serial.println("No existe este caso.");
        break;
}
return a*bits0+b;
}
```

Apéndice E

Ficha técnica

E.1. LEDs del espectro visible

La línea de color LUXEON Z que permiten una densidad lumínica, flexibilidad y libertad de diseño. Disponible en el espectro de colores desde 440 nm hasta 670 nm.

Performance Characteristics

Product Selection Guide

Table 1a. Product performance of LUXEON Z Color Line at 500mA, T_j=25°C.

COLOR	DOMINANT ^[1] or PEAK WAVELENGTH ^[2] (nm)		LUMINOUS FLUX ^[1] (lm) or RADIOMETRIC POWER ^[3] (mW)		PART NUMBER
	MINIMUM	MAXIMUM	MINIMUM	TYPICAL	
Deep Red	650	670	250	350	LXZ1-PA01
Red	620	645	40	52	LXZ1-PD01
Red-Orange	610	620	56	65	LXZ1-PH01
Amber	585	590	48	56	LXZ1-PL01
Green	520	540	80	118	LXZ1-PM01
Cyan	490	510	48	82	LXZ1-PE01
Blue	460	480	24	38	LXZ1-PB01
Royal Blue	440	460	500	575	LXZ1-PR01

Table 1b. Product performance of LUXEON Z Color Line at 500mA, T_j=85°C.

COLOR	DOMINANT WAVELENGTH ^[1] (nm)		LUMINOUS FLUX ^[1] (lm)		PART NUMBER
	MINIMUM	MAXIMUM	MINIMUM	TYPICAL	
Red	624	634	24	43	LXZ1-PD02
Red-Orange	614	624	40	47	LXZ1-PH02
Amber	594	604	16	24	LXZ1-PL03
PC Amber	588	592	72	107	LXZ1-PL02
Lime	566	569	144	175	LXZ1-PX01

Notes for Tables 1a and 1b:

1. Lumileds maintains a tolerance of ±0.5nm for dominant wavelength and ±6.5% on luminous flux measurements.
2. Deep Red and Royal Blue are binned by peak wavelength. All other colors are binned by dominant wavelength.
3. Deep Red and Royal Blue are binned by radiometric power. All other colors are binned by luminous flux.

Optical Characteristics

Table 2. Optical characteristics for LUXEON Z Color Line at 500mA and specified junction temperature.

COLOR	PART NUMBER	TYPICAL SPECTRAL HALF-WIDTH ^[1] (nm)	TYPICAL TEMPERATURE COEFFICIENT OF DOMINANT OR PEAK WAVELENGTH (nm/°C)	TYPICAL TOTAL INCLUDED ANGLE ^[2]	TYPICAL VIEWING ANGLE ^[3]
Deep Red	LXZ1-PA01 ^[4]	20	0.06	150°	145°
Red	LXZ1-PD01 ^[4]	20	0.06	150°	145°
	LXZ1-PD02 ^[4, 6]	20	0.06	150°	145°
Red-Orange	LXZ1-PH01 ^[4]	20	0.06	150°	145°
	LXZ1-PH02 ^[4, 6]	20	0.06	150°	145°
Amber	LXZ1-PL01 ^[4]	20	0.10	150°	145°
	LXZ1-PL03 ^[4, 6]	20	0.10	150°	145°
PC Amber	LXZ1-PL02 ^[5]	80	0.01	140°	125°
Lime	LXZ1-PX01 ^[5]	100	0.01	140°	125°
Green	LXZ1-PM01 ^[5]	30	0.04	140°	125°
Cyan	LXZ1-PE01 ^[5]	30	0.03	140°	125°
Blue	LXZ1-PB01 ^[5]	20	0.03	140°	125°
Royal Blue	LXZ1-PR01 ^[5]	20	0.03	140°	125°

Notes for Table 2:

- Spectral width at ½ of the peak intensity.
- Total angle at which 90% of total luminous flux is captured.
- Viewing angle is the off axis angle from the LED centerline where the luminous intensity is ½ of the peak value.
- All Deep Red, Red, Red-orange and Amber products are built with Aluminum Indium Gallium Phosphide (AlInGaP).
- All PC Amber, Lime, Green, Cyan, Blue and Royal Blue products are built with Indium Gallium Nitride (InGaN).
- Wavelength ranges for hot tested Red, Red-Orange and Amber have been defined to align with typical changes in spectral output at increased temperature, which are inherent to AlInGaP LEDs. At T_j=25°C these hot-tested parts will have the same typical spectral outputs as their cold-tested counterparts.

Electrical and Thermal Characteristics

Table 3. Electrical and thermal characteristics for LUXEON Z Color Line at 500mA and specified junction temperature.

COLOR	PART NUMBER	FORWARD VOLTAGE ^[1] (V _f)			TYPICAL TEMPERATURE COEFFICIENT OF FORWARD VOLTAGE ^[2] (mV/°C)	TYPICAL THERMAL RESISTANCE—JUNCTION TO SOLDER PAD (°C/W)
		MINIMUM	TYPICAL	MAXIMUM		
Deep Red	LXZ1-PA01	1.75	2.20	2.75	-2 to -4	8
Red	LXZ1-PD01	1.75	2.20	2.75	-2 to -4	8
	LXZ1-PD02	1.75	2.20	2.75	-2 to -4	8
Red-Orange	LXZ1-PH01	1.75	2.20	2.75	-2 to -4	8
	LXZ1-PH02	1.75	2.20	2.75	-2 to -4	8
Amber	LXZ1-PL01	1.75	2.15	2.75	-2 to -4	8
	LXZ1-PL03	1.75	2.25	2.75	-2 to -4	8
PC Amber	LXZ1-PL02	2.50	2.85	3.50	-2 to -4	5
Lime	LXZ1-PX01	2.50	2.85	3.50	-2 to -4	5
Green	LXZ1-PM01	2.50	3.27	3.50	-2 to -4	5
Cyan	LXZ1-PE01	2.50	3.27	3.50	-2 to -4	5
Blue	LXZ1-PB01	2.50	2.85	3.50	-2 to -4	5
Royal Blue	LXZ1-PR01	2.50	2.85	3.50	-2 to -4	5

Notes for Table 3:

- Lumileds maintains a tolerance of ±0.06V on forward voltage measurements.
- Measured between 25°C and 85°C.

Absolute Maximum Ratings

Table 4a. Absolute maximum ratings for LUXEON Z Color Line tested at $T_j=25^{\circ}\text{C}$.

PARAMETER	GREEN/CYAN/ BLUE/ROYAL BLUE	COLD-TESTED RED/DEEP-RED/ RED-ORANGE/AMBER
DC Forward Current ^[1,2]	1000mA	700mA
Peak Pulsed Forward Current ^[1,3]	1000mA	700mA
LED Junction Temperature ^[1] (DC & Pulse)	150°C	135°C
ESD Sensitivity (ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2012)	Class 3B	Class 3B
Operating Case Temperature ^[1]	-40°C to 135°C	-40°C to 120°C
LED Storage Temperature	-40°C to 135°C	-40°C to 135°C
Soldering Temperature	JEDEC 020c 260°C	JEDEC 020c 260°C
Allowable Reflow Cycles	3	3
Autoclave Conditions	-121°C at 2 ATM	100% Relative Humidity for 96 hours Maximum
Reverse Voltage (V_{reverse})	LUXEON LEDs are not designed to be driven in reverse bias	

Notes for Table 4a:

1. Proper current derating must be observed to maintain junction temperature below the maximum.
2. Residual periodic variations due to power conversion from alternating current (AC) to direct current (DC), also called "ripple," with frequencies $\geq 100\text{Hz}$ and amplitude $\leq 15\%$ of the maximum allowable DC forward current are acceptable, assuming the average current throughout each cycle does not exceed the maximum allowable DC forward current at the corresponding maximum junction temperature.
3. Pulsed operation with a peak drive current equal to the stated peak pulsed forward current is acceptable if the pulse on-time is $\leq 5\text{ms}$ per cycle and the duty cycle is $\leq 50\%$.

Table 4b. Absolute maximum ratings for LUXEON Z Color Line tested at $T_j=85^{\circ}\text{C}$.

PARAMETER	HOT-TESTED RED/ RED-ORANGE/AMBER ^[4]	PC AMBER/LIME
DC Forward Current ^[1,2]	1000/700mA	700mA
Peak Pulsed Forward Current ^[1,3]	1000/700mA	700mA
LED Junction Temperature ^[1] (DC & Pulse)	120°C/135°C	135°C
ESD Sensitivity (ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2012)	Class 3B	Class 3B
Operating Case Temperature ^[1]	-40°C to 120°C	-40°C to 110°C
LED Storage Temperature	-40°C to 120°C	-40°C to 135°C
Soldering Temperature	JEDEC 020c 260°C	JEDEC 020c 260°C
Allowable Reflow Cycles	3	3
Autoclave Conditions	100% Relative Humidity for 96 hours Maximum	
Reverse Voltage (V_{reverse})	LUXEON LEDs are not designed to be driven in reverse bias	

Notes for Table 4b:

1. Proper current derating must be observed to maintain junction temperature below the maximum.
2. Residual periodic variations due to power conversion from alternating current (AC) to direct current (DC), also called "ripple," with frequencies $\geq 100\text{Hz}$ and amplitude $\leq 15\%$ of the maximum allowable DC forward current are acceptable, assuming the average current throughout each cycle does not exceed the maximum allowable DC forward current at the corresponding maximum junction temperature.
3. Pulsed operation with a peak drive current equal to the stated peak pulsed forward current is acceptable if the pulse on-time is $\leq 5\text{ms}$ per cycle and the duty cycle is $\leq 50\%$.
4. Hot Tested LUXEON Z Red (LXZ1-PD02), Red-Orange (LXZ1-PH02) and Amber (LXZ1-PL03) products have two boundary points for maximum conditions: $I_f=1\text{A}$ and $T_j=120^{\circ}\text{C}$ or $I_f=700\text{mA}$ and $T_j=135^{\circ}\text{C}$.

