

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
UNIDAD DE POSGRADO



**CARACTERIZACIÓN FOTOMÉTRICA DE
LÁMPARAS LED**

TESIS

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA

PRESENTADA POR

FERNANDO MIGUEL ANDRES OSCCO CHOQUE

Asesor

Dr. MANFRED JOSEF HORN MUTSCHLER

LIMA-PERÚ

2015

Agradecimiento

En primer lugar a mi asesor de tesis, el Dr. Manfred Horn por su paciencia y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia y su motivación ha logrado que yo pueda terminar mis estudios de maestría con éxito.

Al profesor Guido Castillo, por su apoyo con sus conocimientos de electrónica, a Mylène Fallon por su apoyo en diferentes aspectos de la tesis y al Sr. José Farfán que siempre aportó con excelentes ideas en la parte de construcción mecánica.

El agradecimiento al CONCYTEC por su apoyo económico que sin el cual no habría sido posible realizar este trabajo de tesis.

Resumen

El trabajo de la tesis consiste en la mejora y análisis de los procedimientos de evaluación de las lámparas LED o partes de ella con los diferentes equipos que cuenta el laboratorio de fotometría de la facultad de ciencias de la UNI.

Como primer punto del trabajo se inicia con la calibración y análisis de incertidumbre de la esfera de Ulbricht LMS-400 de la marca Labsphere. Este proceso consta de la calibración a partir de la lámpara patrón SCL-050-A41, y el análisis de incertidumbre se realizó por múltiples mediciones de lámparas que son iguales, físicamente, a las lámparas patrón.

El segundo punto fue el diseño, construcción y caracterización de una esfera de Ulbricht de bajo costo a la que llamamos esfera UNI-LAB. Este trabajo se basó en el diseño, construcción y caracterización de una esfera integradora cuyo costo de materiales, sin considerar el luxómetro, fue prácticamente de 200,00 nuevos soles. El diseño de esta esfera integradora parte de la adquisición de una luminaria de alumbrado público que está formada por dos semiesferas hechas de poliuretano y que tienen un diámetro de 40 cm. La construcción se realizó en el taller mecánico y en el laboratorio de energía solar de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y consistió en hacer los agujeros necesarios, construir piezas adicionales, pintar de blanco mate la parte interna de la esfera y de negro la parte externa, entre otras cosas. La caracterización se realizó en el laboratorio de fotometría de la UNI y consistió en verificar la reproducibilidad y repetibilidad de los resultados de la iluminancia, calibrar la esfera usando una lámpara patrón o de referencia (comparando el flujo luminoso conocido versus la iluminancia medida en el luxómetro) y en el análisis de la incertidumbre para diferentes fuentes de luz que fue menor al 4 % partiendo de la incertidumbre de la esfera LMS-400. El tercer punto fue la mejora del goniofotómetro del laboratorio a partir del uso del nuevo luxómetro de excelente calidad Gossen Mavolux 5032B, luxómetro que tiene una resolución máxima de 0,01 lx, un error del filtro fotópico menor a 3 %, un error en la corrección del coseno menor al 2 % y tiene certificación por METAL-TEST del 29/05/2012. Las mediciones que puede otorgar el goniofotómetro son la distribución espacial de la intensidad luminosa y el flujo luminoso. Estos resultados fueron muy buenos pues se asemejaron mucho a los valores obtenidos por la esfera de Ulbricht, teniendo como diferencia máxima de 3 %.

Índice

Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice	III
Introducción	1
Objetivos	3
Marco Teórico	4
1. Visión Humana y Fotometría	4
1.1. Visión Humana	4
1.2. Fotometría	4
1.2.1. Visión Fotópica, Escotópica y Mesópica	5
1.3. Magnitudes fotométricas	7
1.3.1. Definición de Candela y de las magnitudes fotométricas	7
1.3.2. Relación entre las magnitudes radiométricas y fotométricas	9
2. Colorimetría	10
2.1. Observador Estándar de Color CIE	10
2.1.1. Coordenadas de cromaticidad	12
2.1.2. Diagrama de cromaticidad CIE 1931	12
2.1.3. Diagrama uniforme de cromaticidad, diagrama CIE 1976 UCS	13
2.2. Espacios Uniformes de Color	14
2.2.1. Espacio de color CIE 1976 ($L^*a^*b^*$); espacio de color CIELAB	14
2.2.2. Espacio de color CIE 1976 ($L^*u^*v^*$); Espacio de color CIELUV	15
2.3. Fuentes de luz e iluminantes CIE	16
2.3.1. Iluminante A	16
2.3.2. Iluminante D65	16
2.3.3. Otras iluminantes D	17
2.4. Características relacionadas a la cromaticidad	18

2.4.1.	Temperatura de color (T_D)	18
2.4.2.	Temperatura correlacionada de color	19
2.4.3.	Longitud de onda dominante y pureza	19
2.4.4.	Rendimiento de color y el índice de rendimiento de color general	19
2.5.	Normas y recomendaciones para la medida de reflectancia de materiales	20
2.5.1.	Geometría de medición	21
3.	Métodos de medición del flujo luminoso	22
3.1.	Método del goniofotómetro	23
3.1.1.	Distribución de la intensidad luminosa	24
3.2.	Método de la esfera integradora	25
3.2.1.	Superficie Lambertiana	25
3.2.2.	Teoría de la esfera integradora	25
3.2.3.	Método de la sustitución	27
4.	Lámparas LED	30
4.1.	Introducción a la tecnología LED	30
4.2.	Funcionamiento físico de las lámparas LED	31
4.3.	Procedimientos fotométricos de evaluación de una lámpara LED	32
4.3.1.	Uso de la esfera integradora	33
4.3.2.	Uso del goniofotómetro	34
5.	Cálculo de incertidumbres	35
5.1.	Evaluación de incertidumbre	35
5.1.1.	Evaluación de incertidumbre de tipo A	35
5.1.2.	Evaluación de incertidumbre de tipo B	36
5.1.3.	Grados de libertad	36
5.2.	Incetidumbre combinada	36
5.2.1.	Incetidumbre expandida y nivel de confianza	37
	Proceso Experimental	38
6.	Calibración de la esfera integradora LMS-400	38
6.1.	Proceso de Calibración del espectrómetro CDS-1100 y la esfera LMS-400	38
6.1.1.	Cálculo de la incertidumbre de medición	39
6.1.2.	Expresión para la incertidumbre	40
6.1.3.	Programa para obtener el CCT	40

7. Calibración de la esfera integradora PCE-LED	41
8. Diseño y construcción de la esfera integradora UNI-LAB	43
8.1. Elección de la pintura	45
9. Mejora del goniofotómetro de la Facultad de Ciencias-UNI	46
9.1. Proceso de alineación	50
9.2. Software de control	51
9.3. Cálculos del flujo luminoso	51
Resultados	54
10. Calibración de la esfera integradora LMS-400	54
11. Resultados de la calibración de la esfera PCE-LED	56
12. Resultados de caracterización y calibración de la esfera UNI-LAB	59
12.1. Caracterización de la pintura de la esfera UNI-LAB	59
12.2. Repetibilidad en la esfera UNI-LAB	60
12.3. Calibración de la esfera UNI-LAB	60
12.4. Evaluación de una lámpara incandescente con la esfera UNI-LAB	62
12.5. Uso de la esfera UNI-LAB para evaluaciones de rutina	62
13. Corrección de la distancia usando la ley de inverso al cuadrado en el goniofotómetro	63
14. Evaluación de la lámpara Zimpertec	66
14.1. En la esfera LMS-400	66
14.2. En el goniofotómetro	68
15. Evaluación de la lámpara Sun King Pro	70
15.1. En la esfera integradora	71
15.2. En el goniofotómetro	73
16. Evaluación de la lámpara LED marca OSRAM	76
16.1. En la esfera integradora	76
16.2. En el goniofotómetro	78

Discusión	82
Conclusiones	83
Bibliografía	85
Anexos	88
A. Anexo A: Procedimiento en la evaluación de los sistemas pico-fotovoltaicos en el laboratorio de fotometría UNI	89
A.0.1. Evaluación de la batería	92
A.0.2. Descarga completa de la batería	92
A.0.3. Carga Completa de la batería	93
A.0.4. Cálculos y resultados	94
A.0.5. Evaluación del DUT con la batería completamente cargada	95
A.0.6. Procedimiento del DUT hasta el punto L70	96
A.1. Cálculos del DUT hasta llegar al punto L70	97
A.1.1. Flujo luminoso y distribución de la intensidad luminosa	98
A.1.2. Evaluación del flujo luminoso	98
A.1.3. Evaluación de la distribución luminosa	99
B. Anexo B: Apariencia del programa CCT-lab, del programa de control del goniofotómetro y del programa Gonio-lab	101
C. Anexo C: Informe del programa de la esfera LMS-400 de las lámparas Zimpertec, Sun King Pro y OSRAM	104
D. Anexo D: Reporte de la lámpara Zimpertec	107

Introducción

Desde la invención de la lámpara incandescente, dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía luminosa en el siglo XIX, el hombre optó como opción viable para iluminación artificial el uso de la energía eléctrica.

Este fue el primer paso para que la humanidad use la energía eléctrica para la iluminación, y desde ahí no ha parado hasta la fecha pasando por diferentes tecnologías como las lámparas fluorescentes, lámparas de sodio, etc. donde se ha ido mejorando la eficacia luminosa (ν), el IRC (Índice de Reproducción Cromática) y el tiempo de vida (tabla 1).

Tabla 1: Eficacia, IRC y tiempo de vida de fuentes comunes de iluminación [1].

Fuente de luz	Eficacia (lm/W)	IRC	Tiempo de vida (h)
Incandescente (120 V)	14.4	100	1 000
Fluorescente compacta	51	80	10 000
Mercurio de alta presión	34	50	24 000
Sodio de alta presión	108	22	24 000
LED	130-220	80	50 000

Actualmente la tecnología de iluminación de estado sólido (SSL por sus siglas en inglés de Solid-State Lighting) promete ser una solución de ahorro de energía en el ámbito de la iluminación [1] por su alta eficacia y otras características. La figura 1 muestra la historia de la eficacia luminosa de las lámparas incandescentes, lámparas halógenas, lámparas fluorescentes, lámparas de vapor de sodio y lámparas LED (Lighting Emitting-Diode) comerciales de color blanco [2]. En el 2010, Yukio Narukawa et al. obtuvieron una eficacia luminosa de 249 lm/W para un LED blanco [2]. Pero así como podemos tener una lámpara LED con adecuadas características, que van desde una buena eficacia hasta una excelente distribución de la intensidad luminosa pasando por un alto IRC entre otras características, también podemos tener una lámpara LED con unas características que no son las deseadas. Por este motivo las lámparas LED deberían pasar por una adecuada evaluación fotométrica-eléctrica para poder conocer dichas características y saber que el producto cumple con ciertos requisitos mínimos. Algunos organismos, algunos de ellos relacionados exclusivamente con la iluminación, con la como la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), IES (Illuminating Engineering Society), ANSI (American National Standards Institute), entre otros, han publicado normas o recomendaciones relacionados a los procedimientos de evaluación, en los cuales se verifica y/o evalúa las características de la lámparas LED.

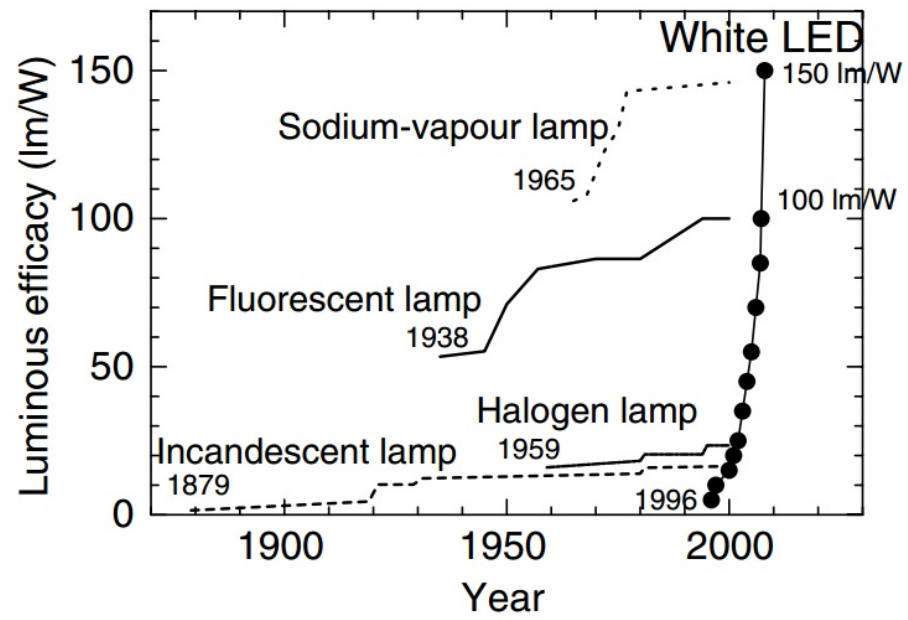


Figura 1: Historia de la eficacia de diferentes lámparas [2].

Objetivos

- Conocer todas las posibles mediciones que se pueden realizar con el equipo que cuenta el laboratorio de fotometría de la Facultad de Ciencias-UNI.
- Diseñar y construir una esfera integradora para obtener el flujo luminoso de diferentes lámparas cuyas dimensiones sean pequeñas respecto al radio de la esfera y que tenga un bajo costo en los materiales.
- Añadir mejoras al goniofotómetro de la Facultad de Ciencias de tal manera que se obtenga incertidumbres menores a 5 %.
- Hallar la incertidumbre de los procesos de medición.

Marco Teórico

Esta sección detalla los conocimientos previos que tienen relevancia y relación con el presente trabajo de tesis.

1. Visión Humana y Fotometría

El proceso de visión no consta solo del ojo humano, pues el ojo y el cerebro deben trabajar juntos; sin embargo se puede considerar al ojo humano como punto de partida del proceso de visión.

1.1. Visión Humana

En el ojo humano se encuentran dos tipos de células que sirven como sensores para la luz visible. Estos dos tipos de sensores son los conos y los bastones, los primeros se subdividen en 3 los cuales responden a una sensibilidad espectral definida en forma de pico con su máximo en el azul, verde y rojo, en conjunto estos tres tipos de conos son los encargados de la distinción de colores y predominan cuando se tiene una buena iluminación; y el segundo tipo de célula, los bastones, son los responsables de la visión cuando el nivel de iluminación es baja y a diferencia de los conos no son capaces de diferenciar colores. Esta sección se basó en las referencias [3, 4, 5, 6].

1.2. Fotometría

Para que una radiación electromagnética produzca un estímulo en el órgano visual del ser humano debe estar en la región denominada luz visible. Según la Comisión Internacional en Iluminación (normalmente CIE por sus siglas en francés) [7, 8] la luz visible va desde de 360nm a 830nm. Cualquier radiación electromagnética fuera de la luz visible no estimulará al órgano visual. La fotometría es la ciencia cuyo fin es medir exclusivamente la luz visible obteniendo resultados lo más cercanos posibles a los resultados que daría un observador humano normal, para lo cual la fotometría usa sus propias magnitudes.

La fotometría no se debe confundir con la radiometría, que es la ciencia que estudia y/o mide la radiación de todo el espectro electromagnético en función de la longitud de onda. En la sección 1.3 se detalla más acerca de las magnitudes fotométricas.

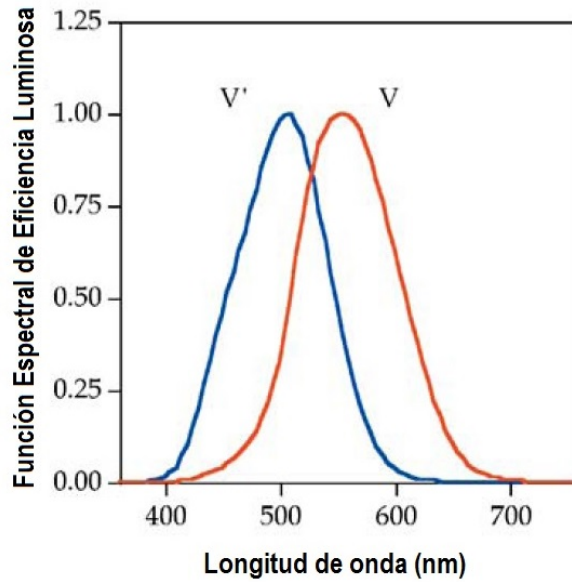


Figura 2: Las funciones espectrales de eficiencia luminosa de la CIE, para la visión escotópica, $V'_{(\lambda)}$, y para la visión fotópica, $V_{(\lambda)}$ [3]

1.2.1. Visión Fotópica, Escotópica y Mesópica

La sensación producida en el ojo humano por una radiación monocromática depende de ciertos factores, donde el factor que más importa es la longitud de onda. A partir de esto se puede definir la eficiencia luminosa para cada longitud de onda (eficiencia luminosa espectral).

“La eficiencia luminosa espectral (de radiación monocromática de longitud de onda λ) es la relación entre el flujo radiante en la longitud de onda λ_m y la longitud de onda λ , tal que ambas radiaciones produzcan la misma sensación luminosa en condiciones fotométricas indicadas y λ_m se elige de manera que el valor máximo de esta relación es igual a 1” [8].

La CIE ha adoptado tres funciones particulares de eficiencia luminosa espectral. Las primeras dos funciones son $V(\lambda)$ para la visión fotópica y $V'(\lambda)$ para la visión escotópica (figura 2). En estos dos estados de visión, la visión humana se encuentra en un estado estable [9]. La tercera función es $V_{mes}(\lambda)$ para la visión mesópica, en este estado la visión humana se encuentra en un estado no estable [9].

El proceso de adaptación del sistema visual tiene tres diferentes estados:

- Visión fotópica, este comportamiento se da cuando el sistema visual percibe altos niveles de luminancia, mayores a 3 cd/m^2 [10], en este estado del sistema de visión,

los conos son los fotoreceptores dominantes. El color es percibido y el detalle fino se puede resolver en la fóvea [6]. Los valores de la función $V(\lambda)$ inician en 360 y finaliza en 830 nm con un máximo unitario en la longitud de 555 nm [8]. Los valores definitivos de la función $V(\lambda)$ fueron aceptados en 1970 por la CIE y en 1972 por el Comité Internacional de Pesos y Medidas (usualmente conocido como CIPM por sus siglas en francés) [8]

- Visión escotópica, este comportamiento del sistema visual percibe bajos niveles de iluminación, aproximadamente niveles de luminancia menores a 0.003 cd/m^2 [10]. En este estado de visión los conos no perciben nada debido a la poca cantidad de luz; sin embargo los bastones funcionan correctamente. La función $V'(\lambda)$ inician en 380 y finaliza en 780 nm con un máximo unitario entre 506 nm y 508 nm [8]. Los valores definitivos de la función $V'(\lambda)$ fueron aceptados por la CIE en 1951 y por la CIPM en 1976 [8].
- Visión mesópica, este comportamiento de la visión humana se encuentra entre el comportamiento de la visión fotópica y la visión escotópica. En la región mesópica la sensibilidad de la visión humana no es constante, sufre cambios con la intensidad de luz. En el 2010 la CIE publicó un sistema internacional para la visión mesópica y la nueva eficiencia luminosa espectral para este caso, $V_{mes}(\lambda)$, donde se detalla que el comportamiento de $V_{mes}(\lambda)$ es una combinación lineal de $V(\lambda)$ y $V'(\lambda)$ [11].