Characteristics Curves

Spectral Power Distribution Characteristics

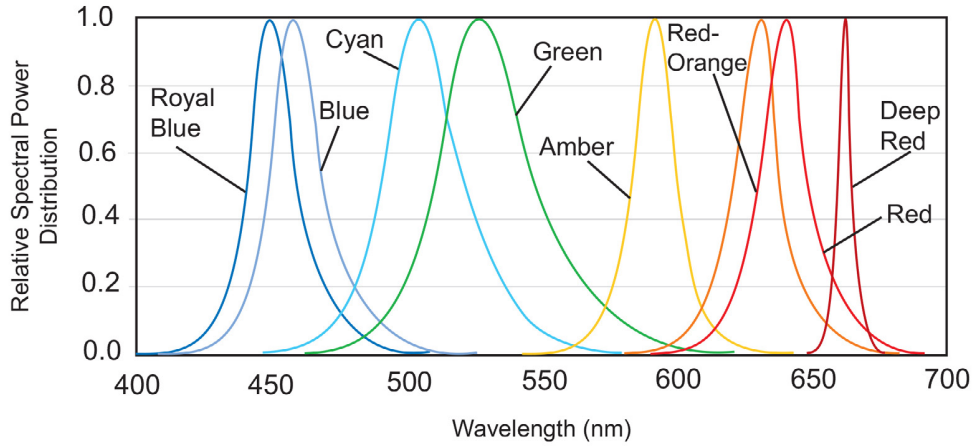


Figure 1a. Typical normalized power vs. wavelength for LUXEON Z Red, Red-Orange, Amber, Green, Cyan, Blue and Royal Blue, at 500mA, $T_j=25^{\circ}\text{C}$.

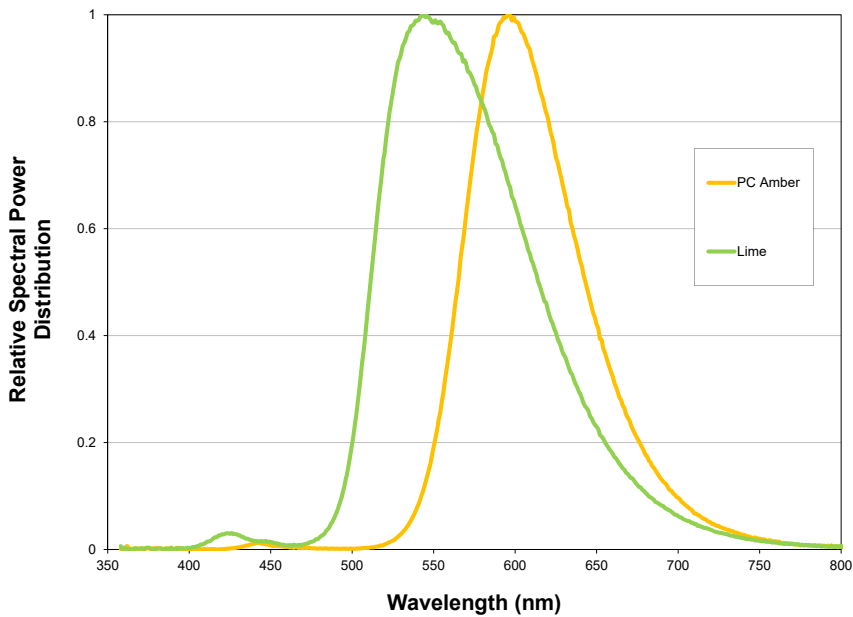


Figure 1b. Typical normalized power vs. wavelength for LUXEON Z PC Amber and Lime at 500mA, $T_j=85^{\circ}\text{C}$.

Light Output Characteristics

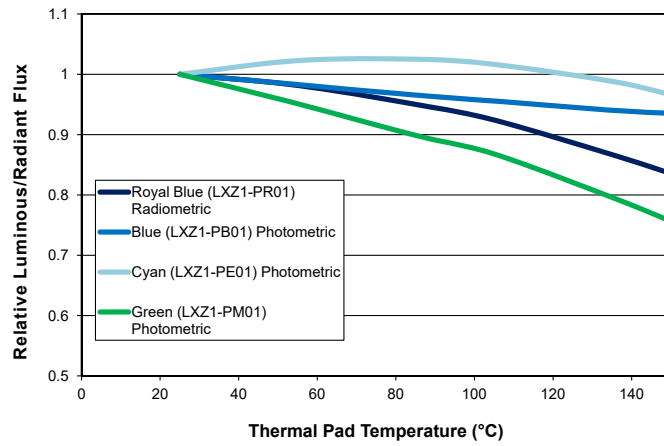


Figure 2a. Typical normalized light output vs. junction temperature for LXZ1-PR01, LXZ1-PB01, LXZ1-PE01 and LXZ1-PM01 at 500mA.

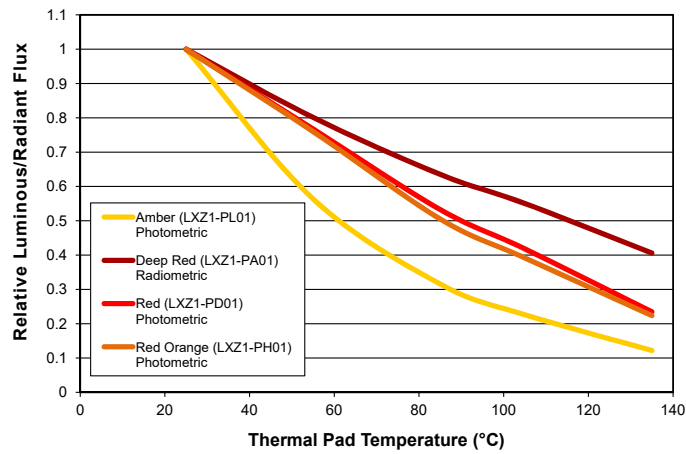


Figure 2b. Typical normalized light output vs. junction temperature for LXZ1-PL01, LXZ1-PA01, LXZ1-PD01 and LXZ1-PH01 at 500mA.

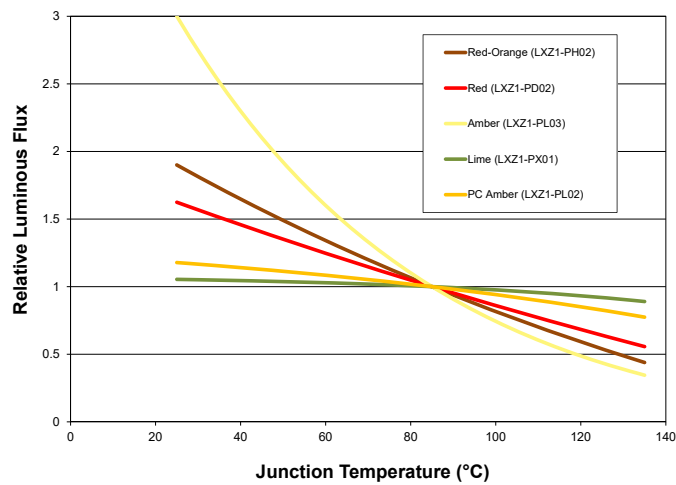


Figure 2c. Typical normalized light output vs. junction temperature for LXZ1-PX01, LXZ1-PL02, LXZ1-PD02, LXZ1-PH02 and LXZ1-PL03 at 500mA.

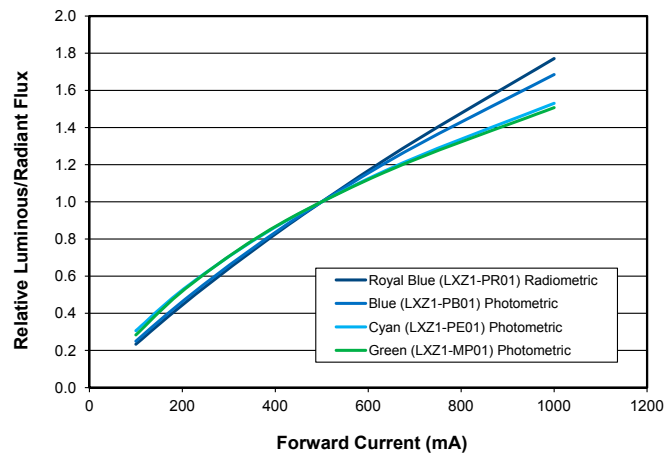


Figure 3a. Typical normalized light output vs. forward current for LXZ1-PR01, LXZ1-PB01, LXZ1-PE01 and LXZ1-PM01 at $T_j=25^{\circ}\text{C}$.

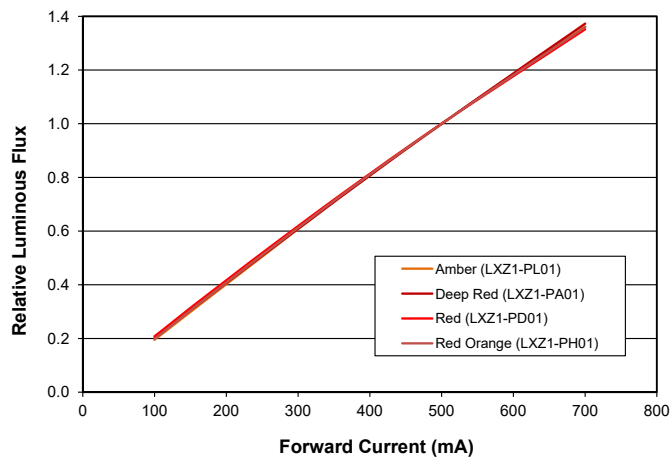


Figure 3b. Typical normalized light output vs. forward current for LXZ1-PL01, LXZ1-PA01, LXZ1-PD01 and LXZ1-PH01 at $T_j=25^{\circ}\text{C}$.