La figura 3 muestra los rangos aproximados donde se encuentran los estados de visión

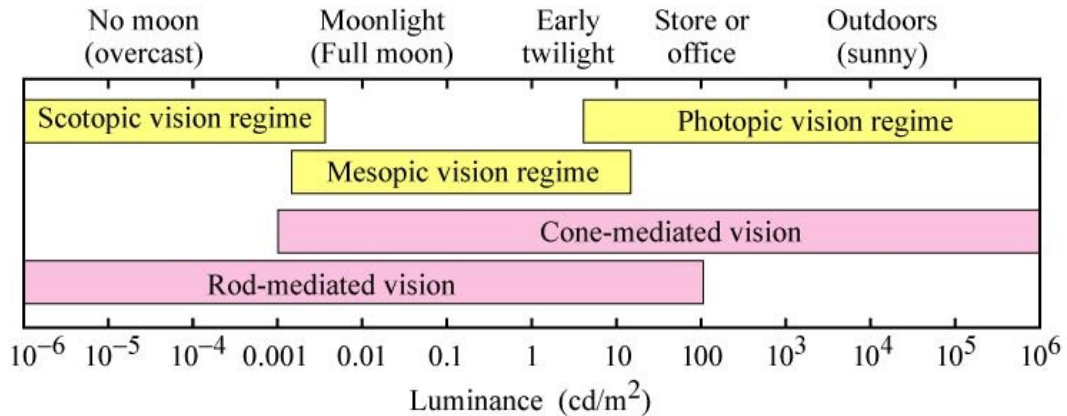


Figura 3: Rangos aproximados de visión [10].

1.3. Magnitudes fotométricas

En esta sección se explica cómo se relacionan algunas magnitudes fotométricas con sus respectivos homólogos radiométricos y se definen las más importantes magnitudes fotométricas.

1.3.1. Definición de Candela y de las magnitudes fotométricas

La unidad básica de las magnitudes fotométricas es la candela. Anteriormente, de 1948 hasta 1979, la candela fue definida por la Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM) como sigue:

”La candela es la intensidad luminosa, en dirección perpendicular, de una superficie de 1/600 000 metros cuadrados de un cuerpo negro a la temperatura de congelamiento del platino bajo una presión de 101 325 newtons por metro cuadrado” [8].

Desde 1979, y hasta la actualidad, la CGPM define candela como:

”La candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} hertz y que tiene una intensidad radiante en esa dirección de 1/683 watt por estereoradián” [8].

A pesar de que la candela es la base de las magnitudes fotométricas es más didáctico relacionar las magnitudes fotométricas con el flujo luminoso o con su unidad, el lumen (lm).

La definición de las magnitudes fotométricas son las siguientes:

Flujo luminoso (símbolo: Φ_V ; unidad: lumen, lm): Es la tasa de tiempo a la que fluye la luz por el factor de peso $V_{(\lambda)}$. Está definido por la ecuación 1:

$$\Phi_V = K_m \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda} V_{(\lambda)} d\lambda \quad (1)$$

donde $\Phi_{e,\lambda}$ es la concentración espectral del flujo radiante en W/nm y K_m es el máximo de la eficacia luminosa [12].

Intensidad luminosa (símbolo: I_V ; unidad: candela, cd) es el flujo luminoso (de una fuente puntual) emitido por unidad de ángulo solido en una dirección dada. Esta definido como

$$I_V = \frac{d\Phi_V}{d\Omega} \quad (2)$$

donde $d\Phi_V$ es el flujo luminoso que deja la fuente puntual y se propaga en un elemento de ángulo solido $d\Omega$ que contiene la dirección dada [13].

Iluminancia (símbolo: E_V ; unidad: lux, lx; lumen por metro cuadrado, $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$) es la densidad de flujo luminoso incidente sobre un punto dado en una superficie o un plano [12]. Es definido como

$$E_V = \frac{d\Phi_V}{dA} \quad (3)$$

donde $d\Phi_V$ es el flujo luminoso incidente sobre un elemento de área dA de la superficie que contiene el punto [13]. La tabla 2 muestra los valores típicos de iluminancia en diferentes ambientes.

Tabla 2: Iluminancia típica en diferentes ambientes [10].

Condición de iluminación	Iluminancia (lx)
Luna llena	1
Luz en la calle	10
Luz en el hogar	30-300
Luz en el escritorio de oficina	100-1 000
Luz en el quirófano	10 000
Luz solar directa	100 000

Luminancia (símbolo: L_V ; unidad: cd/m^2) 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 [12]. Se define como

$$L_V = \frac{d^2\Phi_V}{d\Omega dA \cos\theta} \quad (4)$$

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 [13].

Emitancia (símbolo: M_V ; unidad: lm/m^2) es el razón entre flujo luminoso que emite una fuente de luz y su área. Se define como

$$M_V = \frac{d\Phi_V}{dA} \quad (5)$$

1.3.2. Relación entre las magnitudes radiométricas y fotométricas

Las magnitudes fotométricas más importantes, su relación con el lumen, su homólogo en radiometría y sus respectivas unidades se muestran en la tabla 3:

Tabla 3: Magnitudes y unidades usadas en fotometría y radiometría [13].

Cantidad Radiométrica	Unidad	Cantidad fotométrica	Unidad	Relación con el lumen
Flujo radiante	W (watt)	Flujo luminoso	lumen (lm)	
Intensidad radiante	$W.sr^{-1}$	Intensidad luminosa	candela (cd)	$lm.sr^{-1}$
radiancia	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	luminancia	$cd.m^{-2}$	$lm.m^{-2}$
irradiancia	$W.m^{-2}$	Iluminancia	$lm.m^{-2}, lux(lx)$	$lm.sr^{-1}.m^{-2}$
Emitancia radiante	$W.m^{-2}$	Emitancia luminosa	$lm.m^{-2}$	
Temperatura radiante	kelvin (K)	Color de temperatura	K	

Existen 2 formas de relacionar una magnitud fotométrica (X_V) con su homólogo radiométrico (X_e) que dependen de que función eficiencia luminosa espectral se use. Para la visión fotópica se usa la ecuación 6 [8, 12].

$$X_V = K_m \int_{360}^{830} X_{e,\lambda} V_{(\lambda)} d\lambda \quad (6)$$

donde:

- $K_m = 683,002 lm.W^{-1} \approx 683 lm.W^{-1}$ y es llamada máximo de la eficacia luminosa espectral de la visión fotópica.
- $V_{(\lambda)}$ es la eficacia luminosa espectral para la visión fotópica
- $X_{e,\lambda}$ es la concentración espectral de la magnitud radiométrica X_e .

Para la visión escotópica se usa la ecuación 7 [8, 12]:

$$X'_V = K'_m \int_{380}^{780} X_{e,\lambda} V'_{(\lambda)} d\lambda \quad (7)$$

donde:

- $K'_m = 1700,06 lm.W^{-1} \approx 1700 lm.W^{-1}$ y es llamada máximo de la eficacia luminosa espectral de la visión escotópica.
- $V'_{(\lambda)}$ es la eficacia luminosa espectral para la visión escotópica.
- $X_{e,\lambda}$ es la concentración espectral de la magnitud radiométrica X_e .

2. Colorimetría

La ciencia que intenta asociar sin ambigüedad una sensación de color, como experiencia de un humano promedio, con valores numéricos es llamada colorimetría [1]. Para poder representar estos valores numéricos existen diferentes espacios de color.

2.1. Observador Estándar de Color CIE

La CIE actualmente cuenta con dos observadores estándar¹, CIE 1931 XYZ de 2° y CIE 1964 XYZ de 10°. El observador estándar de color CIE 1931 XYZ es llamado observador de 2° pues su aplicación va desde 1° hasta 4° de ángulo visual, mientras que el observador CIE 1964 XYZ tiene una aplicación para ángulos de visión mayores a 4° y es llamado observador estándar de 10° [14].

Cada observador estándar está basado en un conjunto de funciones denominados *color matching functions* (CMF). Las CMFs de cada observador estándar se denotan $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, para el observador estándar de color CIE 1931 XYZ, y $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ para el observador estándar de color CIE 1964 XYZ. Ambos CMFs se pueden apreciar en la figura 4.

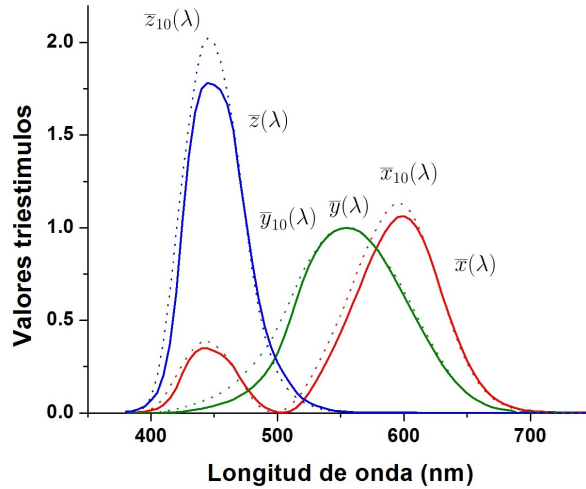


Figura 4: CMFs de los observadores CIE 1931 XYZ (línea sólida) y CIE 1964 XYZ (línea punteada).

Para poder diferenciar el observador CIE 1931 XYZ del observador CIE 1964 XYZ, a este último se le agrega el sub índice 10 a todos sus elementos [7].

¹El observador CIE RGB fue el antecesor del observador CIE 1931 XYZ de 2°

Usualmente los CMFs sirven para hallar los valores tri-estímulos. Los valores tri-estímulos CIE de un estímulo de color se obtienen multiplicando, en cada longitud de onda, el valor de la función del estímulo de color $\Phi_\lambda(\lambda)$ con cada CMF y luego integrar cada producto sobre todo el rango visible. La integración puede ser llevada a una sumatoria con intervalos de longitud de onda determinados, $\Delta\lambda$, igual a 1 nm (ecuación 8).

$$\begin{aligned} X &= k \sum_{\lambda} \Phi_{\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda & X_{10} &= k_{10} \sum_{\lambda} \Phi_{\lambda}(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= k \sum_{\lambda} \Phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda & Y_{10} &= k_{10} \sum_{\lambda} \Phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z &= k \sum_{\lambda} \Phi_{\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda & Z_{10} &= k_{10} \sum_{\lambda} \Phi_{\lambda}(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (8)$$

donde $\Phi_\lambda(\lambda)$ es la distribución espectral del estímulo de color; X, Y, Z son los valores tri-estímulos, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ son los CMF del observador estándar de color y "k" (o k_{10} cuando se habla del observador estándar CIE 1964) es una constante de normalización. Los cálculos presentados son similares cuando se trabaja con el observador CIE 1964 XYZ.

El valor de "k" dependerá si se trabaja con una fuente de luz o una fuente secundaria de luz (objetos reflejados o transmitidos).

Fuente de luz La constante "k" (o k_{10}) generalmente es elegida a conveniencia [7], sin embargo si se desea trabajar con colorimetría absoluta toma el valor de 683 lm/W. Cuando se desea trabajar con una colorimetría relativa, "k" (o k_{10}) es definido como (ecuación 9) [3].

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} \Phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda} \quad k_{10} = \frac{100}{\sum_{\lambda} \Phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) \Delta\lambda} \quad (9)$$

Fuente secundaria de luz (objetos transmitidos o reflejados) Dependiendo del caso la función de estímulo de color, $\Phi(\lambda)$ es reemplazada por la ecuación 10:

$$\Phi_{(\lambda)} = R_{\lambda} S_{\lambda} \quad o \quad \Phi_{(\lambda)} = \tau_{\lambda} S_{\lambda} \quad (10)$$

donde:

- $R(\lambda)$ es la reflectancia espectral del color del objeto.
- $\tau(\lambda)$ es la transmitancia espectral del color del objeto.
- $S(\lambda)$ es la distribución espectral de la fuente de luz utilizada.

El valor de las constantes k y k_{10} son elegidas de tal manera que Y sea igual a 100 para objetos que posean $R(\lambda) = 1$ o $\tau(\lambda) = 1$ (ecuación 11):

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda} \quad k_{10} = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) \Delta\lambda} \quad (11)$$

2.1.1. Coordenadas de cromaticidad

A partir de los valores tri-estímulos se halla las coordenadas de cromaticidad (x,y,z) como se muestra en la ecuación 12

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z} \end{aligned} \quad (12)$$

2.1.2. Diagrama de cromaticidad CIE 1931

A partir de la ecuación 12 se deduce que $x + y + z = 1$ por lo que se puede trabajar solo con 2 coordenadas de cromaticidad. Estas coordenadas son x y y . Estas 2 coordenadas son mostradas en el diagrama de cromaticidad que se muestra en la figura 5. Las coordenadas de cromaticidad para el observador CIE de 10° (x_{10}, y_{10}, z_{10}) son halladas de forma similar partiendo de los tri-estímulos del mismo observador (X_{10}, Y_{10}, Z_{10}).

El diagrama de cromaticidad CIE 1931 (x, y) es usado de manera muy practica en colorimetría sin embargo cuenta con la dificultad de la uniformidad. Mac Adams demostró en 1942 que el diagrama de cromaticidad CIE 1931 (x, y) no es uniforme hallando elipses dentro de las cuales no puede hacerse alguna discriminación de color [10, 14]. La figura 5 muestra las elipses de Mac Adams (1942) en el diagrama de cromaticidad CIE 1931 (x, y).

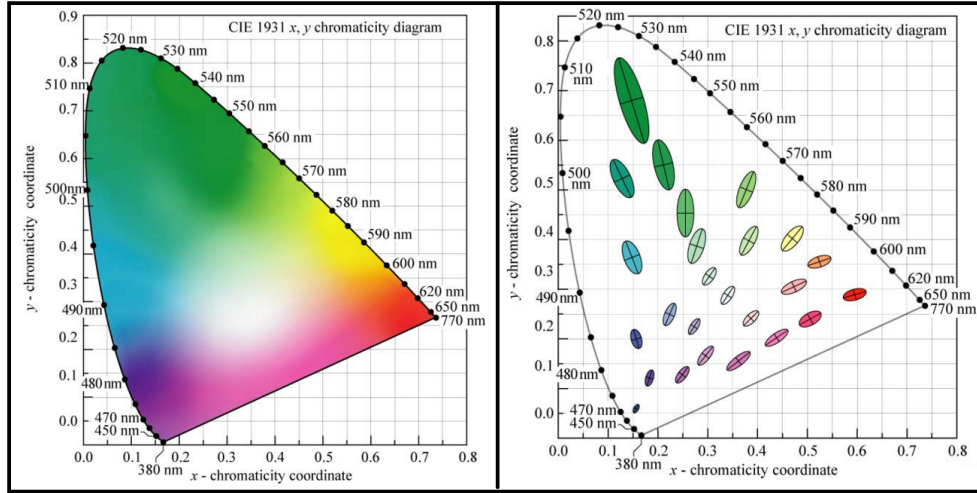


Figura 5: Izquierda: Diagramas de cromaticidad CIE 1931 de 2°. Derecha: Elipses de Mac Adams con una amplificación de 10 veces en el diagrama de cromaticidad CIE 1931 de 2° [10].

2.1.3. Diagrama uniforme de cromaticidad, diagrama CIE 1976 UCS

El diagrama de cromaticidad uniforme CIE 1976 (UCS) (figura 6) fue la solución más cercana para resolver el problema de la uniformidad donde se buscaba que distancias iguales en este espacio represente iguales diferencias perceptibles entre los estímulos de color.

El diagrama de cromaticidad uniforme CIE 1976 (UCS) es producido por:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad (13)$$

como abscisa y

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (14)$$

como ordenada donde X, Y, Z son los valores tri-estímulos. La tercera coordenada es igual a $(1-u'-v')$.

Este diagrama también puede producirse a partir de:

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (15)$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (16)$$

donde x, y son las coordenadas de cromaticidad del espacio CIE 1931.

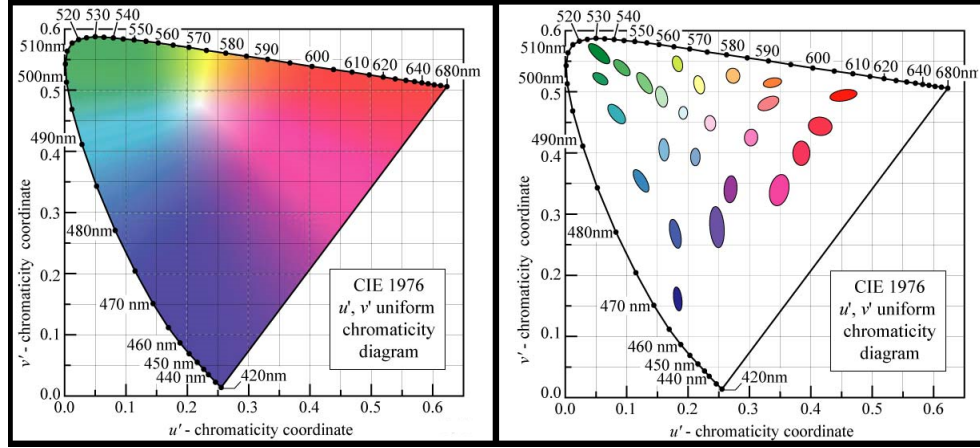


Figura 6: Izquierda: Diagrama de cromaticidad CIE 1976 (u' , v'). Derecha: Elipses de Mac Adams transformadas al diagrama de cromaticidad CIE 1976 (u' , v'). Las elipses son 10 veces más grandes [10].

La figura 6 muestra las elipses de Mac Adams en el diagrama de cromaticidad uniforme CIE 1976 donde a pesar de no ser círculos que es lo que se quisiera se obtiene elipses cuyas excentricidades son menores a las que se tienen en diagrama CIE 1931 y por ende se deduce que el diagrama CIE 1976 es mucho más uniforme que el diagrama CIE 1931.

2.2. Espacios Uniformes de Color

En 1975, el comité técnico de la CIE responsable de colorimetría hizo dos recomendaciones sobre el uso de los espacios uniformes de color CIELAB y CIELUV. Ambos pueden trabajar con el observador colorimétrico estándar CIE 1931 si las muestras se ven dentro de un ángulo visual entre 1° y 4° . Para muestras vistas bajo un ángulo visual más amplio se debe utilizar la CIE 1964 observador colorimétrico estándar [14].

2.2.1. Espacio de color CIE 1976 ($L^*a^*b^*$); espacio de color CIELAB

Esta sección esta basada en las referencias [3, 7, 14]. El espacio uniforme CIELAB es representado por tres coordenadas tridimensionales ortogonales, L^* , a^* y b^* . Las coordenadas del espacio uniforme CIELAB son derivadas de los valores tri-estímulos por las ecuaciones 17, 18 y 19.

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16 \quad (17)$$

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \quad (18)$$

$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \quad (19)$$

donde

$$\begin{aligned} f(X/X_n) &= (X/X_n)^{1/3} \quad \text{si } (X/X_n) > (24/116)^3 \\ f(X/X_n) &= (841/108)(X/X_n) + 16/116 \quad \text{si } (X/X_n) \leq (24/116)^3 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} f(Y/Y_n) &= (Y/Y_n)^{1/3} \quad \text{si } (Y/Y_n) > (24/116)^3 \\ f(Y/Y_n) &= (841/108)(Y/Y_n) + 16/116 \quad \text{si } (Y/Y_n) \leq (24/116)^3 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} f(Z/Z_n) &= (Z/Z_n)^{1/3} \quad \text{si } (Z/Z_n) > (24/116)^3 \\ f(Z/Z_n) &= (841/108)(Z/Z_n) + 16/116 \quad \text{si } (Z/Z_n) \leq (24/116)^3 \end{aligned} \quad (22)$$

Donde X, Y y Z representan los valores tri-estímulos del objeto bajo análisis, y X_n , Y_n y Z_n representan los valores tri-estímulos del blanco difusor bajo la misma fuente de iluminación.

En el espacio de color CIE LAB también se puede hallar la claridad (L o L^*), tono (H) y croma o cromaticidad (C) de la siguiente manera:

- La claridad CIE 1976 ya se definió en la ecuación 17.
- El croma o cromaticidad CIE 1976 a,b (CIELAB) es

$$C^*_{ab} = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (23)$$

- El tono CIE 1976 a,b (CIELAB) es

$$H_{ab} = \arctan(b^*/a^*) \quad (24)$$

2.2.2. Espacio de color CIE 1976 ($L^*u^*v^*$); Espacio de color CIELUV

Espacio tridimensional, aproximadamente uniforme producido por las coordenadas ortogonales, L^*, u^*, v^* , cantidades definidas por las ecuaciones:

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16 \quad (25)$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad (26)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad (27)$$

donde

$$\begin{aligned} f(Y/Y_n) &= (Y/Y_n)^{1/3} \quad \text{si } (Y/Y_n) > (24/116)^3 \\ f(Y/Y_n) &= (841/108)(Y/Y_n) + 16/116 \quad \text{si } (Y/Y_n) \leq (24/116)^3 \end{aligned} \quad (28)$$

Donde Y, u', v' describen el estímulo de color considerado y Y_n, u'_n, v'_n describen el estímulo del color “blanco específico” (blanco elegido bajo una iluminante específica).

2.3. Fuentes de luz e iluminantes CIE

En la ecuación 10 se usó la distribución espectral de potencia, $S(\lambda)$, cuando se desea trabajar con reflectancia o transmitancia. La CIE recomienda usar la distribución espectral de potencia relativa de ciertas fuentes que ya han sido estandarizadas por la CIE.

2.3.1. Iluminante A

La distribución espectral de potencia relativa está definida por la ecuación:

$$S_A(\lambda) = 100 \left(\frac{560}{\lambda} \right)^5 \times \frac{\exp \frac{1,435 \times 10^7}{2848 \times 560} - 1}{\exp \frac{1,435 \times 10^7}{2848 \lambda} - 1} \quad (29)$$

Donde λ es la longitud de onda en nanómetros. La distribución espectral esta normalizado a 100 cuando la longitud de onda vale 560 nm y comienza en 300 nm hasta los 830 nm.

Los valores triestímulos y las coordenadas de cromaticidad de la iluminante estándar CIE A son [14]:

$$X=109,85; Y=100,00; Z=35,58; x=0,447 \ 58; y=0,407 \ 45$$

2.3.2. Iluminante D65

La distribución espectral de potencia relativa se denota con S_{D65} y representa la “luz de día” con una temperatura de color correlacionada aproximada a 6500 K. La iluminante estándar CIE D65 contiene valores desde 300 nm hasta 830nm.

La figura 7 muestra la iluminante A y la iluminante D65.

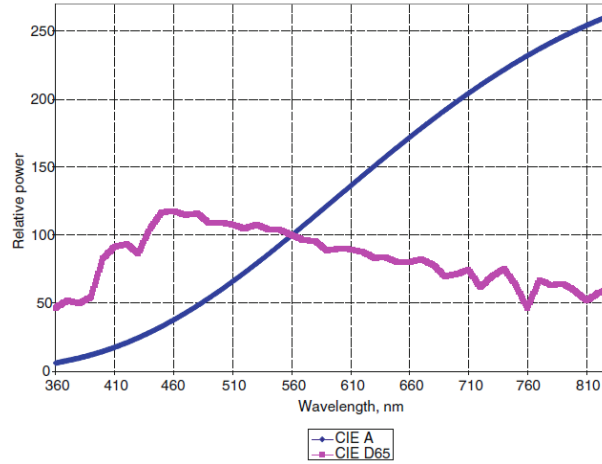


Figura 7: La linea azul representa la iluminante CIE A y la linea morada representa la iluminante CIE D65 [15].

2.3.3. Otras iluminantes D

Para el órgano visual humano, el ojo, la iluminación natural es la “luz de día” que es generada por el sol. La luz de día cambia con las fases del día por lo cual se debe seleccionar una iluminante a una respectiva fase del día.

Para los trabajos de colorimetría se recomienda usar siempre que se pueda la iluminante estándar CIE D65, sin embargo cuando no se pueda usar esta iluminante es recomendable usar otras iluminantes relacionadas a la luz de día como son la D50, D55 o D75. Los números multiplicados por 100 indican la temperatura de color correlacionada a la fase del día (T_{cp}). Si en caso no se pueda trabajar con las iluminantes antes mencionadas se puede describir otras iluminantes tipo D a partir de su T_{cp} . Primero hallaremos sus coordenadas de cromaticidad (x_D, y_D) que está definida de la siguiente manera cuando su T_{cp} se encuentra entre 4000 y 7000 K:

$$x_D = \frac{-4,6070 \times 10^9}{(T_{cp})^3} + \frac{2,9678 \times 10^6}{(T_{cp})^2} + \frac{0,099110 \times 10^3}{(T_{cp})} + 0,244063 \quad (30)$$

Cuando su T_{cp} sea mayor a 7 000 K hasta 25 000 K se usa

$$x_D = \frac{-2,0064 \times 10^9}{(T_{cp})^3} + \frac{1,9018 \times 10^6}{(T_{cp})^2} + \frac{2,24748 \times 10^3}{(T_{cp})} + 0,237040 \quad (31)$$

Donde T_{cp} es la temperatura de color correlacionada (CCT) a la fase del día. Una vez hallado el x_D se halla el correspondiente y_D con la fórmula

$$y_D = -3,000x_D^2 + 2,870x_D - 0,275 \quad (32)$$

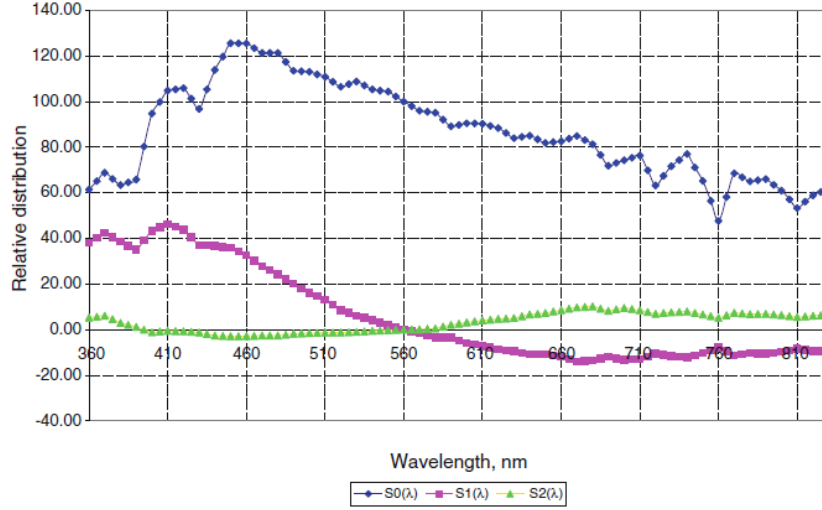


Figura 8: Funciones características para poder construir las fases del día[15].

Para determinar la distribución espectral de potencia de la iluminante se define 2 factores, M_1 y M_2 , de la siguiente manera

$$M_1 = \frac{-1,3515 - 1,7703 x_D + 5,9114 y_D}{0,0241 + 0,2562 x_D - 0,7342 y_D} \quad (33)$$

$$M_2 = \frac{0,0300 - 31,4424 x_D + 30,0717 y_D}{0,0241 + 0,2562 x_D - 0,7342 y_D} \quad (34)$$

Los valores M_1 y M_2 son aproximados a 3 decimales. La distribución espectral de potencia de la iluminante tipo D es hallada desde 300 nm hasta 830 nm, cada 10 nm por la siguiente ecuación:

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (35)$$

Donde $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$ y $S_2(\lambda)$ son vectores conocidos. Estos vectores son mostrados en la figura 8

2.4. Características relacionadas a la cromaticidad

En esta sección se detalla algunas características relacionadas a la cromaticidad.

2.4.1. Temperatura de color (T_D)

La temperatura de color de una fuente de luz es la temperatura de un cuerpo negro cuya radiación tiene la misma cromaticidad, o coordenadas de cromaticidad, como el estímulo que se otorga la fuente de luz [16]. La temperatura de color se mide en Kelvin.

2.4.2. Temperatura correlacionada de color

La temperatura correlacionada de color (CCT) es la temperatura de un cuerpo negro con la cromaticidad más próxima a la cromaticidad asociada a la distribución espectral de la fuente de luz. Las coordenadas de cromaticidad de ambas fuentes, tanto como del cuerpo negro como de la fuente de luz, deben ser evaluadas sobre un diagrama donde sus respectivas coordenadas de cromaticidad sean de la forma $u', 2/3 v'$. La temperatura de color correlacionada se mide en Kelvin [16, 17, 18].

Para poder hallar la temperatura de color correlacionada se suele usar el método de Robertson [17, 19, 20] por ser muy preciso. Aparte del procedimiento de Robertson existen aproximaciones, como el propuesto por McCamy que propone la temperatura correlacionada de color es hallada a partir de las coordenadas de cromaticidad x y y y por el método mostrado en la referencia [17]:

$$CCT = -437n^3 + 3601n^2 - 6861n + 5524,31 \quad (36)$$

donde

$$n = (x - 0,3320)/(y - 0,1858) \quad (37)$$

2.4.3. Longitud de onda dominante y pureza

Existen dos cantidades que también son usadas para caracterizar al LED debido al color de la luz que emiten, estas dos características son la longitud de onda dominante y la pureza, estas dos características se obtienen a partir de las coordenadas de cromaticidad. Estas características no son utilizadas para caracterizar LED blancos. La longitud de onda dominante, λ_d , es definido como la longitud de onda de un estímulo monocromático que, cuando es mezclado en adecuadas proporciones con el estímulo acromático iguala al estímulo de color considerado [21]. El estímulo monocromático (llamado iluminante E) es aquel estímulo cuyas coordenadas de cromaticidad son $x_E = 0,3333$, $y_E = 0,3333$. En la figura 9 se observa la longitud de onda dominante, el estímulo de color indicado por la letra C y el estímulo acromático indicado por la letra N.

La pureza viene dado por la relación de los segmentos $\overline{NC}$ y $\overline{ND}$. La pureza de la luz emitida por el LED es 1 si las coordenadas de cromaticidad se encuentran en el borde del Gamut.

2.4.4. Rendimiento de color y el índice de rendimiento de color general

La CIE define rendimiento de color (R) como la influencia o el efecto que tiene una iluminante sobre el color aparente de un objeto, de manera consciente o subconsciente-

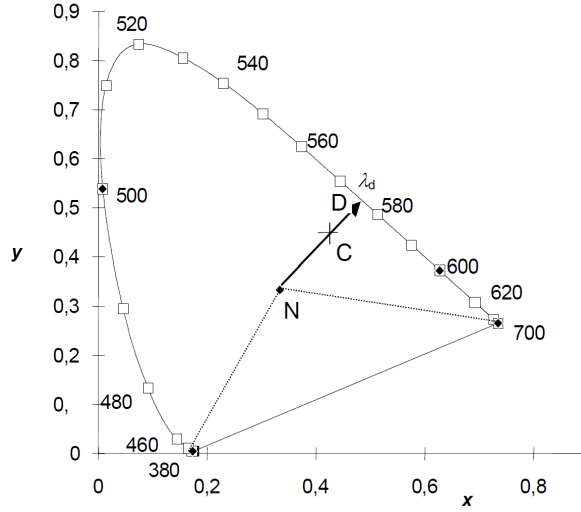


Figura 9: Diagrama CIE 1931 en el que se muestra distancias e intersecciones para los cálculos de pureza y longitud de onda dominante [21].

mente, comparado con el color aparente del objeto si está bajo una iluminante estándar [18].

El hecho de trabajar con una iluminante de referencia puede traer confusiones pues como sabernos existen diferentes iluminantes de referencia.

El procedimiento para hallar el índice de rendimiento de color se basa en calcular la diferencia de color (d_i) de las 8 muestras Munsell, en el espacio uniforme de color CIE 1964 $W^*U^*V^*$ que actualmente es obsoleto, cuando es iluminada por la iluminante a analizar y una iluminante estándar a la misma CCT.

A partir de las 8 muestras que son analizadas se determina el índice de rendimiento de color (CRI o RA), que está dado por:

$$R_a = 100 - 4,6 \left(\frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7 + d_8}{8} \right) \quad (38)$$

Donde cada sub índice de d_i representa una de 8 muestras de la cartilla Munsell.

2.5. Normas y recomendaciones para la medida de reflectancia de materiales

Para determinar las características colorimétricas no solo hay que considerar un observador estándar y una iluminante adecuada, también se tiene que considerar una geometría adecuada y una referencia estándar. Esta sección se enfoca en la geometría de medición pues las características colorimétricas pueden cambiar con el ángulo de incidencia sobre la muestra que se ha de analizar.

2.5.1. Geometría de medición

El proceso por el cual se obtiene la información de reflectancia/transmitancia de distintos materiales inicia con la incidencia de luz sobre una muestra y se colecta la radiación reflejada o transmitida.

En la medición colorimétrica la muestra en la cual va a incidir el haz se encuentra en un plano de referencia. Los instrumentos que analizan las características colorimétricas generalmente tienen una entrada, apertura de muestra, en la cual la muestra puede ser acoplada al plano de referencia.

La geometría de medición se puede dividir en 2 grupos dependiendo si la luz que se utilice es direccional o difusa. Adicionalmente la geometría direccional se divide en 4 sub grupos: 45° direccional y anular, 0° y 8° . En este trabajo solo se detalla la geometría direccional de 8° .

La CIE ha descrito diferentes geometrías para medir la reflectancia de superficies en su reporte técnico “Colorimetría” [7]. En el presente trabajo se presentan algunas de ellas en la figura 10 y se pone más énfasis a la geometría de $8^\circ:d$. En los casos de las geometrías $8^\circ:d$ y $d:8^\circ$ se pueden medir la reflectancia excluyendo la componente especular usando una trampa óptica de color negro que absorbe la radiación incidente sobre él. Cuando se use este caso se coloca la letra “e” debido a la exclusión del componente especular; este procedimiento se suele llamar SPEX por las palabras en inglés “Specular Excluded”. En el caso de que se desee incluir a la componente especular, es decir, medir la reflectancia total en la cual la trampa óptica no es utilizada y queda cubierta de un blanco altamente reflejante al igual que las paredes internas de la esfera. Cuando se usa esta geometría se suele añadir la letra “i” debido a la inclusión del componente especular; este procedimiento se suele llamar SPIN por las palabras en inglés “Specular Included” [3, 14, 17, 16].

Para obtener un resultado adecuado usando la esfera integradora debe haber un obstáculo o pantalla en una posición que dependa de la geometría. Para la geometría $8^\circ:d$ la pantalla debe bloquear la radiación que pasaría directamente de la muestra a un punto en el cual la pared interna de la esfera y la prolongación de la entrada del detector se interceptan. Para la geometría $d:8^\circ$ la pantalla debe bloquear la radiación que pasaría directamente del punto en el cual la pared interna de la esfera y la prolongación de la entrada de luz se interceptan a hacia la muestra [16].

En la geometría $d:8^\circ$ la luz no incide directamente sobre la muestra, incide sobre la superficie de la esfera y luego es reflejada de forma difusa hasta que llega a la muestra en todas direcciones. El detector se encuentra a 8° de la normal de la muestra (figura 10).

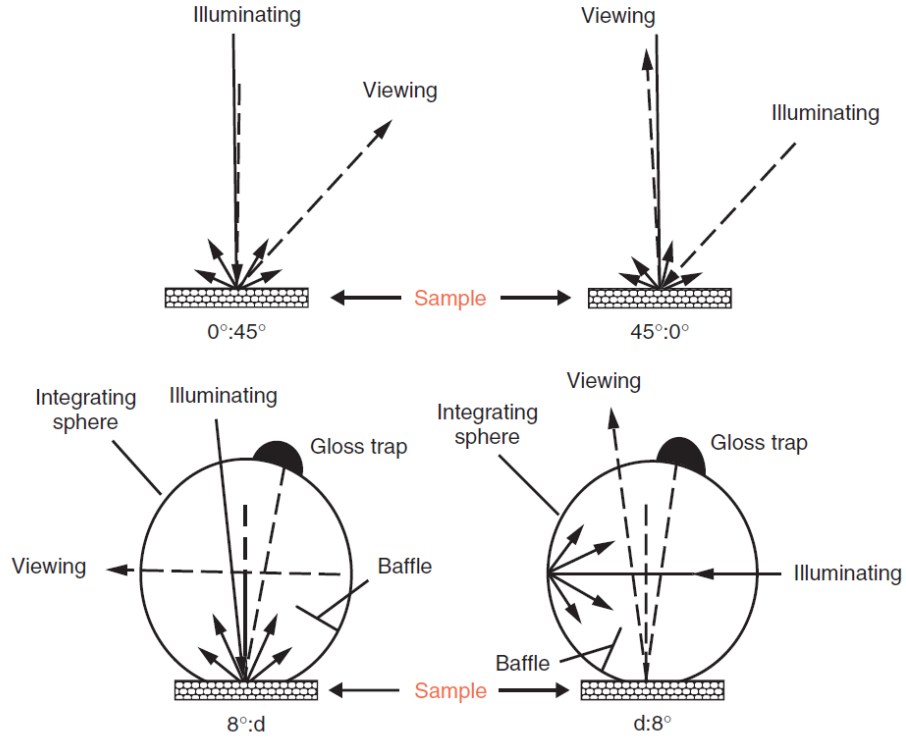


Figura 10: Diagramas esquemáticos de 4 geometrías recomendadas por la CIE para la iluminación y medida de reflexión [16].