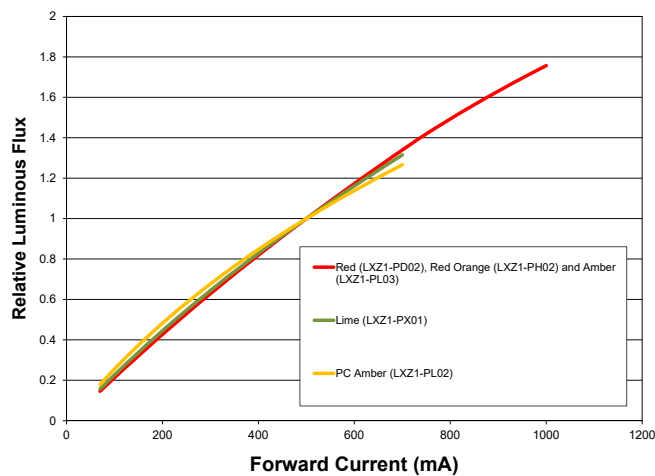


Figure 3c. Typical normalized light output vs. forward current for LXZ1-PX01, LXZ1-PL02, LXZ1-PD02, LXZ1-PH02, and LXZ1-PL03 at $T_j=85^{\circ}\text{C}$.

Forward Current Characteristics

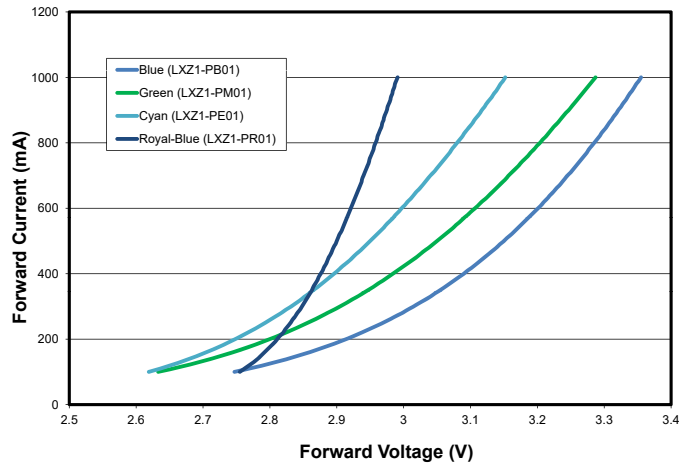


Figure 4a. Typical forward current vs. forward voltage for LXZ1-PR01, LXZ1-PB01, LXZ1-PE01 and LXZ1-PM01 at $T_j=25^\circ\text{C}$.

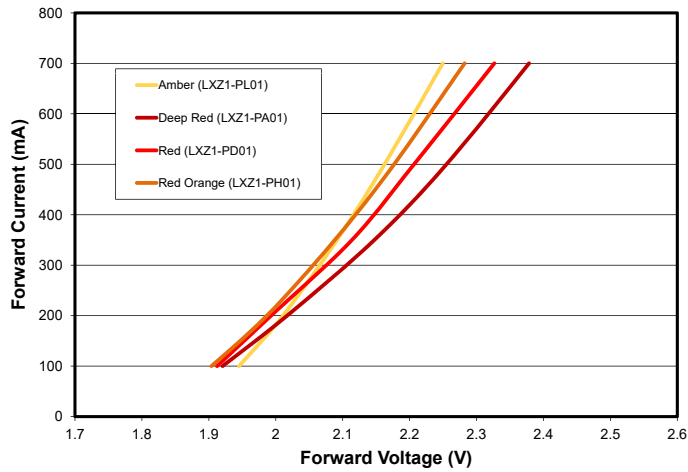


Figure 4b. Typical forward current vs. forward voltage for LXZ1-PL01, LXZ1-PA01, LXZ1-PD01 and LXZ1-PH01 at $T_j=25^\circ\text{C}$.

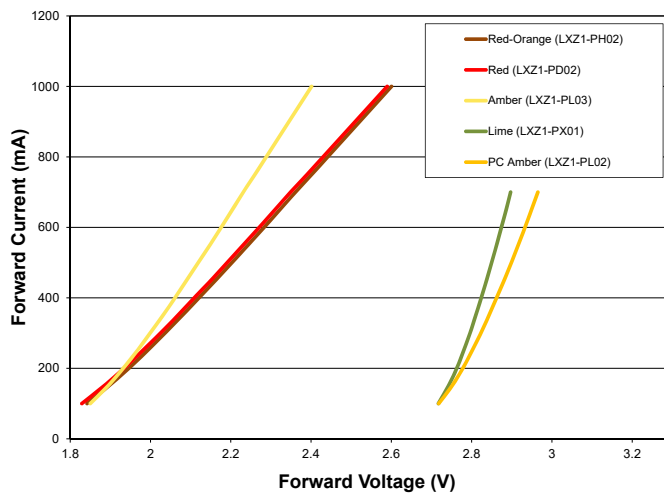


Figure 4c. Typical forward current vs. forward voltage for LXZ1-PX01, LXZ1-PL02, LXZ1-PD02, LXZ1-PH02, and LXZ1-PL03 at $T_j=85^\circ\text{C}$.

Radiation Pattern Characteristics

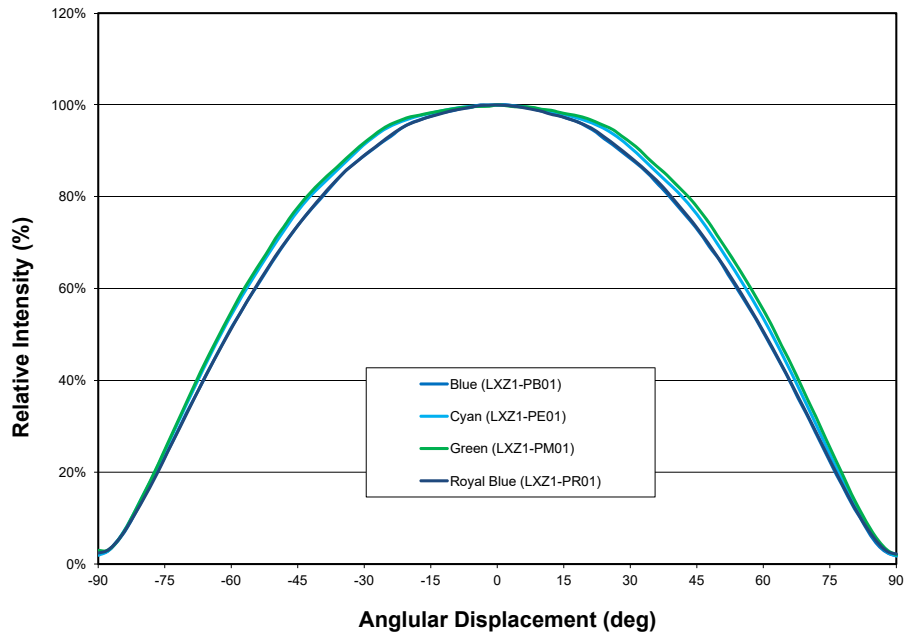


Figure 5a. Typical radiation pattern for LUXEON Z LXZ1-PR01, LXZ1-PB01, LXZ1-PE01 and LXZ1-PM01 at 500mA, $T_j=25^\circ\text{C}$.

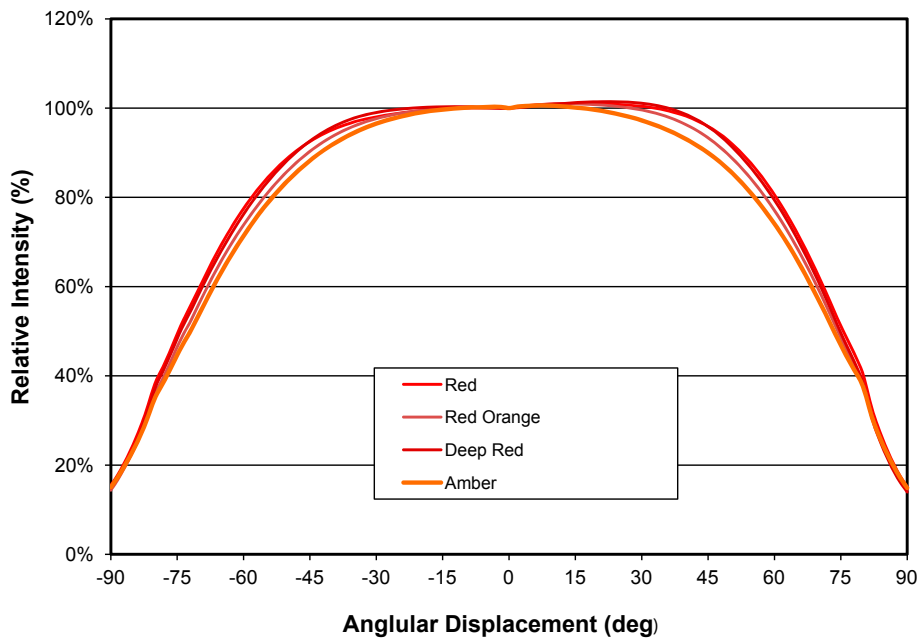


Figure 5b. Typical radiation pattern for LUXEON Z LXZ1-PL01, LXZ1-PA01, LXZ1-PD01, LXZ1-PH01, LXZ1-PL03, LXZ1-PH02 and LXZ1-PD02 at 500mA, $T_j=25^\circ\text{C}$.

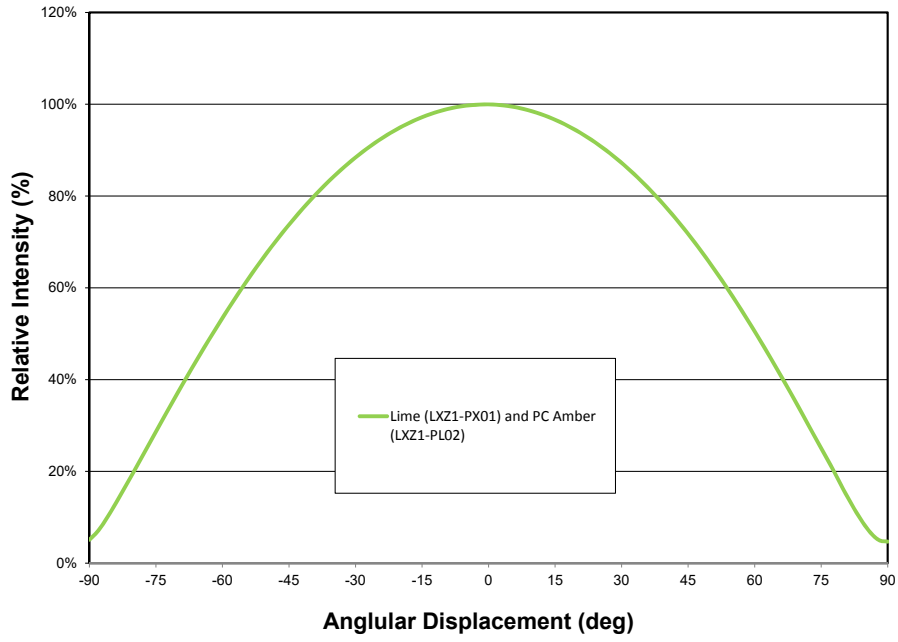


Figure 5c. Typical radiation pattern for LUXEON Z LXZ1-PX01 and LXZ1-PL02 at 500mA, $T_j=85^{\circ}\text{C}$.