En la geometría $8^\circ:d$ la luz incide directamente sobre la muestra en un ángulo de 8° respecto a la normal de la muestra, la ubicación del detector forma 45° con la normal de la muestra (figura 10).

3. Métodos de medición del flujo luminoso

Una de las características más importantes en la evaluación fotométrica de fuentes luminosas es el flujo luminoso total. En ciertos casos, nosotros también estamos interesados en el flujo parcial emitido en un ángulo sólido determinado (para una fuente puntual), por lo que ignoramos el flujo irradiado en direcciones no deseadas.

3.1. Método del goniofotómetro

Un goniofotómetro es un dispositivo que soporta, mecánicamente, una fuente de luz (lámpara o luminaria) y un cabezal de fotómetro² de tal manera que recolecta información de la iluminancia en direcciones específicas [22].

Los tipos de goniofotómetros se pueden dividir en 3 [22]:

- Un goniofotómetro en el cual la fuente de luz rota alrededor de dos ejes mutuamente perpendiculares que se cortan en el centro fotométrico mientras que el cabezal de fotómetro se mantiene fijo. En este tipo de goniofotómetro se tiene más interés en la distribución espacial de la intensidad luminosa que en obtener el flujo luminoso pues la posición de funcionamiento cambia constantemente, adicionalmente la estructura de mecanismo que hace rotar la lámpara puede causar sombras indeseadas que generan error.
- Un goniofotómetro en el cual la fuente de luz rota en un solo eje, mientras que el cabezal de fotómetro gira en otro eje que es perpendicular al primero y ambos se cortan en el centro fotométrico. Este tipo de goniofotómetro trae errores similares al primer tipo.
- Un goniofotómetro en el cual la fuente de luz se mantiene en una posición fija mientras que el cabezal de fotómetro rota alrededor de 2 ejes mutuamente perpendiculares que se cortan en el centro fotométrico.

Para obtener una correcta caracterización fotométrica de la fuente de luz se debe tener una distancia considerable entre el sensor de iluminación respecto a la dimensión de la fuente de luz [23, 24]. Según la IESNA [6] recomienda una distancia mayor a 5 veces la longitud máxima de la fuente de luz y la CIE [24] recomienda una distancia mayor a 15 veces.

Para entender el funcionamiento del goniofotómetro consideremos una esfera imaginaria, que encierra a una fuente de luz en su centro (figura 11), cuya superficie está formada por puntos en los cuales el sensor de iluminación ha tomado datos.

²una pieza mecánica en la cual se coloca el sensor de iluminación y que usualmente tiene diafragmas para evitar que luz no deseada llegue al sensor de luz.

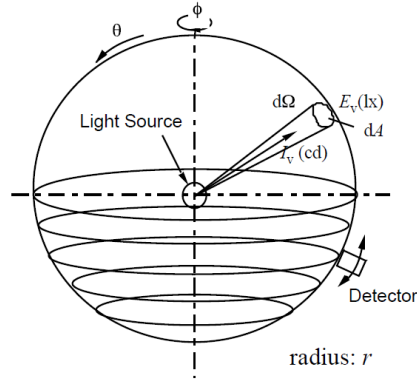


Figura 11: Superficie esférica escaneada por un goniofotómetro [25].

Los ángulos θ y ϕ como ángulo polar y azimutal respectivamente en el sistema de coordenadas esféricas y partiendo de la ecuación 2 que relaciona el flujo luminoso con la intensidad luminosa tenemos:

$$\Phi_V = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} I_V(\theta, \varphi) \sin\theta d\varphi d\theta \quad (39)$$

Ahora usando la ley del inverso cuadrado $E_V(\theta, \varphi) = I_V(\theta, \varphi)/r^2$ y la ecuación anterior obtenemos:

$$\Phi_V = r^2 \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} E_V(\theta, \varphi) \sin\theta d\varphi d\theta \quad (40)$$

Los requisitos que debe cumplir cualquier goniofotómetro son [22]:

- El área del sensor de iluminación debe ser iluminado en su totalidad por la luz que proviene de la fuente de luz.
- La fuente de luz debe estar localizada exactamente en el centro fotométrico para que la distancia entre el cabezal de fotómetro y la fuente de luz no cambie.
- El goniofotómetro debe trabajar en un cuarto oscuro para que el sensor mida solamente la luz de la fuente de luz y no de alguna luz reflejada en las paredes.

3.1.1. Distribución de la intensidad luminosa

Aparte de poder medir el flujo luminoso total o parcial se puede obtener la distribución espacial de la intensidad luminosa o de la iluminancia, generalmente llamado curva fotométrica. Esta característica de la lámpara o luminaria es fundamental cuando se desea obtener un ambiente con ciertos niveles de iluminación y de la manera más eficiente. En los programas de simulación abocados a iluminación, como Dialux, es necesaria la curva fotométrica de una luminaria para realizar los cálculos respectivos. A

partir de la curva fotométrica se podrá obtener las curvas isolux (curvas en la cual el nivel de iluminancia es el mismo) en el plano deseado.

3.2. Método de la esfera integradora

El método de la esfera integradora es un método mucho más rápido para obtener el flujo luminoso de una fuente de luz en comparación del goniometro.

El funcionamiento de la esfera integradora se basa en el uso de una superficie lambertiana.

3.2.1. 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.

$$L_{V,0} = L_{V,\theta} = cte \quad (41)$$

A partir de la ecuación (4) y (5) se obtiene:

$$\begin{aligned} M_V &= \int_{2\pi sr} L_V \cos\theta d\Omega \\ M_V &= L_V \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \\ M_V &= L_V \pi \end{aligned} \quad (42)$$

donde L_V salió de la integral pues es una constante.

Ahora si sobre una superficie lambertiana cuya reflectancia es igual a ρ incide una iluminancia E_0 , la emitancia sería igual a $M_V = \rho E_0$. Por ende se tendría que la luminancia sería igual a

$$L_V = \frac{\rho E_0}{\pi} \quad (43)$$

y no dependería de la dirección.

3.2.2. 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.

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 consideremos una esfera integradora perfecta como muestra la figura 12, donde la iluminancia E_0 es causada exclusivamente por la fuente de luz y la iluminancia $E_1, E_2, \dots$ son causadas por la primera, segunda, ... reflexión en la superficie de la esfera. El subíndice V de la iluminancia se ha obviado.

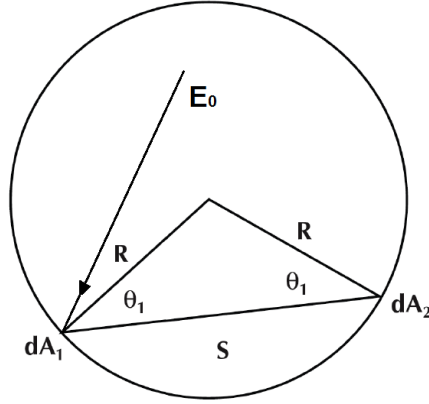


Figura 12: Geometría de una ideal esfera integradora de radio R [26].

Primero relacionamos la ecuación de la intensidad luminosa (ecuación 2) y la ecuación de la luminancia (ecuación 4) se obtiene:

$$L = \frac{1}{dA \cos \theta} \frac{d^2 \Phi}{d\Omega} = \frac{1}{dA \cos \theta} dI \quad (44)$$

reemplazando la $d\Omega = \cos \theta dA_2 / S^2$ donde en la imagen 12 se aprecia A_2 obtenemos

$$d^2 \Phi = L \cos \theta dA_1 d\Omega = L dA_1 \frac{\cos^2 \theta dA_2}{S^2} \quad (45)$$

luego la dA_2 divide a $d^2 \Phi$ y reemplazamos la luminancia “L” y la distancia “S” obtenemos:

$$dE_1 = L \frac{\cos^2 \theta}{S^2} dA_1 = \frac{E_0 \rho}{\pi} \frac{\cos^2 \theta}{4 R^2 \cos^2 \theta} dA_1 = \frac{E_0 \rho}{4 \pi R^2} dA_1 \quad (46)$$

Ahora integramos en toda la superficie de la esfera para obtener la iluminancia después de la primera reflexión:

$$E_1 = \int_{esfera} \frac{E_0 \rho}{4\pi R^2} dA_1 = \frac{\rho}{4\pi R^2} \int_{esfera} E_0 dA_1 = \frac{\rho \Phi_0}{4\pi R^2} \quad (47)$$

De manera similar para la segunda reflexión y teniendo la consideración que la iluminancia debido a la primera reflexión cae en toda la superficie de la esfera:

$$E_2 = \int_{esfera} \frac{E_1 \rho}{\pi} \frac{1}{4R^2} dA = \frac{\rho}{4\pi R^2} \int_{esfera} E_1 dA = \frac{\rho}{4\pi R^2} E_1 4\pi R^2 = \rho E_1 = \frac{\rho^2 \Phi_0}{4\pi R^2} \quad (48)$$

Entonces la iluminancia debido a la k-ésima reflexión es igual a:

$$E_K = \frac{\rho^K \Phi_0}{4\pi R^2} \quad (49)$$

Por lo que la suma de iluminancias en un punto donde no incide directamente luz de la fuente de luz es igual a:

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 + \dots = \sum_0^{\infty} \frac{\rho^K \Phi_0}{4\pi R^2} = \frac{\Phi_0}{A_{esfera}} \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (50)$$

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, la superficie de los obstáculos y otros.

A partir de esto queda demostrado 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.

3.2.3. Método de la sustitución

A pesar que se demostró en la ecuación anterior que existe una relación entre la luminancia en la superficie de la esfera y el flujo luminoso de la fuente de luz, no se puede olvidar que una esfera de integradora no es una esfera perfecta, que las puertas de salida y entrada también contribuyen a una reflexión, que se tiene obstáculos dentro de la esfera para evitar que la luz directa llegue al sensor de la esfera y si es que la lámpara esta al interior de la esfera contribuye con una absorción adicional. Por esos motivos el proceso de como la esfera integradora halla el flujo luminoso es por comparación entre 2 lámparas, la primera es la lámpara que se desea medir a la que llamaremos lámpara

de test y una lámpara cuyo flujo luminoso es conocido a la que llamaremos lámpara de referencia.

Debido a que no siempre la lámpara de test (T) y la lámpara de referencia(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 al proceso de medición, la lámpara auxiliar (A).

En las figuras 13A y 13B podemos apreciar que la lámpara de referencia y la lámpara auxiliar 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 figuras 13C y 13D donde la lámpara de test y la lámpara auxiliar están dentro de la esfera.

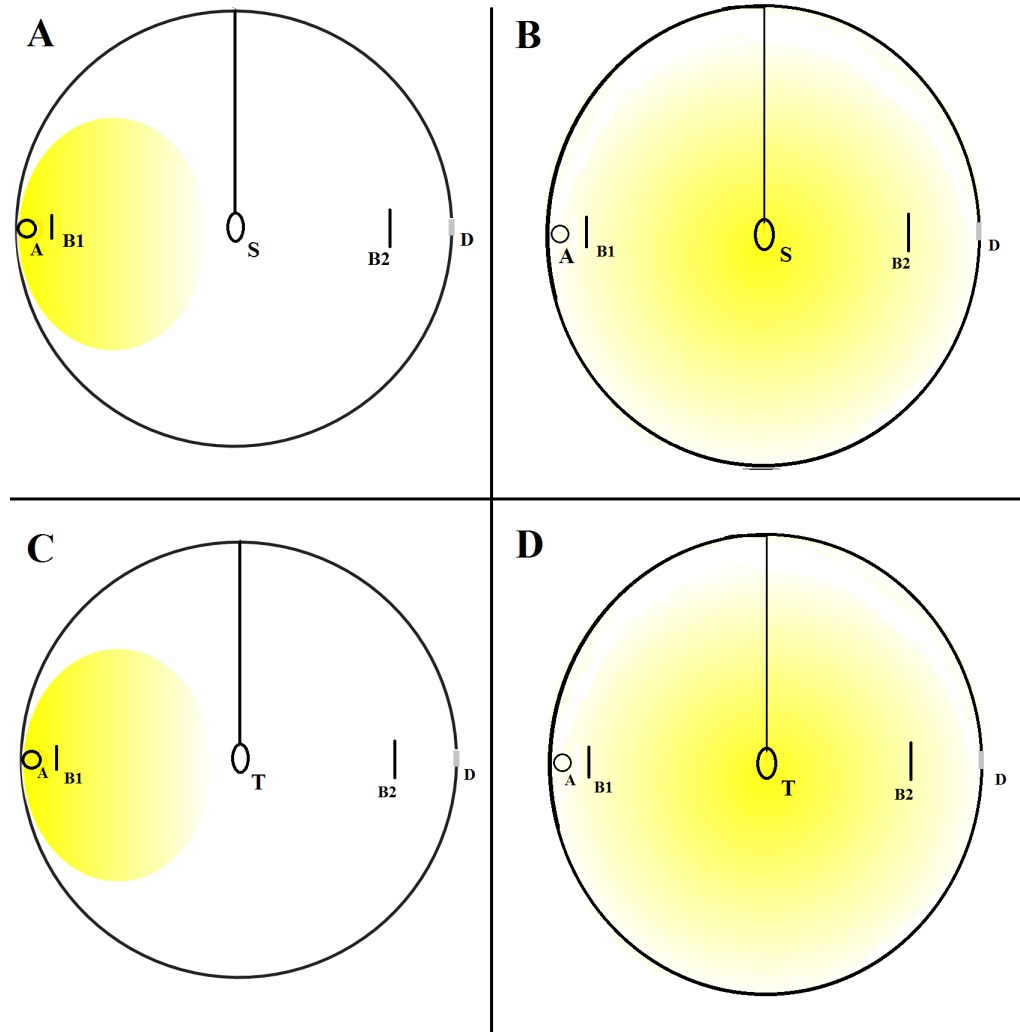


Figura 13: Pasos del método de sustitución.

Por lo cual se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$K_R = \frac{\Phi_R}{E_R} = \frac{\Phi_a}{E_{aR}} \quad (51)$$

$$K_T = \frac{\Phi_T}{E_T} = \frac{\Phi_a}{E_{aT}} \quad (52)$$

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.
- E_T es la iluminancia debido al flujo de la lámpara de test.

En las 2 ecuaciones anteriores se tiene el valor del flujo luminoso de la lámpara auxiliar. Este valor es igualado y se obtiene

$$\Phi_T = \frac{E_T}{E_{aT}} \times \frac{E_{aR}}{E_R} \times \Phi_R \quad (53)$$

con lo cual se puede obtener el flujo de una lámpara de test a partir del flujo conocido de una lámpara de referencia.

Si la esfera esta acoplada a un espectroradiómetro la ecuación (53) se puede expresar como sigue

$$\Phi_{T,\lambda} = \frac{E_{T,\lambda}}{E_{aT,\lambda}} \times \frac{E_{aR,\lambda}}{E_{R,\lambda}} \times \Phi_{R,\lambda} \quad (54)$$

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, y ambas se miden en W/nm.

El laboratorio de fotometría cuenta con 3 esferas integradoras. En la tabla 4 podemos apreciar algunas de las características.

Tabla 4: Esferas integradoras con las que el laboratorio de fotometría cuenta.

Marca-modelo	Diámetro (cm)	Lámpara auxiliar	Sensor
Labsphere-LMS-400	100	Sí	Espectroradiómetro Labsphere CDS-1100
PCE-LED	7,5	No	Sensor fotópico
RSA-FO-150	3,81 [27]	No	Espectroradiómetro Edmund

4. Lámparas LED

La Iluminación de Estado Sólido (SSL por sus siglas en inglés) [23] es la forma más prometedora de iluminación eficiente para el futuro [1]. La tecnología LED (Lighting Emitting Diode) es una de las formas de iluminación de estado sólido la cual ha sido estudiada ampliamente y actualmente tiene una gran diversidad de aplicaciones.

4.1. Introducción a la tecnología LED

En 1962, Nick Holonyak (llamado el padre de LED) inventó el LED de color rojo, el primer LED en el rango visible. En los siguientes años, otros colores de LEDs fueron desarrollados comenzando con el verde y amarillo. El LED azul fue desarrollado en el año 1993 [28] por el científico japonés Shuji Nakamura, quien fue uno de los 3 científicos que ganó el premio nobel de Física en el año 2014 por este descubrimiento [29]. Cabe resaltar que el descubrimiento del LED azul permitió crear una paleta de más de 16 millones de colores, sin embargo el mayor logro del LED azul fue permitir la obtención de luz blanca [30].

La tecnología LED blanco ha ido avanzando exponencialmente desde su producción (figura 1) y por otro lado el costo de producción ha ido disminuyendo, estos dos comportamientos nos lleva a la “Ley de Haitz” la cual predice que el flujo luminoso generado por LEDs aumentará 20 veces cada década mientras que el costo disminuirá 10 veces en el mismo periodo [23, 30].

La tecnología LED es una propuesta de eficiencia energética dirigida a la iluminación que cuenta con varios beneficios, como:

- Larga vida. Uno de los beneficios de las lámparas LED es el tiempo de vida que tienen.

- Amigable con el medio ambiente. Las lámparas LEDs son libres de químicos tóxicos, como el mercurio. Las lámparas fluorescentes contienen mercurio.
- Durable. Debido a que los LEDs son construidos con materiales rígidos resisten caídas.
- Cero emisiones UV. Las lámparas LED no emiten radiación en la región UV. Debido a su naturaleza, la radiación que emiten depende del ancho de banda del semiconductor.
- Mejor distribución espacial. Debido a su tamaño, con un conjunto de LEDs se puede obtener diferentes distribuciones de la intensidad luminosa.
- Encendido rápido. Las lámparas LED encienden inmediatamente.
- Bajo voltaje. Un bajo voltaje es suficiente para la iluminación LED por lo cual se adecua al uso de la energía fotovoltaica en las zonas rurales.

4.2. Funcionamiento físico de las lámparas LED

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 14). 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 [1, 30].

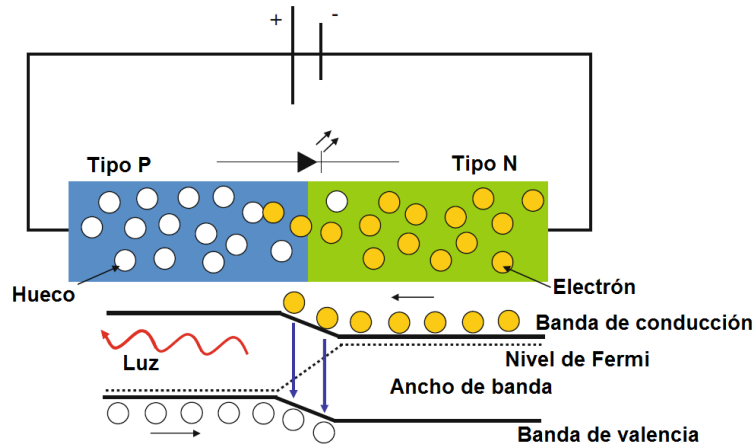


Figura 14: Representación de la producción de luz de un LED [1].