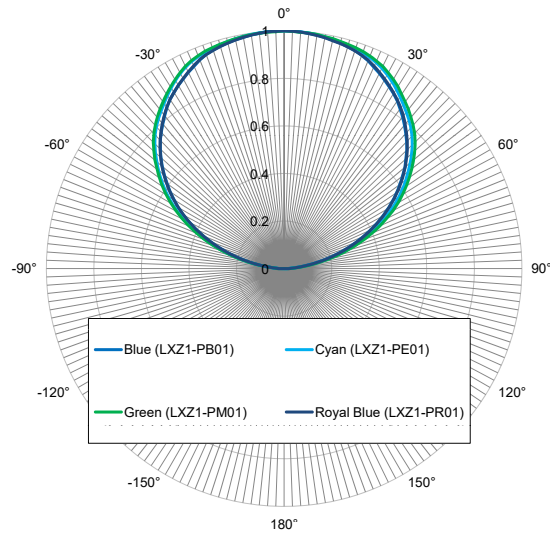


Figure 6a. Typical polar radiation pattern for LUXEON Z LXZ1-PR01, LXZ1-PB01, LXZ1-PE01 and LXZ1-PM01 at 500mA, $T_j=25^{\circ}\text{C}$.

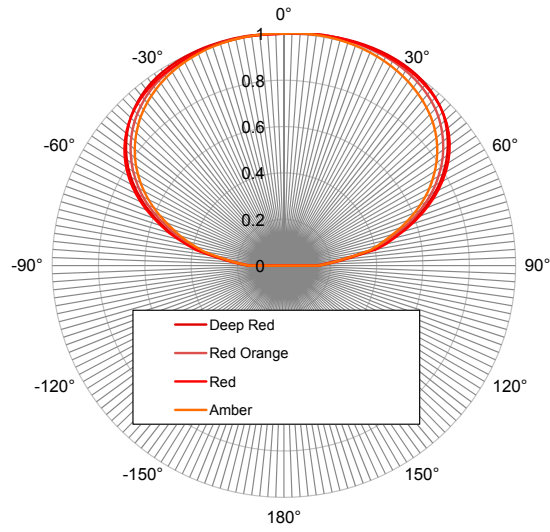


Figure 6b. Typical polar radiation pattern for LUXEON Z LXZ1-PL01, LXZ1-PA01, LXZ1-PD01 and LXZ1-PH01, LXZ1-PL03, LXZ1-PH02 and LXZ1-PD02 at 500mA, $T_j=25^{\circ}\text{C}$.

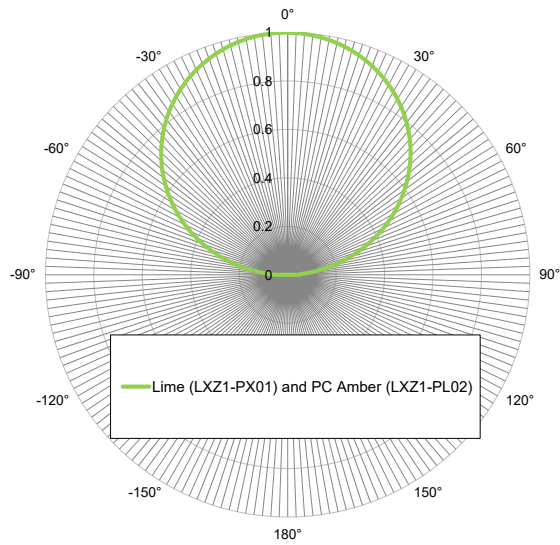


Figure 6c. Typical polar radiation pattern for LUXEON Z LXZ1-PX01 and LXZ1-PL02 at 500mA, $T_j=85^{\circ}\text{C}$.

E.2. LEDs del espectro ultravioleta

Los LED LUXEON UV U Line son dispositivos SMD que se pueden ensamblar en matrices estrechas con una separación de solo 200 micras, lo que permite sistemas de alta densidad de potencia (W / cm^2) para una mayor eficiencia. La densidad de potencia superior, la excelente robustez de la tecnología CSP y la eficacia permiten un alto rendimiento y un desarrollo eficiente de soluciones en una amplia variedad de aplicaciones de iluminación especial UV.

Performance Characteristics

Product Selection Guide

Table 1a. Product performance of LUXEON UV U1 at 500mA and 1000mA, T_j=25°C.

PEAK WAVELENGTH ^[1]	TYPICAL RADIOMETRIC POWER ^[2] (mW)		PART NUMBER
	500mA	1000mA	
415 ±5nm	575	1093	LHUV-0415-A055
	625	1188	LHUV-0415-A060
	675	1283	LHUV-0415-A065
	725	1378	LHUV-0415-A070
405 ±5nm	575	1093	LHUV-0405-A055
	625	1188	LHUV-0405-A060
	675	1283	LHUV-0405-A065
	725	1378	LHUV-0405-A070
395 ±5nm	525	998	LHUV-0395-A050
	575	1093	LHUV-0395-A055
	625	1188	LHUV-0395-A060
385 ±5nm	675	1283	LHUV-0395-A065
	275	523	LHUV-0385-A025
	325	618	LHUV-0385-A030
	375	713	LHUV-0385-A035
	425	808	LHUV-0385-A040
	475	903	LHUV-0385-A045
	525	998	LHUV-0385-A050
575	1093	LHUV-0385-A055	

Notes for Table 1a:

1. Lumileds maintains a tolerance of ±2nm for peak wavelength measurements.
2. Lumileds maintains a tolerance of ±10% for radiometric power measurements.

Table 1b. Product performance of LUXEON UV U2 at 1000mA and 2000mA, T_j=25°C.

PEAK WAVELENGTH ^[1]	TYPICAL RADIOMETRIC POWER ^[2] (mW)		PART NUMBER
	1000mA	2000mA	
410–420nm	1300	2340	L1F3-U410200012000
	1450	2610	L1F3-U410200014000
400–410nm	1100	1980	L1F3-U400200010000
	1300	2340	L1F3-U400200012000
	1450	2610	L1F3-U400200014000
390–400nm	1100	1980	L1F3-U390200010000
	1300	2340	L1F3-U390200012000
380–390nm	700	1260	L1F3-U380200006000
	900	1620	L1F3-U380200008000
	1050	1890	L1F3-U380200010000

Notes for Table 1b:

1. Lumileds maintains a tolerance of ±2nm for peak wavelength measurements.
2. Lumileds maintains a tolerance of ±10% for radiometric power measurements.

Optical Characteristics

Table 2a. Optical characteristics for LUXEON UV U1 at 500mA, T_j=25°C.

PART NUMBER	TYPICAL SPECTRAL HALF-WIDTH (nm)	TYPICAL TEMPERATURE COEFFICIENT OF PEAK WAVELENGTH (nm/°C)	TYPICAL TOTAL INCLUDED ANGLE ^[1]	TYPICAL VIEWING ANGLE ^[2]
LHUV-0415-Axxx	13.7	0.05	170°	140°
LHUV-0405-Axxx	12.0	0.05	170°	140°
LHUV-0395-Axxx	11.0	0.05	170°	140°
LHUV-0385-Axxx	9.0	0.05	170°	140°

Notes for Table 2a:

- Total angle at which 90% of total luminous flux is captured.
- Viewing angle is the off axis angle from the LED centerline where the luminous intensity is ½ of the peak value.

Table 2b. Optical characteristics for LUXEON UV U2 at 1000mA, T_j=25°C.

PART NUMBER	TYPICAL SPECTRAL HALF-WIDTH (nm)	TYPICAL TEMPERATURE COEFFICIENT OF PEAK WAVELENGTH (nm/°C)	TYPICAL TOTAL INCLUDED ANGLE ^[1]	TYPICAL VIEWING ANGLE ^[2]
L1F3-U41020000xxxx	13.7	0.05	165°	138°
L1F3-U40020000xxxx	12.0	0.05	165°	138°
L1F3-U39020000xxxx	11.0	0.05	165°	138°
L1F3-U38020000xxxx	9.0	0.05	165°	138°

Notes for Table 2a:

- Total angle at which 90% of total luminous flux is captured.
- Viewing angle is the off axis angle from the LED centerline where the luminous intensity is ½ of the peak value.

Electrical and Thermal Characteristics

Table 3a. Electrical and thermal characteristics for LUXEON UV U1 at 500mA, T_j=25°C.

PART NUMBER	FORWARD VOLTAGE ^[1] (V)		TYPICAL TEMPERATURE COEFFICIENT OF FORWARD VOLTAGE ^[2] (mV/°C)	TYPICAL THERMAL RESISTANCE—JUNCTION TO SOLDER PAD (°C/W)
	MINIMUM	MAXIMUM		
LHUV-0415-Axxx	2.9	3.4	-1.6	2.5
LHUV-0405-Axxx	2.9	3.4	-1.3	3.0
LHUV-0395-Axxx	2.9	3.4	-1.4	3.5
LHUV-0385-Axxx	2.9	3.4	-1.5	4.5

Notes for Table 3a:

- Lumileds maintains a tolerance of ±0.05V on forward voltage measurements.
- Measured between 25°C and 85°C.

Table 3b. Electrical and thermal characteristics for LUXEON UV U2 at 1000mA, T_j=25°C.