4.3. Procedimientos fotométricos de evaluación de una lámpara LED

Los LEDs están siendo utilizados de diferentes formas como en señales de tránsito, pantallas de celulares y tienen un fuerte potencial en el ámbito de la iluminación [31]. Debido a este fuerte potencial es necesaria una evaluación para conocer las características de los LED. Estas características deben incluir parámetros fotométricos como el flujo luminoso total (Φ_V) e intensidad luminosa (I_V), parámetros colorimétricos como coordenadas de cromaticidad, longitud de onda pico y longitud de onda dominante, y parámetros eléctricos como su consumo eléctrico [28]. Existen diferentes evaluaciones a las cuales deben ser sometidos las lámparas LED para determinar sus características y en algunas ocasiones estas evaluaciones dependen de la aplicación de la lámpara. Las principales normas o recomendaciones para la evaluación de lámparas LED son:

- IESNA LM-79-07: IESNA approved method for total luminous flux measurement of lamps using an integrating sphere photometer.
- IESNA LM-79-08: Electrical and photometric measurement of solid state lighting products[32].
- CIE 127:2007 2nd edition: Measurement of LEDs [21].
- IEC 62257-9-5 TS Ed.2: Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification [33].

Para el proceso de medición la temperatura ambiente del laboratorio debe ser $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y debe ser estable puesto que el comportamiento de la lámpara LED (eficacia, es-

pectro, etc) es influenciado por la temperatura.

Antes de realizar cualquier evaluación se debe tener en cuenta que las lámparas tienen un periodo de estabilización y las lámparas LED no son la excepción. El tiempo de estabilización de la lámpara, es el tiempo que emplea la lámpara para llegar a un estado estable de temperatura de funcionamiento en el cual el flujo luminoso, voltaje y corriente son prácticamente constantes. El tiempo de estabilización depende de la lámpara, usualmente es 30 minutos para lámparas pequeñas pero puede llegar a ser mayor a dos horas para lámparas de mayor potencia [32].

Si existen dudas del valor del tiempo de estabilización, se puede hallar midiendo el flujo luminoso, la corriente y el voltaje cada 15', si las medidas cambian en un 0,5 % o menos en las 3 últimas medidas se dice que ese es el tiempo de estabilización [32].

Si la lámpara es parte de un sistema pico fotovoltaico el tiempo de estabilización se puede considerar de 20' según la referencia 46.

Los métodos más conocidos para poder hallar las características fotométricas de la lámpara LED son la esfera integradora y el goniómetro.

4.3.1. Uso de la esfera integradora

El principal objetivo de la esfera integradora es hallar el flujo luminoso total o parcial, adicionalmente se puede hallar la eficacia de la lámpara con la ayuda de la potencia eléctrica.

Existen 2 tipos de esferas integradoras y difieren en el sensor que utilizan, en un caso usan un fotómetro o luxómetro y en el otro caso un espectroradiómetro. En el primer caso existe la posibilidad del desajuste en la respuesta espectral y solo se puede hallar el flujo luminoso. En el segundo caso se requiere una lámpara de referencia y se tiene la posibilidad de obtener más características fotométricas.

Las evaluaciones con la esfera integradora pueden ser en una geometría de 4π o de 2π . En ambas geometrías se halla el flujo luminoso total. La figura 15 se aprecia ambas geometrías donde usa un espectroradiómetro como detector y la lámpara de referencia es una lámpara halógena incandescente.

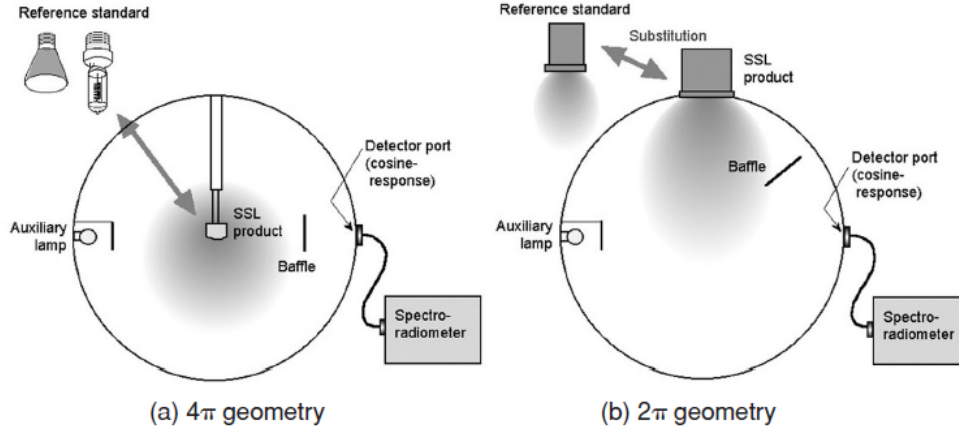


Figura 15: Geometrías 2π y 4π para el uso de una esfera integradora con un espectralradiómetro [32].

En la geometría 2π se puede usar un disco para evitar que la luz entre o salga de la esfera o no. En caso de que no se use disco, se debe trabajar en un cuarto oscuro (figura 16).

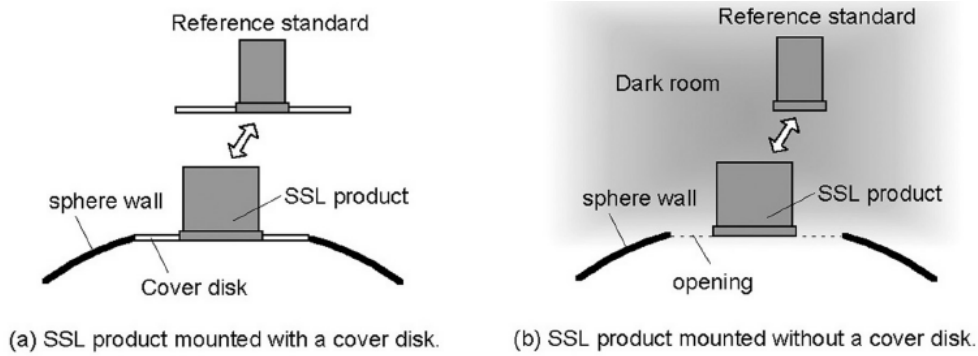


Figura 16: Condiciones de montaje de una lámpara LED en una geometría 2π [32].

4.3.2. Uso del goniofotómetro

EL principal uso del goniofotómetro es encontrar la distribución espacial de la intensidad luminosa, también se puede encontrar el flujo luminoso, FWHM (Full width at half maximum) y características fotométricas si se usa un espectrómetro.

Según el ítem 9.3.1 de la IESNA LM 79-08 los únicos goniofotómetros que son permitidos son los del tipo C que incluyen al goniofotómetro con detector móvil y el goniofotómetro con espejo móvil [32].

La resolución angular aceptable es $22,5^\circ$ en la horizontal (lateral) y 5° en la vertical (longitudinal) [32]. Una mayor resolución angular puede ser usada si existe un cambio

brusco en la intensidad luminosa.

Uno de los problemas en lo que respecta al uso de los goniofotómetros es el ángulo de cobertura que implica que el goniofotómetro es confiable hasta cierto ángulo (dead angle) donde luz emitida de la fuente de luz es bloqueada o afectada por el mecanismo del goniofotómetro, afortunadamente las lámparas de tecnología LED suelen ser muy direccionadas.

Para poder hallar la distribución espacial de intensidad luminosa la distancia entre la lámpara y el fotómetro debe ser 5 veces o más a la mayor longitud de la lámpara [6].

5. Cálculo de incertidumbres

En esta sección se explica brevemente algunos conceptos relacionados a la incertidumbre y se basó en las referencias [34, 35, 36].

5.1. Evaluación de incertidumbre

Para obtener el valor asociado a la incertidumbre de una medida existen 2 métodos. La evaluación de incertidumbre de medida tipo A que es el método de evaluar la incertidumbre de forma estadística a partir de una serie de medidas, mientras que la evaluación de incertidumbre de medida tipo B abarca todas las demás formas de obtener la incertidumbre.

5.1.1. Evaluación de incertidumbre de tipo A

La evaluación de la incertidumbre de tipo A se obtiene por “n” observaciones de una magnitud dada, bajo condiciones de reproducibilidad.

Sea una magnitud de entrada X_i que se ha medido independientemente n veces bajo condiciones de repetibilidad, por lo cual tenemos el conjunto $q_1, q_2, \dots, q_n$. Entonces tenemos que el valor promedio ($\bar{q}$) de la magnitud X_i es

$$\bar{q} = \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{n}$$

y el valor de desviación estándar experimental ($s(q)$) es:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2}$$

y la incertidumbre estándar ($u(X_i)$) de X_i se obtiene por:

$$u(X_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}}$$

5.1.2. Evaluación de incertidumbre de tipo B

La incertidumbre de una magnitud X_i de entrada que no ha sido obtenida por un conjunto de observaciones pero sí ha sido establecida por información acerca de la posible variación de la magnitud X_i se denomina incertidumbre tipo B y puede comprender:

- Resultados de mediciones anteriores.
- Experiencia sobre el comportamiento de los instrumentos utilizados.
- Especificaciones del fabricante.
- Certificados de calibración.

5.1.3. Grados de libertad

Cuando tenemos un conjunto de “n” observaciones de la magnitud X_i a partir de los cuales se obtiene el promedio; entonces solo tenemos “n-1” valores que se pueden tomar libremente ya que el último término está restringido para conservar el valor promedio obtenido anteriormente. Este número de términos independientes se le conoce como grados de libertad.

En la práctica, en una evaluación tipo A el grado de libertad (ν) es igual a “n-1” donde “n” es el tamaño del espacio muestral, mientras que en una evaluación tipo B el grado de libertad se considera infinito.

5.2. Incertidumbre combinada

Para obtener la incertidumbre combinada (u_c) dependerá de como se calcule el resultado.

- Si el resultado se obtiene por suma y/o resta ($y = a + b - c + \dots$) la incertidumbre combinada se obtiene

$$u_c(y) = \sqrt{u_{(a)}^2 + u_{(b)}^2 + u_{(c)}^2 + \dots}$$

- Si el resultado se obtiene por producto y/o cociente ($y = abc$ o $y = a/bc$) la incertidumbre combinada se obtiene

$$u_c(y)/y = \sqrt{(u_{(a)}/a)^2 + (u_{(b)}/b)^2 + (u_{(c)}/c)^2}$$

- Si el resultado se obtiene a partir de un exponente con una base constante ($y = a^n$) la incertidumbre combinada se obtiene

$$u_c(y)/y = n(u_{(a)}/a)$$

5.2.1. Incertidumbre expandida y nivel de confianza

La incertidumbre expandida se define como el producto de la incertidumbre con el factor de cobertura (K). El factor de cobertura depende del nivel de confianza en el que se desea trabajar y del número de grados de libertad. El nivel de confianza es la probabilidad o porcentaje de que la magnitud a estimar se encuentre en el intervalo de $\bar{q} - u$ y $\bar{q} + u$.

Si estamos trabajando con un incertidumbre combinada y se desea expandir la incertidumbre, primero se debe hallar el número efectivo de grados de libertad (ν_{ef}) por la fórmula de Welch-Satterthwaite (ecuación 55):

$$\frac{1}{\nu_{ef}} = \sum_{i=1}^n \frac{(u_i(y)/u_c(y))^4}{\nu_i} \quad (55)$$

Una vez hallado el número efectivo de grados de libertad se debe elegir el nivel de confianza. Con estos dos datos se obtiene el factor de cobertura de la tabla de t-Student [34] y se obtiene la incertidumbre expandida.

Proceso Experimental

6. Calibración de la esfera integradora LMS-400

La esfera LMS-400 de la marca Labsphere es una esfera de Ulbricht de 1 m de diámetro que cuenta con lámpara auxiliar (a) y el sensor que utiliza es un espectrómetro modelo CDS-1100 que tiene una resolución de 1 nm, también de la marca Labsphere. La obtención del flujo luminoso de una lámpara que se encuentra bajo ensayo (T) en la esfera LMS-400 se obtiene por comparación con una lámpara de patrón o de referencia (R) cuyo flujo luminoso es conocido. El laboratorio cuenta con 3 lámparas de referencia SCL-050-A41, SCL-1400-B65 y SCL 1400-F58 (tabla 5); todas ellas son incandescentes halógenas, cada una de estas lámparas de referencia cuentan con su concentración espectral medidas en W y una resolución de 1nm.

Tabla 5: Lámparas de referencia para la calibración de la esfera integradora LMS-400.

Lámpara	Flujo luminoso (lm)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Incertidumbre (K=2)
SCL-1400-B65	1538	28	2,679	0,679 %
SCL-1400-F58	1638	28	2,679	3,1 %
SCL-050-A41	42,37	4,2	1,050	1,0 %

La calibración de este equipo, en su conjunto, consiste en que el espectrofotómetro CDS-1100 tenga una adecuada sensibilidad de tal manera que cuando se mida el espectro de la lámpara sea lo más precisa.

6.1. Proceso de Calibración del espectrómetro CDS-1100 y la esfera LMS-400

Para la calibración de este equipo se utilizó la lámparas de referencia SCL-050-A41, sin embargo para la calibración se puede usar cualquiera de las lámparas de referencia. Antes de todo proceso, deshumedecer el ambiente hasta obtener una humedad relativa menor al 65 %, usar guantes para manipular las lámparas y verificar la temperatura en la cual fue calibrada la lámpara de referencia para trabajar a esa misma temperatura o lo más cercano a esta.

El proceso de la calibración consta de dos etapas: la primera es otorgar una adecuada sensibilidad al espectrofotómetro CDS-1100 con relación a la esfera LMS 400.

Después de otorgar una adecuada sensibilidad al espectrofotómetro CDS-1100 con relación a la esfera LMS-400 a través del software “LightMtrX” podremos medir el flujo espectral radiométrico o fotométrico de diferentes lámparas, así como otras propiedades fotométricas sin embargo no conoceremos la incertidumbre del flujo luminoso, flujo radiométrico o alguna otra propiedad. El proceso consta de los siguientes pasos:

- Activar el software, encender el espectrómetro y montar la lámpara de referencia en la esfera.
- Encender la lámpara auxiliar y esperar por un periodo de calentamiento; este periodo está entre 20 y 30 minutos, y sirve para que el flujo luminoso de la lámpara auxiliar sea estable.
- Medir la iluminancia espectral de la lámpara auxiliar con la lámpara de referencia dentro de la esfera en unidades arbitrarias.
- Apagar la lámpara auxiliar, encender la lámpara de referencia y esperar el periodo de calentamiento que también demora entre 20 y 30 minutos.
- Después del periodo de calentamiento, importar los datos del espectro de la lámpara de referencia (estos datos vienen en el CD de calibración), medido en W/nm.

Hasta este punto podemos medir flujos espectrales radiométricos y fotométricos de una lámpara de ensayo midiendo $E_{a,T}$ y E_T y usando la fórmula de la ecuación 54.

6.1.1. Cálculo de la incertidumbre de medición

Esta segunda etapa consta de poder calcular la incertidumbre del flujo luminoso de cualquier lámpara.

- Encender el equipo y montar la lámpara de referencia en la esfera.
- Encender la lámpara auxiliar y esperar por un periodo de calentamiento; este periodo está entre 20 y 30 minutos, y sirve para estabilizar el flujo luminoso.
- Medir 10 veces la iluminancia indirecta de la lámpara auxiliar medida en lm (E_{aR}). Apagar la lámpara auxiliar.
- Encender la lámpara de referencia y esperar el periodo de calentamiento. Después del periodo de calentamiento medir 10 veces iluminancia indirecta de la lámpara de referencia medida en lm (E_R). Apagar la lámpara de referencia.
- Colocar la lámpara de ensayo en el soporte de la esfera LMS-400.
- Encender la lámpara auxiliar y esperar el tiempo de calentamiento.

- Después del tiempo de calentamiento, medir 10 veces la iluminancia indirecta debido a la lámpara auxiliar (E_{aT}). Apagar la lámpara auxiliar.
- Encender la lámpara de ensayo durante un periodo de calentamiento.
- Después del periodo de calentamiento medir 10 veces la iluminancia indirecta debido a la lámpara de ensayo (E_T). Apagar la lámpara de ensayo.

6.1.2. Expresión para la incertidumbre

En la ecuación 54, el cuadrado de la incertidumbre estándar de la lámpara de ensayo es expresada como [34]:

$$\frac{u_c^2(\Phi_T)}{\Phi_T^2} = \frac{u^2(\Phi_R)}{\Phi_R^2} + \frac{u^2(E_R)}{E_R^2} + \frac{u^2(E_T)}{E_T^2} + \frac{u^2(E_{aR})}{E_{aR}^2} + \frac{u^2(E_{aT})}{E_{aT}^2} \quad (56)$$

Del certificado de calibración obtenemos el Φ_R y $u(\Phi_R)$. E_R , E_T , E_{aR} y E_{aT} son cantidades medidas y por ende los valores medios y sus respectivas incertidumbres son halladas por el método de evaluación tipo A.

En nuestro caso el sensor usado es un espectrofotómetro y no luxómetro por lo que los valores de iluminancia será reemplazados por valores a integral del espectro obtenido.

6.1.3. Programa para obtener el CCT

Para obtener el CCT y su respectiva incertidumbre se hizo un programa en Labview, al que denominaremos CCT-lab, que se basó en las ecuaciones 36 y 37 que esta formado por tres partes:

- La primera parte es la recolección de datos para lo cual es necesario que haga 5 tomas de cada componente de la ecuación 56 con excepción del flujo de la lámpara de referencia, en esta misma ecuación la iluminancia se convierte en el flujo radiante espectral y el flujo de la lámpara referencia también es el flujo radiante espectral en formato txt
- La segunda parte contiene el gráfico donde se encuentra el el espectro máximo, mínimo y promedio en W/nm vs nm de la lámpara de ensayo a partir de los datos estadísticos.
- La tercera parte tiene el CCT promedio y su incertidumbre, los valores de las coordenadas de cromaticidad del diagrama de cromaticidad de CIE 1931 y del diagrama de cromaticidad CIE 1976 UCS con sus incertidumbres.

Para los cálculos se halló en primer lugar el promedio y la desviación estándar de cada componente de la ecuación 56 exceptuando al flujo radiante de la lámpara de referencia. Para hallar la incertidumbre del CCT se halló el flujo radiante espectral máximo, mínimo y promedio. La apariencia del programa CCT-lab se muestra en la figura 54 en el anexo B.