PART NUMBER	FORWARD VOLTAGE ^[1] (V)		TYPICAL TEMPERATURE COEFFICIENT OF FORWARD VOLTAGE ^[2] (mV/°C)	TYPICAL THERMAL RESISTANCE—JUNCTION TO SOLDER PAD (°C/W)
	MINIMUM	MAXIMUM		
L1F3-U41020000xxxx	2.8	3.4	-1 to -2	2.1
L1F3-U40020000xxxx	2.8	3.4	-1 to -2	2.3
L1F3-U39020000xxxx	2.8	3.4	-1 to -2	2.5
L1F3-U38020000xxxx	2.8	3.6	-1 to -2	2.7

Notes for Table 3b:

- Lumileds maintains a tolerance of ±0.05V on forward voltage measurements.
- Measured between 25°C and 85°C.

Absolute Maximum Ratings

Table 4. Absolute maximum ratings for LUXEON UV U Line.

PARAMETER	MAXIMUM PERFORMANCE
DC Forward Current ^[1,2]	1000mA for LUXEON UV U1 2000mA for LUXEON UV U2
Peak Pulsed Forward Current ^[1,3]	1300mA for LUXEON UV U1 2600mA for LUXEON UV U2
LED Junction Temperature ^[1] (DC & Pulse)	120°C
ESD Sensitivity (ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2012)	Class 3B
Operating Case Temperature ^[1]	-40°C to 120°C
LED Storage Temperature	-40°C to 135°C
Soldering Temperature	260 ±3°C
Allowable Reflow Cycles	3
Reverse Voltage ($V_{reverse}$)	LUXEON UV U Line LEDs are not designed to be driven in reverse bias

Notes for Table 4:

1. Proper current derating must be observed to maintain the junction temperature below the maximum allowable junction temperature.
2. Residual periodic variations due to power conversion from alternating current (AC) to direct current (DC), also called "ripple," are acceptable if the following conditions are met:
 - The frequency of the ripple current is 100Hz or higher
 - The average current for each cycle does not exceed the maximum allowable DC forward current
 - The maximum amplitude of the ripple does not exceed 15% of the maximum allowable DC forward current
3. At 10% duty cycle with pulse width of 10ms.

Characteristic Curves

Spectral Power Distribution Characteristics

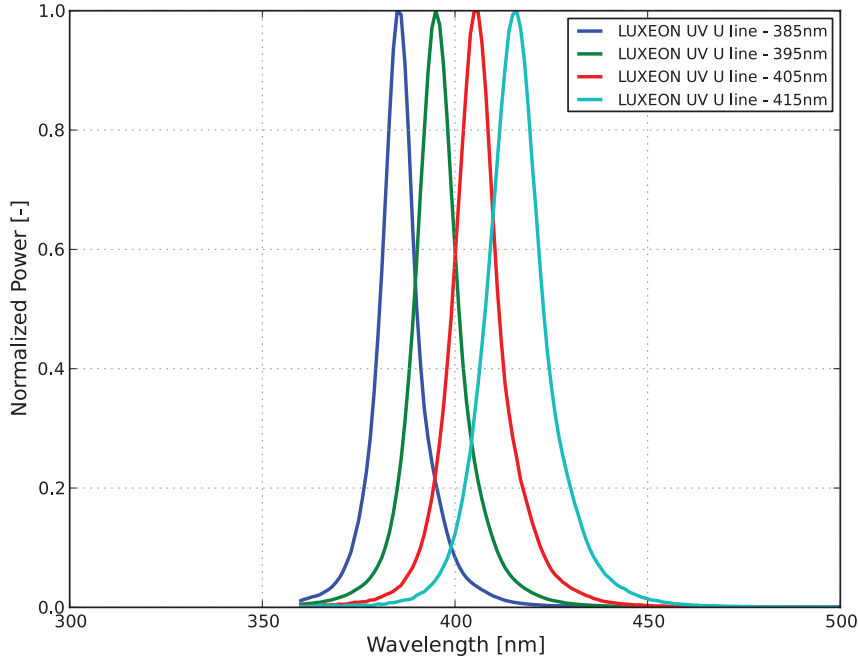


Figure 1. Typical normalized power vs. wavelength for LUXEON UV U1 at 500mA and LUXEON UV U2 at 1000mA, $T_j=25^{\circ}\text{C}$.

Light Output Characteristics

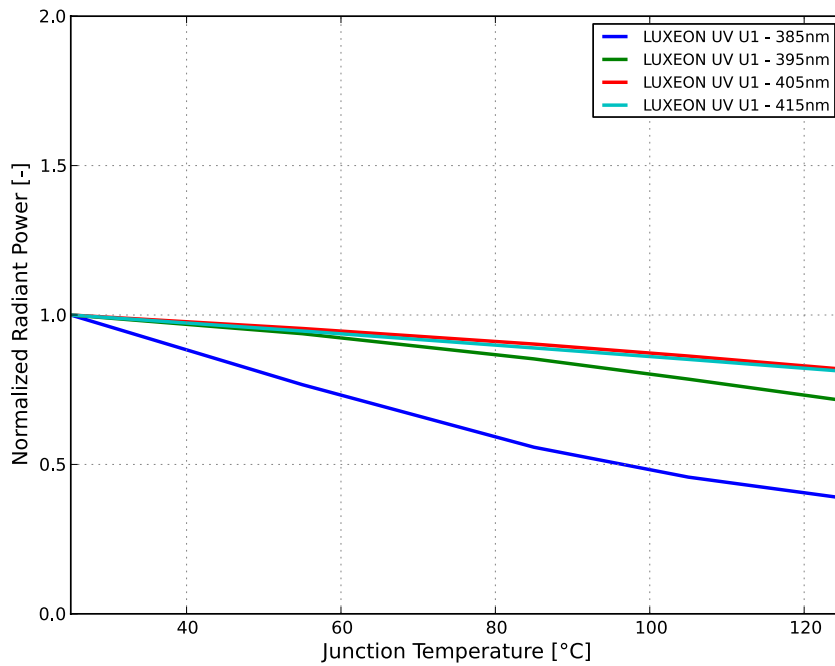


Figure 2a. Typical normalized radiant power vs. junction temperature for LUXEON UV U1 at 500mA.

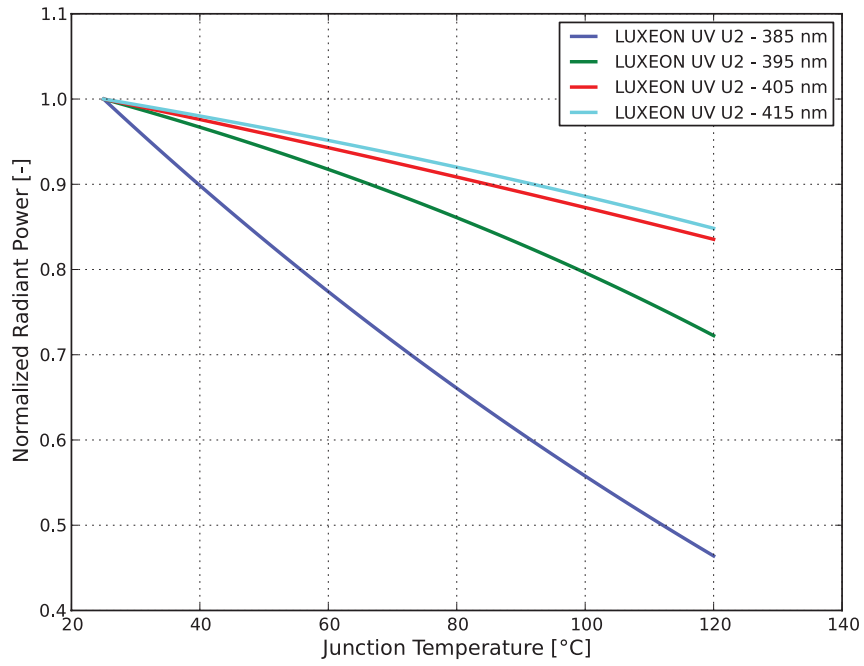


Figure 2b. Typical normalized radiant power vs. junction temperature for LUXEON UV U2 at 1000mA.

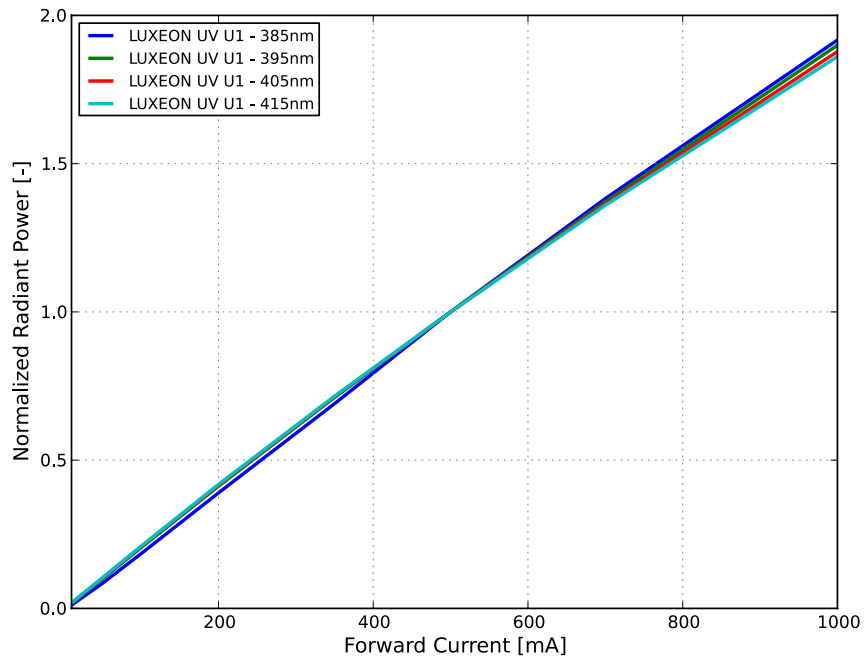


Figure 3a. Typical normalized radiant power vs. forward current for LUXEON UV U1 at $T_j=25^\circ\text{C}$.