7. Calibración de la esfera integradora PCE-LED

La esfera integradora PCE-LED, es una esfera de 7.5 cm de diámetro y que cuenta con un obstáculo cónico que evita que llegue luz directa al sensor. la geometría que se usa para la evaluación del flujo luminoso es de 2π . La esfera cuenta con un sensor propio, no usa un espectraloradiómetro, y no cuenta con lámpara auxiliar.

La calibración constó de una comparación de valores de flujo luminoso de una lámpara de trabajo y una lámpara LED de 5W de potencia cuyo código es LED5W (tabla 6). Las lámparas se muestran en la figura 17.

Tabla 6: Lámparas usadas para la calibración de la esfera integradora PCE-LED.

Lámpara	Tipo	Modelo	Calibrada contra
il 1	Halógena	International lighth 187	Labsphere SCL-050-A41
LED5W	LED	—	—



Figura 17: Lámparas usadas para la calibración de la esfera PCE-LED.

Proceso de evaluación El proceso de evaluación se realizó a una temperatura de $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de 68 %.

En la esfera de Ulbricht LMS-400 La medición de los flujos luminosos de las lámparas, IL1 y LED 5 W, se obtuvieron por comparación con la lámpara patrón calibrada por Labsphere SCL-050-A41 cuyo flujo es de 42,37 lm. La posición de cada lámpara evaluada fue con orientación al suelo.

En la esfera PCE-LED La evaluación de la lámpara LED5W fue realizada usando el adaptador de 24 mm y un factor de calibración de 1,02. La posición de la lámpara es con orientación al suelo. En la figura 18 se observa el procedimiento de evaluación de la lámpara LED5W.

La evaluación de la lámpara halógena IL1 fue realizada usando el adaptador de 10 mm y un factor de calibración³ de 1,02. La posición de la lámpara es con orientación al suelo. En la figura 19 se observa el procedimiento de evaluación de la lámpara IL1.



Figura 18: Proceso de evaluación de la lámpara LED5W usando la esfera PCE-LED.



Figura 19: Proceso de evaluación de la lámpara IL1 usando la esfera PCE-LED.

³Este valor es el recomendado por el certificado de calibración.

8. Diseño y construcción de la esfera integradora UNI-LAB

El objetivo de la esfera UNI-LAB es realizar mediciones de rutina de pequeñas lámparas con un bajo error, para no depreciar la esfera integradora LMS-400, por lo cual el costo de producción debe ser bajo comparado con el costo de la esfera integradora adquirida de alguna empresa, en este caso el costo de los materiales fue alrededor de 200 nuevos soles sin considerar el luxómetro.

El proceso de diseño y construcción la esfera UNI-LAB comienza a partir de una esfera de plástico destinada (figura 20) a ser parte de una luminaria de alumbrado público a la cual se tuvo que hacer los arreglos respectivos para lograr el objetivo de obtener una esfera integradora para realizar las mediciones de rutina.



Figura 20: La esfera de alumbrado público con aro metálico que sirve para la unión (A); La misma esfera sin anillo metálico (B).

La esfera que se adquirió es formada por 2 semiesferas, sin embargo una de las semiesferas tiene un agujero cuyo diámetro es de aproximadamente 17.5 cm en su base. Para tapar este agujero se construyó una pieza metálica, unida a esta pieza metálica va el soporte donde va la lámpara que será ensayada. En la otra semiesfera, la que no tiene agujero de 17.5 cm de diámetro, se le hizo un pequeño agujero de 19.4 mm de diámetro para que encaje el sensor del luxómetro. El luxómetro usado fue GOSSEN Mavolux 5032-B, la tabla 7 muestra sus características más importantes.

Tabla 7: Características del luxómetro Gossen Mavolux 5032-B.

	Error Promedio	Error máximo
Corrección de coseno	2 %	3 %
Sensibilidad fotópica	3 %	6 %
Medición	2,5 mediciones por segundo	

A partir de estas dimensiones se diseñó como sería el final de la esfera UNI-LAB (figura 21). Para poder bloquear la luz directa y permitir solo la luz indirecta de la fuente luminosa llegue al sensor se colocó una pantalla circular, cuyo diámetro es de 65.6 mm, que se encuentra a 70.7 mm de la entrada del sensor del luxómetro. Es decir se encuentra a aproximadamente a $2/3$ del radio de la esfera, esta distancia es una recomendación de la CIE[37]. Con estas dimensiones de la pantalla se pueden bloquear lámparas que tienen un máximo de largo de 15 cm, incluyendo el balasto.

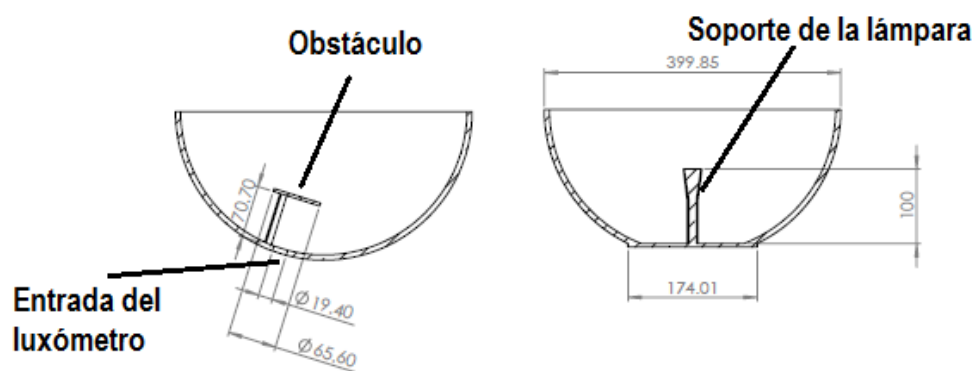


Figura 21: Plano de la esfera UNI-LAB.

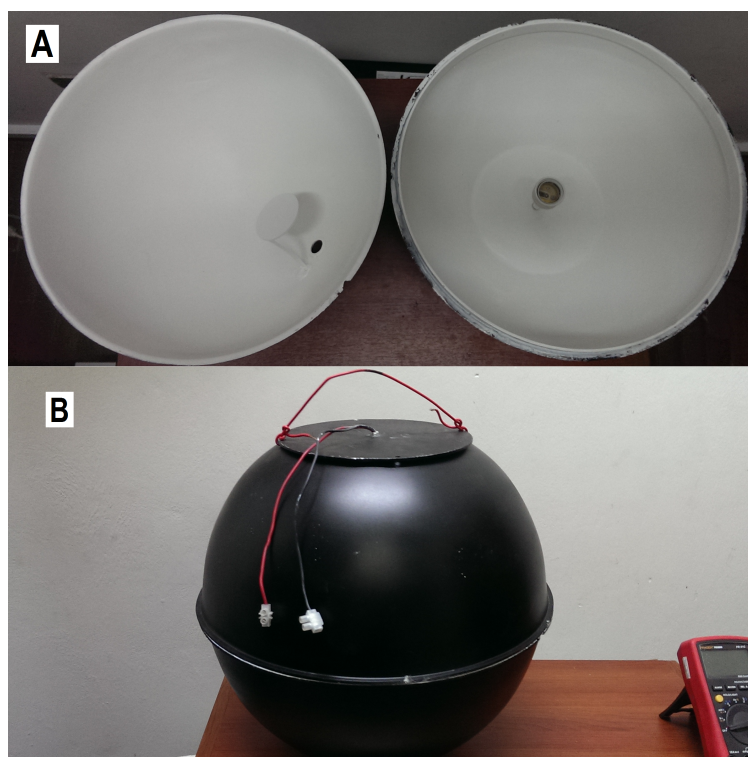


Figura 22: Vista interna (A) y externa (B) de la esfera UNI-LAB.

La figura 22 muestra como quedo la esfera UNI-LAB después de la construcción. Como la esfera UNI-LAB no es una esfera ideal, la ecuación 50 cambia ligeramente. Cuando se considera la entrada donde va colocado el luxómetro se obtiene la ecuación para una esfera

$$E_T = \frac{\Phi_i}{\pi A_{esfera}} * \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (57)$$

donde “f” es la relación entre la suma de las áreas de entrada a la esfera, y la superficie de la esfera, $f = \sum A_{ent}/A_{esfera}$ y la constante de la esfera (K_e) es:

$$K_e = \frac{\Phi_{V,E}}{E_{V,E}} \quad (58)$$

Donde $\Phi_{V,E}$ es el flujo luminoso de la lámpara que se evalúa y $E_{V,E}$ es la iluminancia que se mide debido la misma lámpara.

8.1. Elección de la pintura

La elección de la pintura fue tomada entre la pintura “Knauf” y “Rust-Oleum”, ambas pinturas en aerosol, y fueron comparadas con sulfato de bario ($BaSO_4$) y el blanco de la cartilla Munsell que tiene coordenadas CIE $L^*a^*b^* = 96,539/-0,425/1,1869$. El blanco de la cartilla Munsell fue considerado como referencia.

El esquema de evaluación de las reflectancias de las pinturas es como se muestra en la figura 23 y constó de la esfera integradora RSA-FO-150, el espectrómetro marca Edmund, una fuente de luz tipo A BPS100 BW y dos fibras ópticas. La geometría de evaluación usada en la esfera integradora fue $8^\circ:di$.

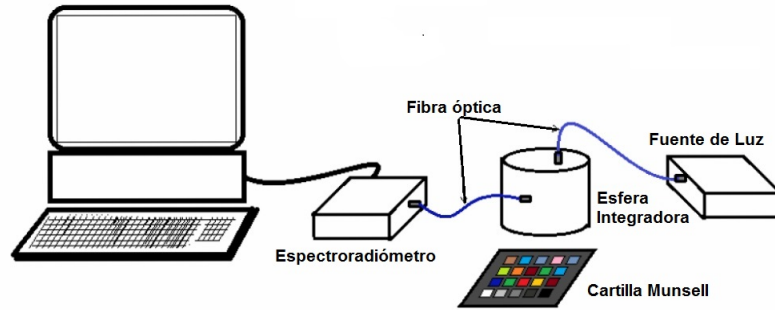


Figura 23: Esquema de las partes para la evaluación de la reflectancia.

Para hallar la reflectancia por este método se usa la siguiente fórmula:

$$R(\lambda) = R_{STD}(\lambda) \frac{S_S(\lambda) - S_{dark}(\lambda)}{S_{STD}(\lambda) - S_{dark}(\lambda)} \quad (59)$$

donde:

- $R_{STD}(\lambda)$: Son los datos de la reflectancia de la superficie estándar.
- $S_S(\lambda)$: Es la señal adquirida por el espectroradiómetro debido a la muestra.
- $S_{STD}(\lambda)$: Es la señal adquirida por el espectroradiómetro debido a la superficie estándar.
- $S_{dark}(\lambda)$: Es la señal debido a la corriente oscura.

9. Mejora del goniofotómetro de la Facultad de Ciencias-UNI

La Facultad de Ciencias cuenta con un goniofotómetro o fotogoniómetro desde que Myke Ruiz lo diseñó y construyó en el año 2007 para obtener su título de ingeniero físico [12].

En esta sección se mostrará las mejoras realizadas al diseño original.

La figura 24 muestra el goniofotómetro antes de la mejoras mecánicas realizadas.

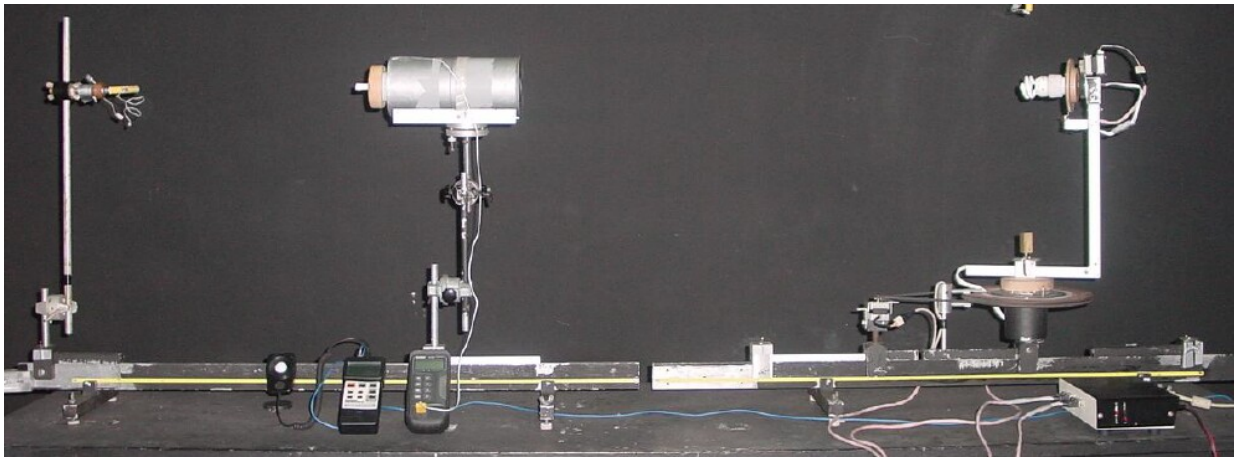


Figura 24: Goniofotómetro de la Facultad de Ciencias antes de la mejoras realizadas [12].

Los principales cambios mecánicos realizados fueron en el banco óptico y el sistema de soporte de la lámpara, pues Myke Ruiz diseñó el goniofotómetro teniendo como objetivo evaluar lámparas fluorescentes compactas (LFC). El material usado para la construcción del nuevo goniofotómetro es, en su mayor parte, aluminio. También se realizó cambios en el software de control de la rutina de movimiento de los dos motores.

Los cambios mecánicos se realizaron a partir de los siguientes modelos de goniofotómetros de fabricación industrial:

- 940 LED-1200 de la marca Gamma Scientific [38].
- LG-1.0 de la marca PSI [39].
- LSG-1800 de la marca LISUN GRUOP [40].

La construcción se llevó sustancialmente en el taller mecánico de la Facultad de Ciencias (FC), prácticamente el 100 % del material utilizado fue aluminio y consistió en obtener una mayor estabilidad en el banco óptico por lo cual se optó por usar un tubo de aluminio de perfil rectangular, el brazo mecánico, o brazos dependiendo de la opción de soporte, también fue construido de aluminio con lo cual se obtuvo ángulos perpendiculares entre las piezas. Para verificar la perpendicularidad se utilizó escuadras, para el paralelismo se utilizó punteros láser y para verificar el nivel se utilizó niveles de burbuja de aire en diferentes planos del goniofotómetro.

El par de sensores utilizados para la obtención de la posición inicial de la lámpara bajo ensayo fueron infrarrojos, emisor-receptor, cada par de sensores está ligado a uno de los dos motores de pasos.

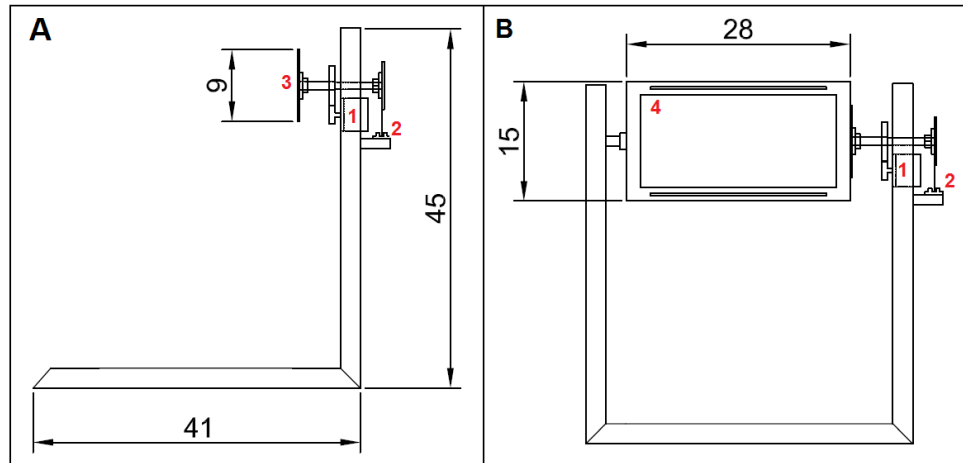


Figura 25: Esquema de la parte mecánica ligada al motor M1 para el goniofotómetro tipo C (A) y tipo B (B). (1) motor 1,(2) sensores infrarrojo, (3) soporte para la lámpara tipo C y (4) soporte para la lámpara tipo C. Las medidas están en cm.

El nuevo modelo de goniofotómetro cuenta con la capacidad de trabajar como un goniofotómetro tipo “C” o tipo “B”. La parte mecánica ligada al motor superior (figura 25), al que llamaremos motor M1 es el que se encarga del ángulo “C” o “B” y por ende

es la que decide si se trabaja como goniofotómetro tipo “C” o “B” y la parte mecánica ligada al motor inferior (figura 26), al que llamaremos motor M2 es el que se encarga del ángulo γ o β .

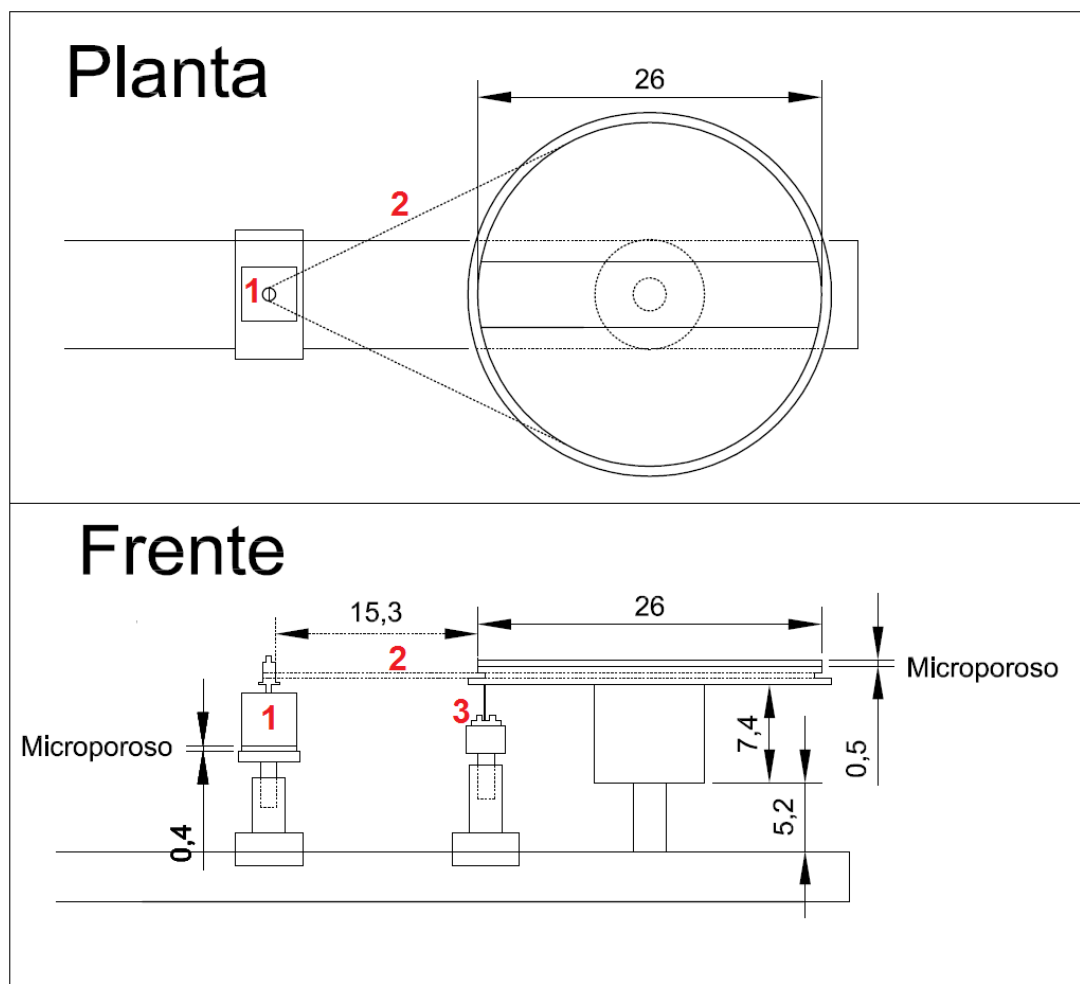


Figura 26: Esquema de la parte mecánica ligada al motor M2. (1) Motor M2, (2) faja dentada y (3) sensores infrarrojos. Las medidas están en cm.

Banco óptico El banco óptico (figura 27) tiene una longitud de 2 m y fue diseñado a partir de un tubo de aluminio de perfil rectangular de dimensiones de 8,20 cm x 3,80 cm. El banco óptico está soportado por 4 piezas sólidas de aluminio rectangulares que cuentan con tornillos graduables que sirvieron para una alineación horizontal.

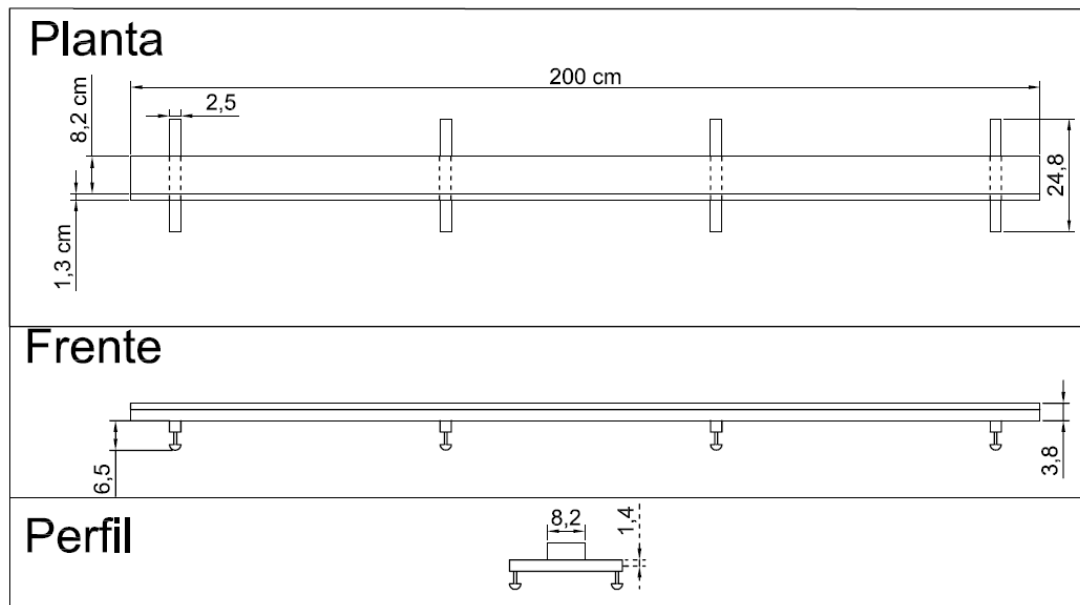


Figura 27: Plano del banco óptico en sus tres vistas.

Sobre el banco óptico se soportan el láser que sirvió de sistema de alineación, el cabezal de fotómetro y el sistema que soporta la lámpara de ensayo. la figura 28 muestra el esquema total del nuevo goniofotómetro.

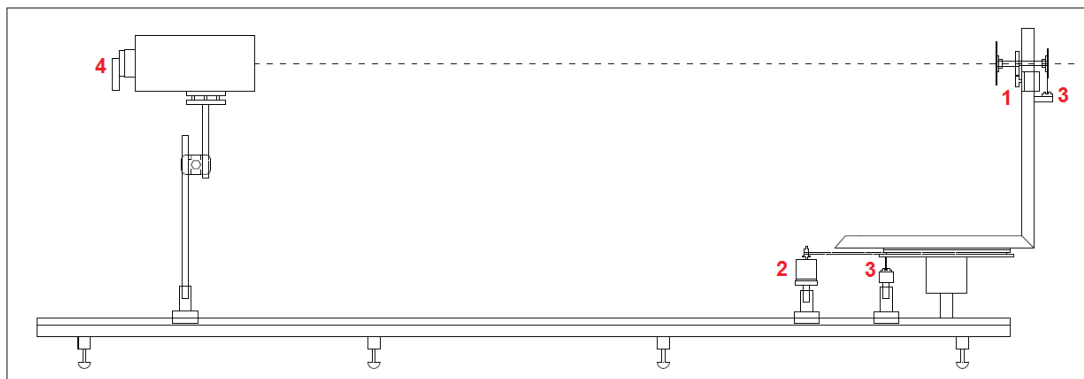


Figura 28: Esquema total de frente del goniofotómetro para la opción del goniofotómetro tipo C. (1) motor 1, (2) motor 2, (3) sensores infrarrojos y (4) sensor del luxómetro.

Finalmente la figura 29 muestra los 2 tipos de soportes con el que cuenta el nuevo goniofotómetro y la figura 30 muestra el nuevo goniofotómetro en su totalidad.



Figura 29: Los dos tipos de soportes con el que cuenta el nuevo goniofotómetro.

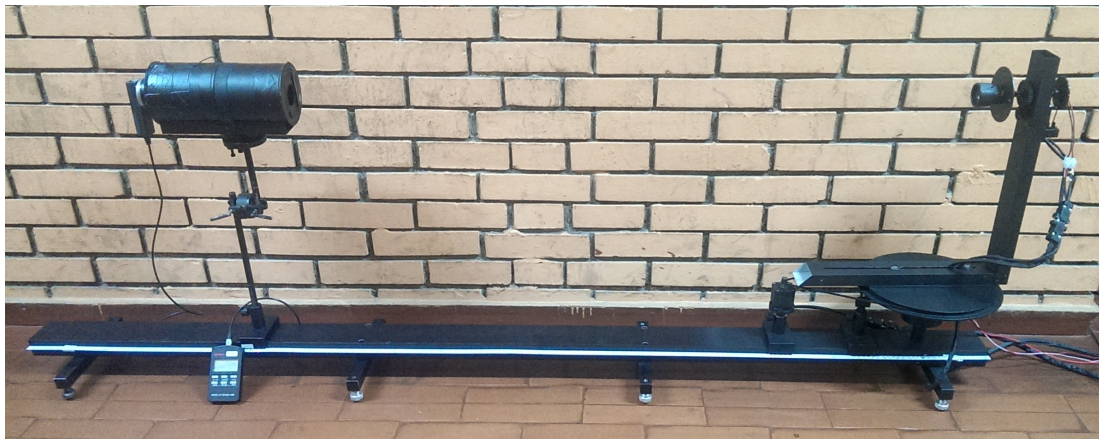


Figura 30: El goniofotómetro de la Facultad de Ciencias después de las mejoras.

9.1. Proceso de alineación

Para verificar la alineación primero debemos tener nivelado todas las partes del goniofotómetro empezando por el banco óptico.

Después se debe cumplir que el luxómetro y el centro fotométrico pasen por un eje imaginario que sea paralelo al banco óptico. Para ayudarnos con este eje imaginario se usó un puntero láser.

Finalmente debemos tener en cuenta que el centro fotométrico de la lámpara que se desea medir se mantenga fijo a pesar del movimiento de cada paso de los dos ejes de rotación del goniofotómetro. Para lo cual tendremos dos ejes, el primero mencionado en

el párrafo anterior y el segundo que es ortogonal al banco óptico y que también pasa por el centro fotométrico.

9.2. Software de control

El software (figura 52) que se utilizó está hecho en Labview y es una modificación del programa utilizado por Myke Ruiz [12]. Los cambios que se hicieron fueron:

- Proporcionar nuevas rutinas de movimiento en las que se puede elegir la modificación de la resolución angular. las rutinas son:
 - Rutina 0: Hace girar el motor inferior M2 cada 2° de 0 hasta 360° y hace girar el motor superior M1 cada 22,5° de 0 hasta 180°.
 - Rutina 1: Hace girar el motor inferior M2 cada 5° de 0 hasta 360° y hace girar el motor superior M1 cada 15° de 0 hasta 180°.
 - Rutina 2: Hace girar el motor inferior M2 cada 5° de 0 hasta 360° y hace girar el motor superior M1 cada 22,5° de 0 hasta 180°.
- Modificación del software para el uso del nuevo luxómetro (Mavolux 5032B) y sus características propias.

La apariencia del programa se muestra en la figura 52 en el anexo B.

9.3. Cálculos del flujo luminoso

Para nuestro caso partimos de la ecuación 40 y la modificamos para de un goniofotómetro tipo C obtenemos:

$$\Phi_V = d^2 \int_{\gamma=0}^{2\pi} \int_{C=0}^{\pi} E_V(\gamma, C) |\sin \gamma| d\gamma dC \quad (60)$$

Para resolver esta integral y obtener el flujo luminoso se usó la regla de Simpson 1/3 compuesta que dice que:

$$\begin{aligned} \int_{x_1}^{x_n} f(x) dx &\approx \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + 2f(x_4) + \dots + f(x_n)] \\ &\approx \frac{h}{3} \left[f(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5,\dots}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{j=2,4,6,\dots}^{n-2} f(x_j) + f(x_n) \right] \end{aligned} \quad (61)$$

donde n es el número de intervalos iguales entre x_1 y x_n y es par. Y “ h ” es igual a $(x_n - x_1)/n$.

Como los ángulos de las rutinas están debidamente espaciados se pueden poner en función de un sub-índice. Se explicará a más detalle para la rutina 2. Para las demás rutinas el procedimiento es parecido.

la rutina 2 hace girar el motor M2 cada 5° partiendo de 0° hasta 360° y el motor M1 cada 22,5° partiendo de 0° hasta 180°. En otras palabras tenemos que:

$$\begin{aligned}\gamma_i &= (i-1)\frac{\pi}{36} \\ C_j &= (j-1)\frac{\pi}{8}\end{aligned}\tag{62}$$

donde $i = \{1, 2, \dots, 73\}$ y $j = \{1, 2, \dots, 9\}$ por lo que la aproximación de la integral se reduce a:

$$\Phi_V \approx d^2 \frac{\pi}{36} \frac{\pi}{8} \sum_{i=1}^{73} \sum_{j=1}^9 a_{ij} E_V^{ij} \text{sen} \gamma_i \tag{63}$$

donde “d” es la distancia entre la fuente luminoso y el detector, “ E_V^{ij} ” es la iluminancia en la dirección definida por γ_i y C_j y $a_{ij} = \mu_i \nu_j$ de tal manera que:

$$\begin{aligned}\mu_i &= \begin{cases} 1/3, & \text{si } i \text{ es } 1 \text{ o } 73, \\ 4/3, & \text{si } i \text{ es par,} \\ 2/3, & i \text{ es impar.} \end{cases} \\ \nu_j &= \begin{cases} 1/3, & \text{si } j \text{ es } 1 \text{ o } 9, \\ 4/3, & \text{si } j \text{ es par,} \\ 2/3, & j \text{ es impar.} \end{cases}\end{aligned}$$

Tabla 8: Aproximaciones del flujo luminoso para cada rutina.

	Rutina 0		Rutina 1		Rutina 2	
i	0, 1, 2, ... 181		0, 1, 2, ... 73		0, 1, 2, ... 73	
j	0, 1, 2, ... 9		0, 1, 2, ... 13		0, 1, 2, ... 9	
μ_i	Si i=0 o 181	1/3	Si i=0 o 73	1/3	Si i=0 o 73	1/3
	Si i es par	4/3	Si i es par	4/3	Si i es par	4/3
	Si i es impar	2/3	Si i es impar	2/3	Si i es impar	2/3
ν_j	Si i=0 o 9	1/3	Si i=0 o 13	1/3	Si i=0 o 9	1/3
	Si i es par	4/3	Si i es par	4/3	Si i es par	4/3
	Si i es impar	2/3	Si i es impar	2/3	Si i es impar	2/3
Flujo luminoso	$\approx d^2 \frac{\pi}{90} \frac{\pi}{8} \sum_{i=1}^{181} \sum_{j=1}^9 a_{ij} E_V^{ij} \text{sen} \gamma_i$		$\approx d^2 \frac{\pi}{36} \frac{\pi}{12} \sum_{i=1}^{73} \sum_{j=1}^{13} a_{ij} E_V^{ij} \text{sen} \gamma_i$		$\approx d^2 \frac{\pi}{36} \frac{\pi}{8} \sum_{i=1}^{73} \sum_{j=1}^9 a_{ij} E_V^{ij} \text{sen} \gamma_i$	

Adicionalmente se diseño un programa, al que llamamos Gonio-lab (figura 53 en el anexo B), para encontrar el flujo luminoso, el FWHM, gráfica de iluminancia vs el

ángulo gamma en todos los planos C y el porcentaje de flujo luminoso en un determinado ángulo de apertura, solo si la lámpara tiene una simetría axial.

Según la referencia [12] la mayor fuente de error para un goniofotómetro similar a este era el sensor de iluminación con 94 % de aporte al error total. El sensor utilizado para el nuevo goniofotómetro es un MAVOLUX 5032B y tiene un error típico de 3,0 % de adaptación a la curva fotópica. Por lo cual se considera que el nuevo goniofotómetro tiene una incertidumbre total de 5 % para el flujo luminoso para un nivel de confianza del 95 %.

Resultados

10. Calibración de la esfera integradora LMS-400

Para la calibración de la esfera integradora LMS-400 se usaron las 2 lámparas que se muestran en la tabla 5. Adicionalmente a partir de esta calibración se obtuvo una tabla de datos con la flujo radiante por nanómetro (W/nm) para las lámparas “IL2” y “IL3” de la empresa International Lighting que son idénticas, en forma y condiciones eléctricas de trabajo, a la lámpara SCL-050-A41, y las lámparas “Eiko 1” y “Eiko 2” de la empresa Eiko que son idénticas, en forma y condiciones eléctricas de trabajo, a la lámpara SCL-1400-B65. Las lámparas “IL2”, “IL3”, “Eiko 1” y “Eiko 2” son lámparas que sirven al laboratorio como lámparas patrones de trabajo.

Para verificar la calibración se midió el flujo luminoso de la SCL-050-A41 usando esta misma lámpara como lámpara de referencia. Los datos se muestran en la tabla 9.

En este caso los valores de E_{aT} y E_{aR} , así como los valores de E_T y E_S deberían ser iguales porque la lámpara de Test es la misma que la lámpara de Referencia.

Tabla 9: Datos obtenidos de la lámpara de referencia SCL-050-A41 para verificar la calibración de la esfera LMS-400.

Número	E_{aT}	E_{aR}	E_T	E_S
1	583,0	583,0	42,29	42,86
2	583,0	583,0	42,49	43,67
3	583,0	583,1	42,59	42,62
4	583,0	583,1	42,77	42,17
5	583,0	583,1	42,66	42,33
Promedio	583,0	583,1	42,56	42,73
Desviación estándar	$4,47 \times 10^{-2}$	0,00	$4,47 \times 10^{-2}$	$1,48 \times 10^{-1}$
Incertidumbre estándar	$2,24 \times 10^{-2}$	0,00	$2,24 \times 10^{-2}$	$7,41 \times 10^{-2}$
Grados de libertad	4	4	4	4

Para hallar el flujo luminoso se usó la ecuación 53 y dio como resultado:

$$\Phi_T = \frac{42,37 \times 42,56 \times 583,1}{42,73 \times 583,0} \quad (64)$$

$$\Phi_T = 42,21 \text{ lm}$$

Para obtener la tabla de datos de las lámparas patrones de trabajo se evaluó cuidadosamente y se usó aquella lámpara de referencia que tiene la misma forma y la mismas características eléctricas.

Los datos obtenidos de la evaluación de la lámpara IL2 se muestran en la tabla 10. El

Tabla 10: Datos obtenidos de la lámpara IL2 para obtener la tabla de flujo radiante usando la lámpara SCL-050-A41 como referencia.

Número	E_{aT}	E_{aR}	E_T	E_S
1	585,5	583,0	44,96	42,29
2	585,8	583,0	44,98	42,49
3	586,0	583,0	44,97	42,59
4	585,9	583,0	44,95	42,77
5	585,9	583,0	44,97	42,66
6	586,0	583,0	44,97	42,86
7	585,9	583,0	44,95	43,67
8	585,9	583,1	44,94	42,62
9	586,0	583,1	44,95	42,17
10	585,9	583,1	44,95	42,33
Promedio	585,9	583,0	44,96	42,55
Desviación estándar	$1,48 \times 10^{-1}$	$4,83 \times 10^{-2}$	$1,29 \times 10^{-2}$	$2,21 \times 10^{-1}$
Incertidumbre estándar	$4,67 \times 10^{-2}$	$1,53 \times 10^{-2}$	$4,07 \times 10^{-3}$	$7,00 \times 10^{-2}$
Grados de libertad	9	9	9	9

flujo luminoso de la lámpara IL2 es igual a:

$$\Phi_T = \frac{42,37 \times 583,0 \times 44,96}{42,55 \times 585,9} \quad (65)$$

$$\Phi_T = 44,55 \text{ lm}$$

Hasta este punto tenemos la tabla de datos de flujo radiante por nanómetro de la lámpara IL2 pero no tenemos la incertidumbre. Para hallar la incertidumbre usaremos la ecuación 56, pero antes necesitamos saber el valor de la incertidumbre de la lámpara de referencia SCL-050-A41 que se obtiene del certificado de calibración y dice que tiene un flujo luminoso de $42,37 \text{ lm} \pm 1\%$ con un factor de cobertura igual a 2. Entonces tenemos que la incertidumbre estándar para un factor de cobertura igual a 1 es igual a:

$$0,4237/2 = 0,2119 \text{ lm (Incertidumbre tipo B)} \quad (66)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= \sqrt{\frac{(4,67 \times 10^{-2})^2}{(585,9)^2} + \frac{(1,53 \times 10^{-2})^2}{(583)^2} + \frac{(4,07 \times 10^{-3})^2}{(44,96)^2} + \frac{(7,00 \times 10^{-2})^2}{(42,55)^2} + \frac{(0,21)^2}{(42,37)^2}} \\
\frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= \sqrt{(7,97 \times 10^{-5})^2 + (2,62 \times 10^{-5})^2 + (9,05 \times 10^{-5})^2 + (1,65 \times 10^{-3})^2 + (5,00 \times 10^{-3})^2} \\
\frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= 0,53 \times 10^{-2} \\
\mu_c(\Phi_T) &= 44,55 \times 0,53 \times 10^{-2} \\
\mu_c(\Phi_T) &= 0,24
\end{aligned} \tag{67}$$

Ahora para expandir la incertidumbre necesitamos conocer el grado de libertad efectivo usando la ecuación 55 que viene dado por:

$$\begin{aligned}
\nu_{ef} &= \frac{(0,53 \times 10^{-2})^4}{\left[\frac{(5,00 \times 10^{-3})^4}{\infty} + \frac{(1,65 \times 10^{-3})^4}{9} + \frac{(9,05 \times 10^{-5})^4}{9} + \frac{(2,62 \times 10^{-5})^4}{9} + \frac{(7,97 \times 10^{-5})^4}{9} \right]} \\
\nu_{ef} &\approx 957 \Rightarrow \infty
\end{aligned} \tag{68}$$

El valor del factor de cobertura de t-student para infinitos grados de libertad al 95,45 % de nivel de confianza es 2:

$$0,24 \times 2 = 0,48$$

Por lo tanto el valor del flujo luminoso de la lámpara IL2 es $(44,55 \pm 0,48)$ lm con 95,45 % de nivel de confianza.