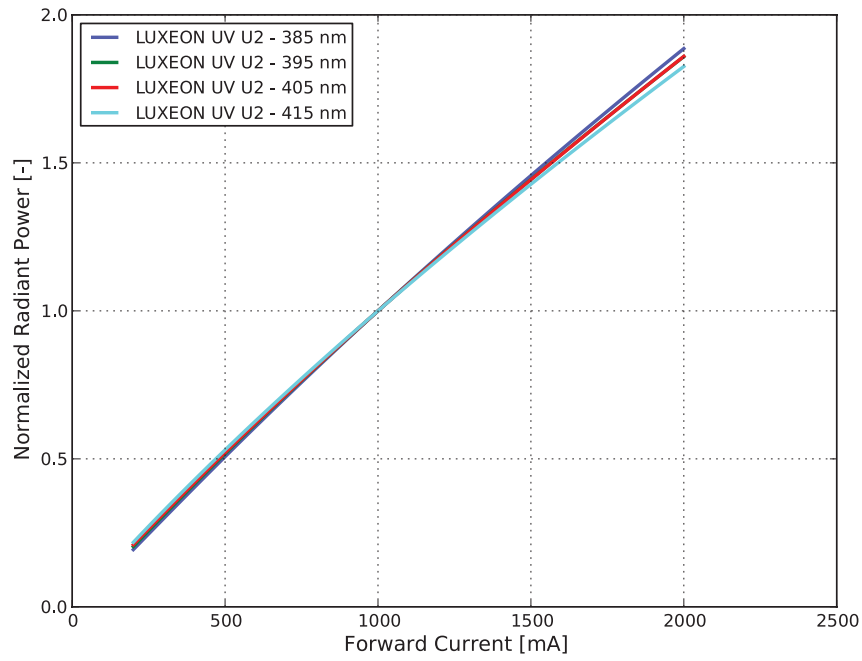


Figure 3b. Typical normalized radiant power vs. forward current for LUXEON UV U2 at $T_j=25^\circ\text{C}$.

Forward Current Characteristics

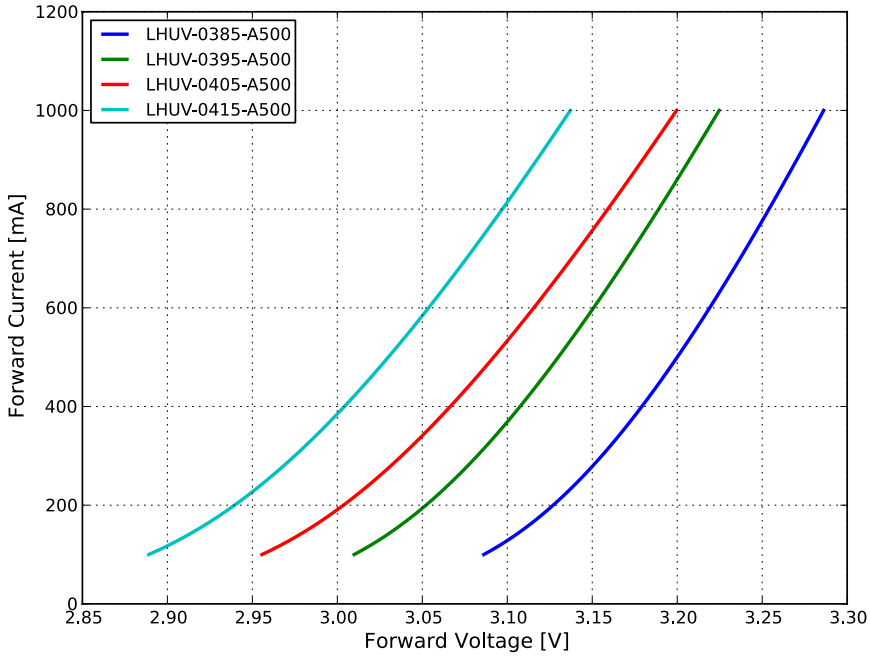


Figure 4a. Typical forward current vs. forward voltage for LUXEON UV U1 at $T_j=25^\circ\text{C}$.

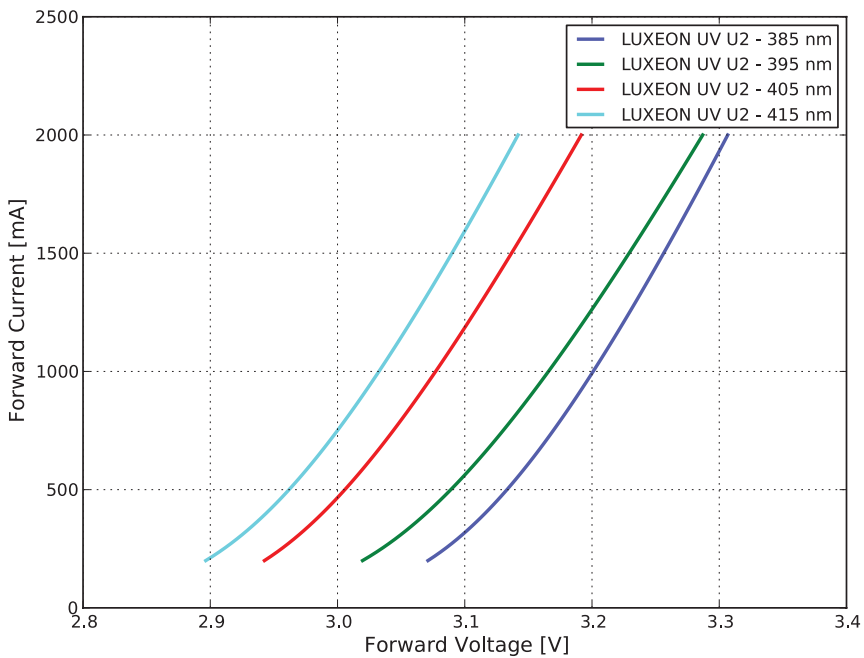


Figure 4b. Typical forward current vs. forward voltage for LUXEON UV U2 at $T_j=25^\circ\text{C}$.

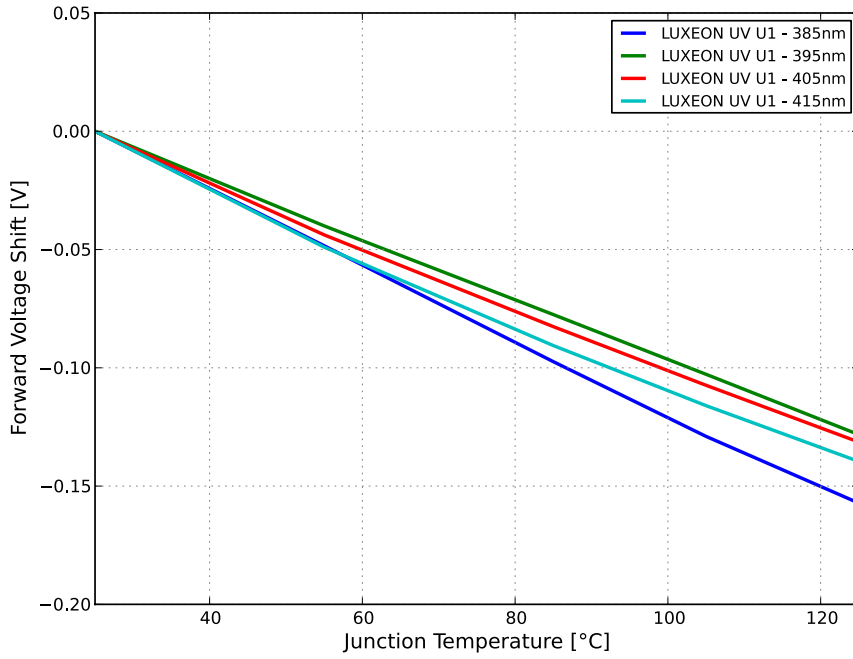


Figure 5a. Typical forward voltage shift vs. junction temperature for LUXEON UV U1 at $T_j=25^\circ\text{C}$.

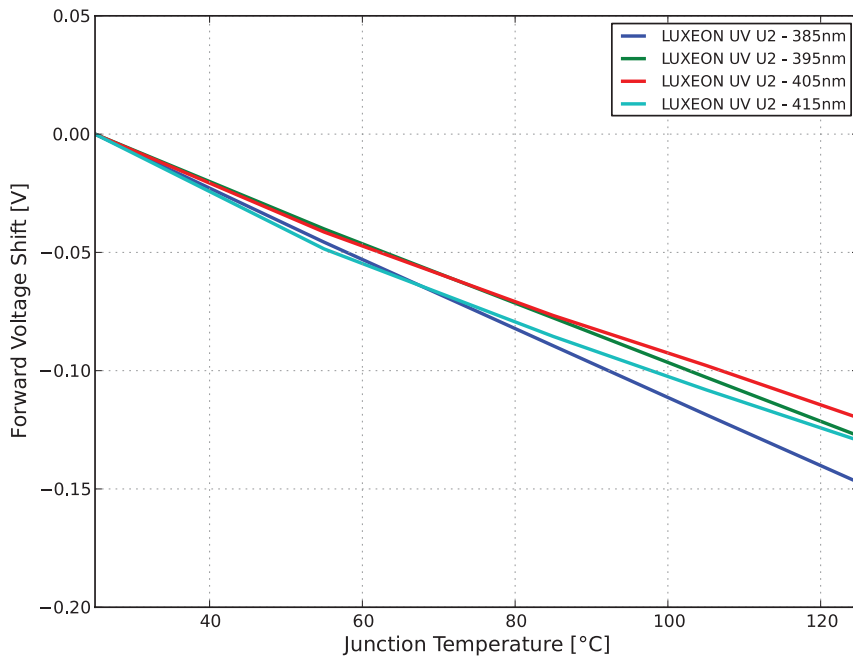


Figure 5b. Typical forward voltage shift vs. junction temperature for LUXEON UV U2 at $T_j=25^\circ\text{C}$.

Wavelength Shift

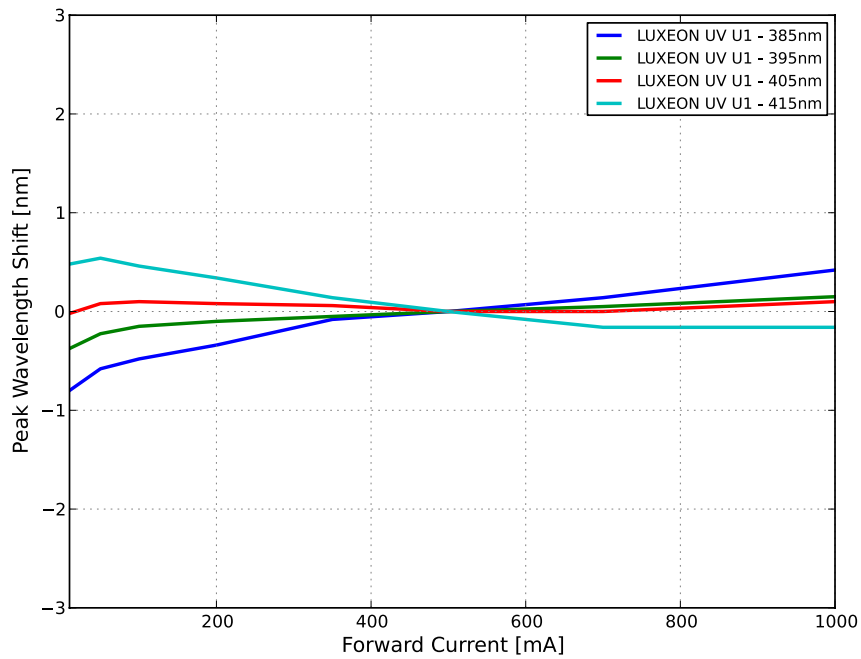


Figure 6a. Typical peak wavelength shift vs. forward current for LUXEON UV U1 at T_j=25°C.

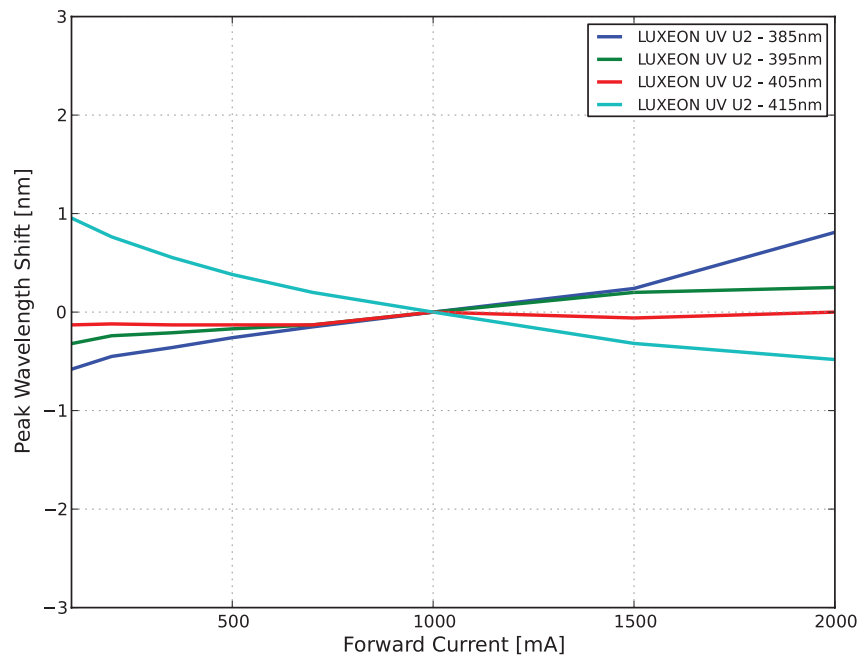


Figure 6b. Typical peak wavelength shift vs. forward current for LUXEON UV U2 at T_j=25°C.

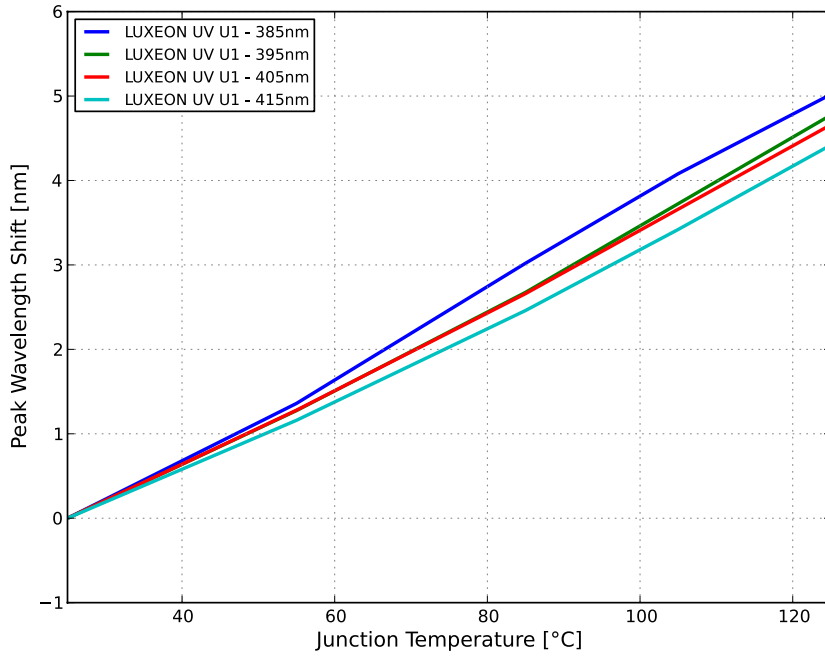


Figure 7a. Typical peak wavelength vs. junction temperature for LUXEON UV U1 at 500mA.

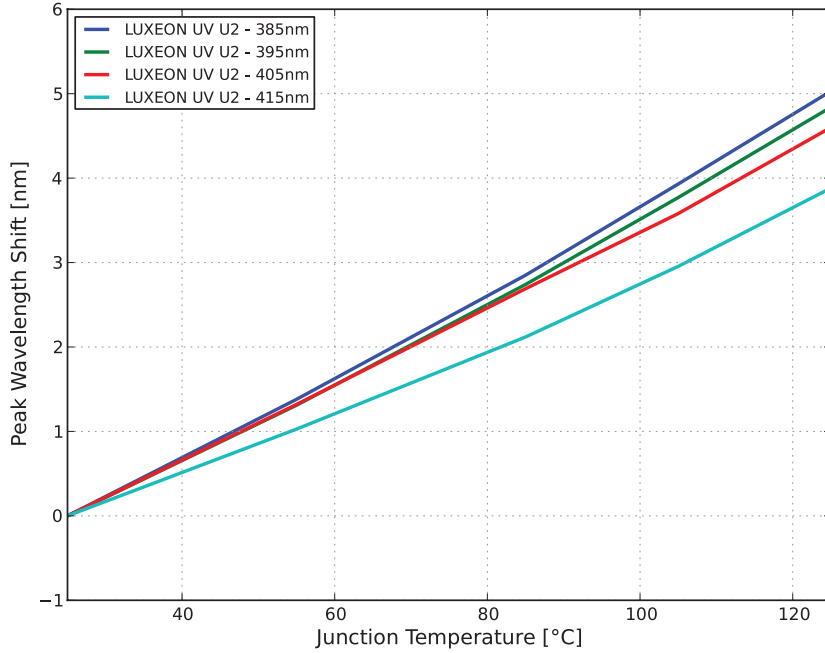


Figure 7b. Typical peak wavelength vs. junction temperature for LUXEON UV U2 at 1000mA.

Radiation Pattern Characteristics

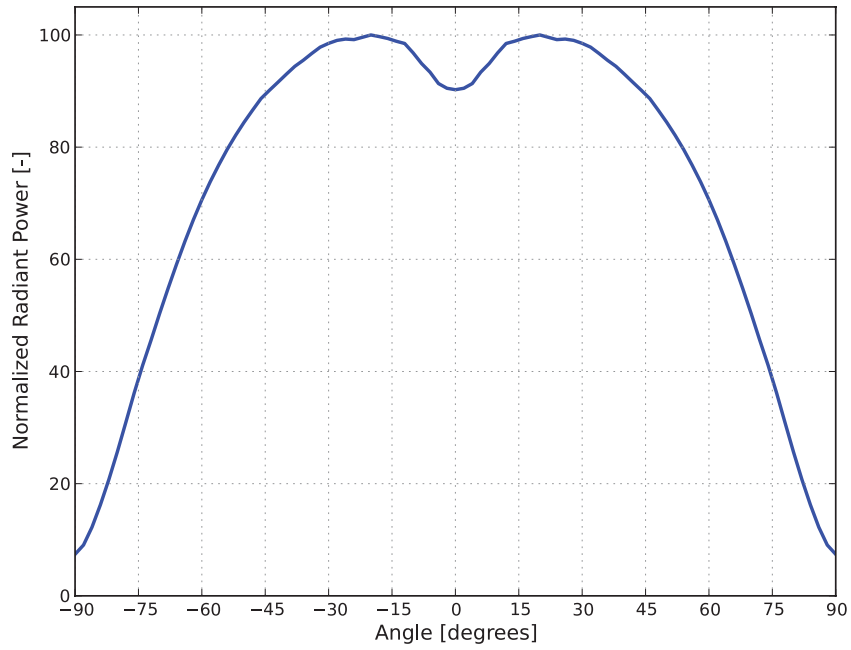


Figure 8. Typical radiation pattern for LUXEON UV U1 at 500mA and LUXEON UV U2 at 1000mA, $T_j=25^{\circ}\text{C}$.

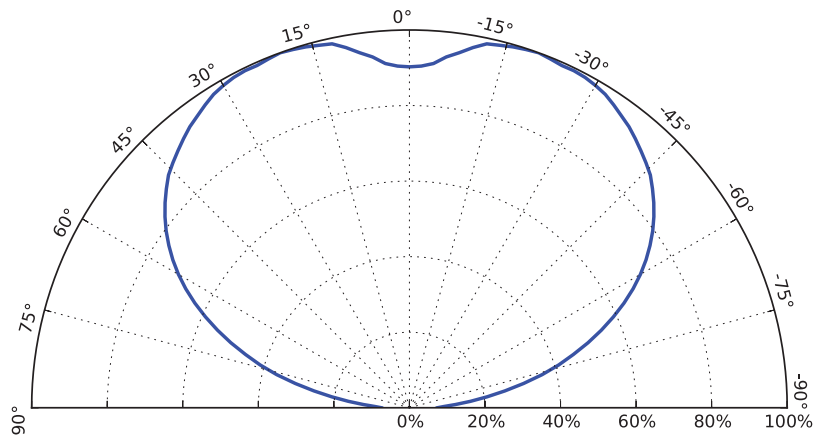


Figure 9. Typical polar radiation pattern for LUXEON UV U1 at 500mA and LUXEON UV U2 at 1000mA, $T_j=25^{\circ}\text{C}$.

E.3. Lentes utilizados en la tesis

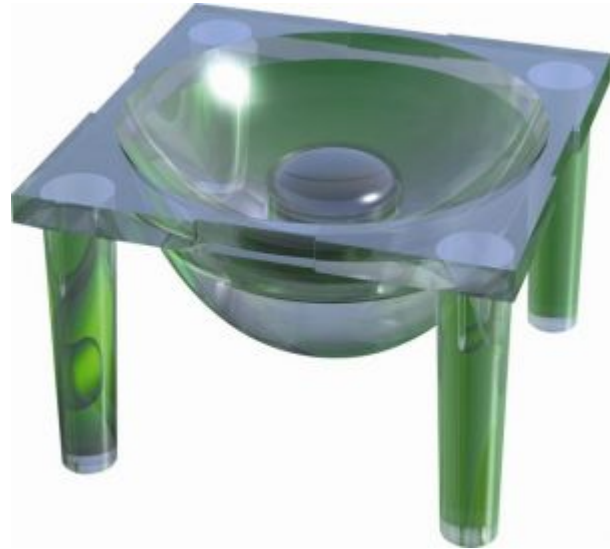
La lente cuadrada Carclo 39.2° 10 mm ofrece una huella muy compacta y una eficiencia de transmisión del 78%. La lente tiene patas de montaje integradas en cada esquina, por lo que es muy fácil asegurarla directamente a la placa de PC con adhesivo instantáneo Loctite 460 o RTV de silicona. Las ópticas Carclo están fabricadas con policarbonato de calidad de lente, tienen clasificación UL y pueden operar hasta 125°C.

La lente circular Carclo 35° 20 mm es ideal para la línea completa de LED Rebel Star y LUXEON Z de 20 mm cuando se usa con un soporte de lente de 20 mm. Fabricado con policarbonato de calidad de lente, esta lente tiene una eficiencia de transmisión del 74%, tiene clasificación UL y puede operar hasta 125 ° C.

Los LEDs utilizados en la tesis tienen un ángulo de visión entre 120° y 150°, los lentes están diseñados de tal forma que al ser colocados en el LED capten todo el haz de luz emitido por el LED.

10.0MM FROSTED WIDE TIR

Status	Production
Part no.	10414
Drawing no.	60527
Product type	Optic
Type	TIR
Pieces	1
Diameter	10.0
Height	6.00
Beam	Frosted Wide
Flange	Yes
Files	Customer drawing (PDF) Customer 3D model (.igs)



LEDs & Performances	Eff.	FWHM	Cd/lm	Spot	Cross-section	Files
Lumileds Rebel Cool White	78.0%	39.2	1.4			10414_Rebel_White_250408.ies
Lumileds Rebel Neutral White	77.0%	41.4	1.4			10414_Rebel_Neutral_White_250408.ies
Lumileds Rebel Warm White	76.7%	38.3	1.7			10414_Rebel_Warm_White_250408.ies
Cree XP-E XLamp® White	80.0%	36.7	1.7			10414_cree_xpe_white_250408.ies
Cree XP-G XLamp® White	78.3%	40	1.5			10414_cree_xpg_white_250408.ies
Osram Oslon SSL Oslon Ultra White	75.0%	44.3	1.2			10414_Oslon_wht_250408.ltd 10414_Oslon_wht_250408.ies
Nichia NCSL 119-H3 Top Emitting Warm White	72.1%	44.5	1.3			10414_Nichia_119_Warm_White_250408.ies
SSC Z5 Pure White	76.4%	37.2	1.8			10414_Seoul_Z5_white_250408.ies
Everlight Shuen Warm White	74.7%	48.8	1.1			10414_Shuen_wwht_250408.ies
Everlight Shuen Cool White	74.5%	48.8	1.0			10414_Shuen_cwht_250408.ies

Carclo Technical Plastics endeavours to continuously improve and renew its products; for this reason the technical data and contents of this catalogue may undergo variations without prior notice. For correct and up to date information, Carclo suggest using the Opticselect tool on our website <http://www.carclo-optics.com>.
Copyright © Carclo 2010

Handling instructions

- Do not handle or install lenses without wearing gloves, skin oils may damage the lens or the light transmission.
- Clean lenses with a mild soap and water and dry with a clean soft cloth.
- Do not use any commercial solvents on lenses.
- Mount holders with low Odour epoxy's and allow time for them to out gas to stop lenses fogging.

Please note that flow lines, weld lines and small black or white inclusions within the lenses are acceptable if the optical performance of the lens is within the specification described to +/-10%. FWHM-Full (beam) Width as measured at one Half of Maximum intensity, information shown in the catalogue are based on our laboratory's tests.

All rights reserved. No part of this publication may be copied, reproduced in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, illustrations not to be removed, without our prior permission. Carclo Technical Plastics reserves the right to make changes at any time in order to supply the best products possible.

R0.5

20.0MM FROSTED WIDE TIR

Status Production
Part no. 10196
Drawing no. 60461
Product type Optic
Type TIR
Pieces 1
Diameter 20.0
Height 9.90
Beam Frosted Wide
Flange No
Files [Customer drawing \(PDF\)](#)
[Customer 3D model \(.igs\)](#)



LEDs & Performances	Eff.	FWHM	Cd/lm	Spot	Cross-section	Files
Lumileds Rebel Cool White	74.0%	35	2.0			10196_rebel_white_250408.ies
Lumileds Rebel Neutral White	78.2%	34.1	2.2			10196_rebel_neutral_white_250408.ies
Lumileds Rebel Warm White	75.6%	34.4	2.4			10196_rebel_warm_white_250408.ies
Cree MC-E XLamp® White	70.0%	45	1.4			10196_Cree_MCE_white_250408.ies
Cree XP-E XLamp® White	78.1%	31.5	2.5			10196_cree_xpe_white_250408.ies
Osram Golden Dragon W5SG Dragon White	84.0%	32	2.3			10196_Dragon_W5SG_White_250408.ies 10196_Dragon_W5SG_White_250408.ltd
Osram Platinum Dragon W5SN Dragon White	85.0%	31.7	2.3			10196_PlatoDragon_W5SN_wht_250408.ies 10196_PlatoDragon_W5SN_wht_250408.ltd
Osram Golden Dragon W5SM Dragon White	84.0%	32	2.3			10196_Dragon_W5SM_White_250408.ies 10196_Dragon_W5SM_White_250408.ltd
SSC A2 Acriche White	74.5%	35.8	1.9			10196_seoul_Acriche2000_cWhite_250408.ies
Nichia NFSW 036 Top Emitting Cool White	79.4%	32.8	2.2			10196_Nichia_036_CoolWhite_250408.ies
Nichia WS6W 083 Top Emitting Cool White	75.6%	37.4	1.7			10196_Nichia_083_CoolWhite_250408.ies
Nichia NS3W 183T Top Emitting White	80.9%	37	1.9			10196_Nichia_183_White_250408.ies

SSC P5-II RGB	77.3%	36.1	1.6			10196_seoul_P5_RGB_250408.ies
Stanley 1643 Cool White	77.9%	30.2	2.4			10196_SCW1643US_cool white_250408.ies
Stanley 1653 Warm White	79.2%	28.7	2.8			10196_SCW1653US_warm white_250408.ies
Samsung Sunnix WH5 White	79.5%	42.5	1.5			10196_Sunnix Samsung_SLHNN WH5_cWhite_250408.ies

Related Holders & LEDs	Cree MC-E XLamp® White	Cree XP-E XLamp® White	Lumileds Rebel Cool White	Lumileds Rebel Neutral White	Lumileds Rebel Warm White	Nichia NFSW 036 Top Emitting Cool White	Nichia NS3W 183T Top Emitting White	Nichia WS6W 083 Top Emitting Cool White	Osram Golden Dragon W5SG Dragon White	Osram Golden Dragon W5SM Dragon White	Osram Platinum Dragon W5SN Dragon White	Samsung Sunnix WH5 White	SSC A2 Acriche White	SSC P5-II RGB	Stanley 1643 Cool White	Stanley 1653 Warm White
10148 20.0mm Circular Black									✓	✓	✓					
10149 20.0mm Circular Clear									✓	✓	✓					
10150 20.0mm Circular White									✓	✓	✓					
10235 20.0mm Circular Black			✓	✓	✓											
10236 20.0mm Circular White			✓	✓	✓											
10237 20.0mm Circular Clear			✓	✓	✓											
10276 50.0mm Triple White	✓								✓	✓	✓					
10279 50.0mm Triple White		✓	✓	✓	✓	✓		✓								
10286 50.0mm Triple White	✓								✓	✓	✓					
10289 50.0mm Triple White		✓	✓	✓	✓	✓		✓								
10296 50.0mm Triple Black	✓								✓	✓	✓					
10299 50.0mm Triple Black		✓	✓	✓	✓	✓		✓								
10306 50.0mm Circular Black	✓								✓	✓	✓					
10309 50.0mm Triple Black		✓	✓	✓	✓	✓		✓								
10431 20.0mm Hexagonal Black			✓	✓	✓											
10432 20.0mm Hexagonal Clear			✓	✓	✓											
10433 20.0mm Hexagonal White			✓	✓	✓											
10434 20.0mm Hexagonal Black			✓	✓	✓											
10435 20.0mm Hexagonal Clear			✓	✓	✓											
10436 20.0mm Hexagonal White			✓	✓	✓											
10566 20.0mm Circular Black		✓				✓										
10567 20.0mm Circular White		✓				✓										
10568 20.0mm Circular Clear		✓				✓										
10615 20.0mm Circular Black								✓								
10616 20.0mm Circular Clear								✓								