De forma similar para las demás lámparas patrones de trabajo.

11. Resultados de la calibración de la esfera PCE-LED

Los resultados de la evaluación de la lámpara IL1 y de la lámpara LED5W en la esfera integradora LMS-400 y en la esfera integradora PCE-LED se muestran en la tabla 11.

Tabla 11: Datos obtenidos del flujo luminoso en la esfera integradora LMS-400 y en la esfera integradora PCE-LED.

	Corriente (mA) ± 1	Voltaje (V) ± 0.02	Flujo luminoso (lm)	
			Labsphere $\pm 3\%$	PCE$\pm 2\%$ ¹
Lámpara Halógena IL1	800	2.35	4	7.258
	820	2.5	5	9.538
	850	2.69	7	13.6
	900	3.06	12	23.84
	950	3.44	20	37.8
	999	3.85	30	59
	1050	4.25	43	84.6
Lámpara LED 5W	40	2.73	8	15.94
	59	2.77	11	24.54
	90	2.82	17	37.24
	99	2.85	19	41.09
	199	2.9	36	77.35
	399	3.01	62	134
	499	3.07	72	153.4
	599	3.11	77	168.7
	700	3.14	84	186.3
	799	3.17	90	200
	901	3.2	91	206

La figura 31 muestra una comparación de los valores obtenidos de flujos luminosos, para condiciones eléctricas similares, usando dos métodos distintos para las lámparas IL1 y LED5W. La tabla 12 muestra los valores de la pendiente y punto de corte con sus respectivas incertidumbres.

¹La incertidumbre se obtiene de su manual PCE-LED.

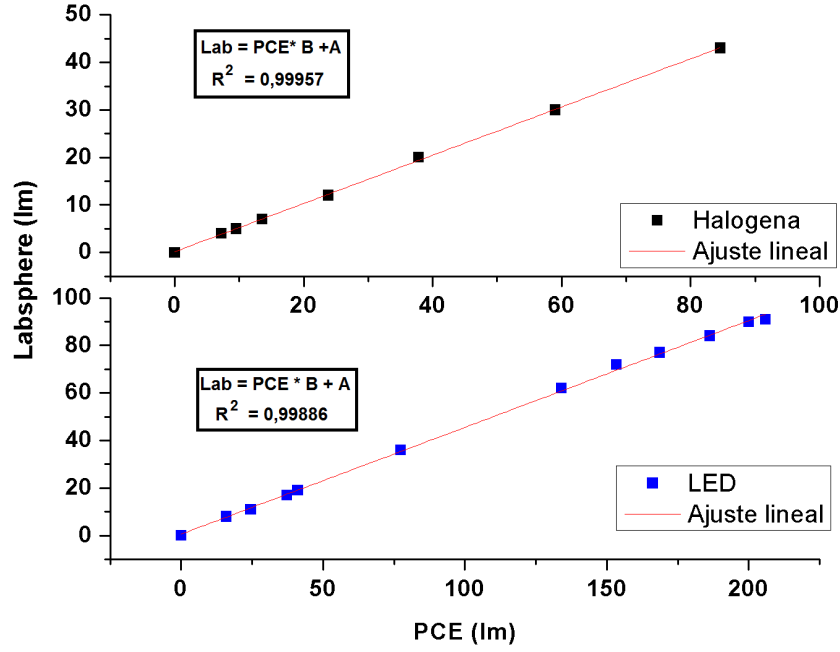


Figura 31: Comparación de los valores de los flujos luminosos de las lámparas IL1 y LED5W medidos con la esfera integradora LMS-400 y la PCE-LED.

Tabla 12: Valores de pendiente y punto de corte de las rectas de la gráfica 31.

Lámpara Halógena			Lámpara LED		
Ecuación	Lab = PCE × B + A		Ecuación	Lab = PCE × B + A	
	Valor	Error estándar		Valor	Error estándar
A	0,17233	0,15972	A	0,63902	0,58553
B	0,50765	0,00397	B	0,44942	0,00457

A partir de estos dos resultados se obtiene un factor de calibración para una fuente incandescente y LED blanco generado por la incidencia del LED azul sobre fósforos. El factor de calibración para una lámpara halógena se muestra en la ecuación 69 y para la lámpara LED en la ecuación 70.

$$\Phi_V = [PCE \times (0,508 \pm 0,004) + (0,172 \pm 0,160)] \pm 3\%(PCE \times (0,508) + (0,172)) \quad (69)$$

$$\Phi_V = [PCE \times (0,449 \pm 0,005) + (0,639 \pm 0,586)] \pm 3\%(PCE \times (0,449) + (0,639)) \quad (70)$$

12. Resultados de caracterización y calibración de la esfera UNI-LAB

En esta sección se muestran los resultados de los procedimientos realizados.

12.1. Caracterización de la pintura de la esfera UNI-LAB

El resultado del proceso de caracterización de la pintura usada en la esfera UNI-LAB se obtuvo usando la esfera RSA-FO-150 (esfera integradora cuyo objetivo es obtener la reflectancia de una muestra) en la geometría $8^\circ:di$, donde el blanco de referencia es el blanco de la cartilla Munsell⁴ que tiene coordenadas en el sistema CIE $L^*a^*b^* = 96,539/-0,425/1,1869$, y la señal de la corriente oscura se obtuvo usando el negro de la cartilla Munsell con coordenadas CIE $L^*a^*b^* = 20,461/-0,079/0,973$.

En la figura 32 se muestran los resultados. En parte superior, se muestra la señal obtenida de las cuatro pinturas evaluadas y en la parte inferior, se muestra la reflectancia en unidades relativas considerando en blanco de referencia de la cartilla Munsell.

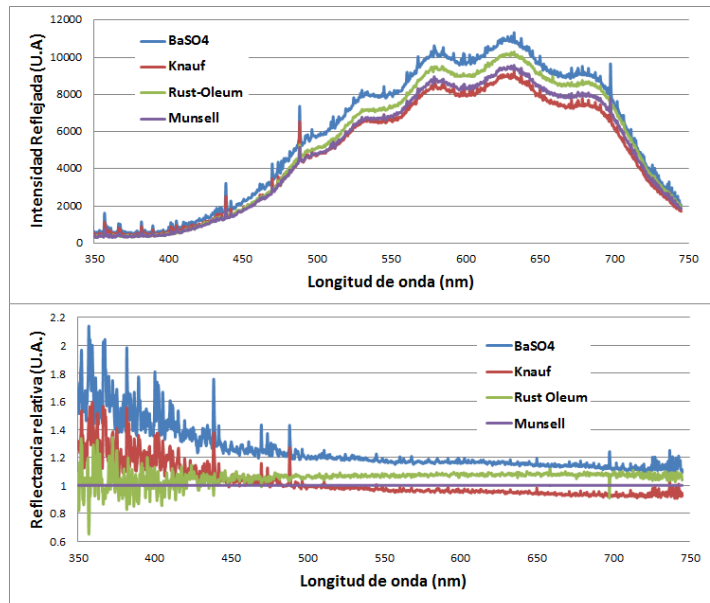


Figura 32: Superior. Intensidad reflejada de los blancos elegidos. Inferior. Reflectancia relativa considerando el blanco de la cartilla Munsell como referencia.

A partir de estos resultados se usó la pintura Rust-Oleum que tiene, en general, una

⁴Cabe resaltar que una pintura a base de sulfato de bario suele usarse como referencia por su alta reflectancia sin embargo en este caso se usó el blanco de la cartilla Munsell.

mayor reflectancia para el pintado interno de la esfera UNI-LAB.

12.2. Repetibilidad en la esfera UNI-LAB

La esfera UNI-LAB mostró una gran repetibilidad, pues los resultados de iluminancia fueron prácticamente constantes. Para demostrar esto se midió 20 veces, cada 2 minutos, el flujo luminoso de la lámpara IL3 (en luxes) a condiciones de corriente de 1,05 A y 4,244 V. Adicionalmente en cada medida se giro un poco el hemisferio inferior de la esfera. Los resultados de cada medida se muestran en la figura 33. Como resultado de la figura 33 se concluye que que la esfera UNI-LAB tiene buena repetibilidad y que su pintura es homogénea.

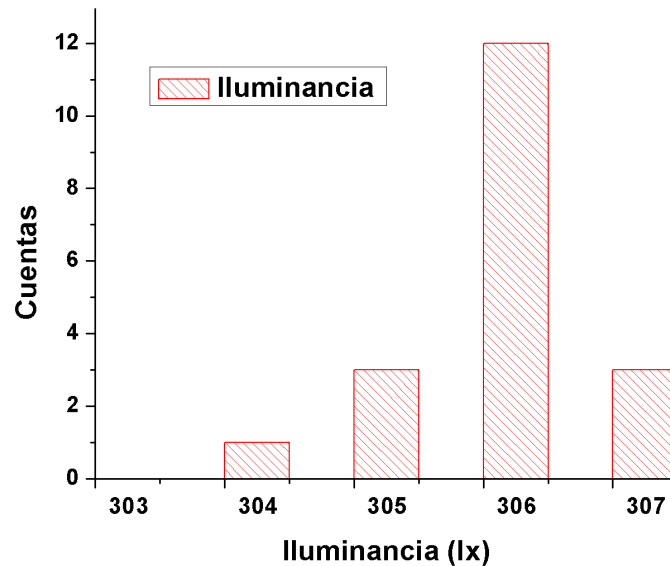


Figura 33: Mediciones de iluminancia de la lámpara IL3 en la esfera UNI-LAB.

12.3. Calibración de la esfera UNI-LAB

La calibración de la esfera UNI-LAB se basó en la comparación del flujo luminoso de una lámpara patrón de trabajo, IL3 cuyo modelo es 187-1 de la marca International Light, medida por la esfera LMS-400 en lúmenes y por la esfera UNI-LAB en luxes, teniendo en cuenta que se tiene iguales condiciones eléctricas. La tabla 14 muestra los resultados de estas medidas y la figura 34 muestra la relación entre el flujo luminoso en lúmenes y luxes obtenidos por la esfera integradora y la esfera UNI-LAB respectivamente.

Por otro lado se tiene las dimensiones físicas de la esfera UNI-LAB y el flujo luminoso

de la lámpara que se encuentra dentro, por lo cual se puede hallar la reflectancia total de la pintura de la esfera UNI-LAB usando la ecuación 57. Las dimensiones de la esfera UNI-LAB se muestran en la tabla 13.

Tabla 13: Dimensiones de la esfera UNI-LAB.

	Área (m^2)
Superficie de la esfera	$4,283 \times 10^{-4}$
Superficie del sensor del luxómetro	$2,96 \times 10^{-4}$

Tabla 14: Resultados de la evaluación de la lámpara IL3 en la esfera UNI-LAB y LMS-400, y la reflectancia para cada caso.

Corriente (A)	Voltaje (V)	Flujo luminoso		Reflectancia
		UNI-LAB(lx)	LMS-400 (lm)	
0,852	2,716	50,3	7,1	0,91
0,95	3,447	138,9	19,5	0,91
1,05	4,244	306	43,3	0,91

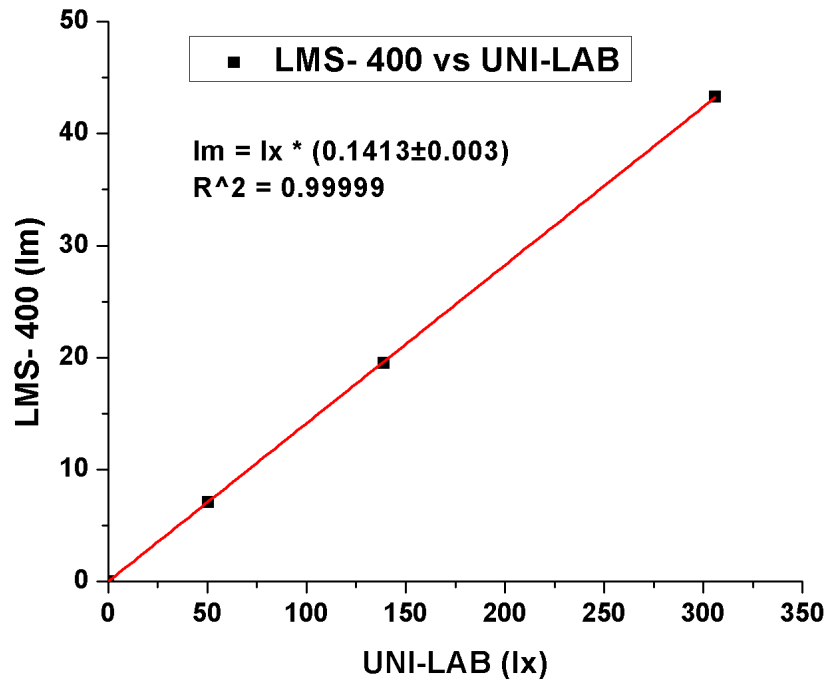


Figura 34: Resultados de flujo luminoso e iluminancia de la lámpara IL3 medido por la esfera integradora LMS-400 y por la esfera UNI-LAB respectivamente.

Entonces a partir de la figura 34 el flujo luminoso de una lámpara medido en la esfera UNI-LAB es:

$$lm = lx \times (0,1413 \pm 0,003) \pm 3 \%(0,003 + lx \times 0,1413) \quad (71)$$

donde “lm” es el valor del flujo luminoso medido en lúmenes y “lx” es el valor de iluminancia que obtenemos del luxómetro usando la esfera UNI-LAB.

12.4. Evaluación de una lámpara incandescente con la esfera UNI-LAB

Para la evaluación de la esfera UNI-LAB se usó una lámpara incandescente de 40 W y 12 V DC de la marca General Electric.

Para contrastar el valor del flujo luminoso se evaluó la misma lámpara en la esfera integradora LMS-400. Los resultados se muestran en la tabla 15.

Tabla 15: Datos de la evaluación de la lámpara incandescente en la esfera LMS-400 y en la esfera UNI-LAB.

LMS-400			UNI-LAB					
Corriente (A)	Voltaje (V)	Flujo $\pm 3\%$ (lm)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Flujo (lx)	Flujo (lm)	Error	Error porcentual (%)
2,001	4,849	9,8	2,002	4,639	66,6	9,4	0,4	4,1
2,501	7,54	79,6	2,502	7,41	542,0	76,5	3,1	3,9
3,002	10,71	323,2	3,005	10,3	2200	310,9	12,6	3,9

En esta evaluación se obtuvo un error porcentual máximo de 4,1 % que corresponde al error de 0,4.

12.5. Uso de la esfera UNI-LAB para evaluaciones de rutina

Hasta la fecha la esfera integradora UNI-LAB se usó para evaluar 382 lámparas fluorescentes compactas (LFC). Las lámparas compactas evaluadas fueron de la marca Phocos, modelo CL 1211C que funcionan a 12 V DC y tienen una potencia de 11 W. Debido a que las lámparas LFC tienen una auto absorción que difiere bastante con la lámpara IL3 que sirvió de lámpara de referencia, se optó por una nueva calibración cada vez que se evaluaban un grupo de lámparas (tabla 16). Para dichas calibraciones se usó el 10 % del total de las lámparas que se deseaban evaluar y se obtuvo una incertidumbre menor al 5 % para todos los casos con un nivel de confianza del 95,65 % siempre cuando

la lámpara tenga la misma absorción y tenga un flujo luminoso alrededor de 600 lm. Todas las lámparas fueron del mismo tipo, así que se consideró que todas las lámparas tenían la misma absorción y por ende en cada caso la esfera tendría la misma constante de esfera.

Después de 382 evaluaciones de rutina la esfera UNI-LAB muestra un cambio de colo-

Tabla 16: Número de lámparas evaluadas, fecha de evaluación y la pendiente que relaciona el flujo luminoso y la iluminancia.

Inicio de evaluación	Cantidad de lámparas	Pendiente
28/09/2013	50	$0,1473 \pm 0,0005$
06/12/2013	80	$0,1447 \pm 0,0003$
09/01/2014	125	$0,1465 \pm 0,0002$
09/10/2014	27	$0,1546 \pm 0,0005$
23/02/2015	100	$0,1531 \pm 0,0006$

ración, del color blanco inicial a un color más amarillo y debido a esta decoloración la relación entre el flujo luminoso y la iluminancia cambió con el tiempo.

Una complicación que se tuvo con la esfera UNI-LAB para las evaluaciones de rutina fue la temperatura. La esfera esta hecha de plástico y no conduce adecuadamente la temperatura para las evaluaciones. Para realizar las comparaciones entre el flujo luminoso medido con la esfera integradora LMS-400 y la esfera UNI-LAB se deben tener las mismas condiciones eléctricas por lo cual la cuando se media una LFC, la esfera UNI-LAB se mantenía abierta hasta que se iba a realizar la medida donde se cerraba y se anotaba la iluminancia.

13. Corrección de la distancia usando la ley de inverso al cuadrado en el goniofotómetro

Debido a que las 3 diferentes lámparas LED evaluadas (figura 35) en el goniofotómetro no son fuentes puntuales se debe hacer una corrección a la distancia entre el sensor y la fuente de luz. Para hallar esta corrección se usó la ley de inverso al cuadrado. La ecuación 72 muestra la ley de la inversa al cuadrado con la respectiva corrección

$$\frac{I_V}{(d + d_0)^2} = E_V \quad (72)$$

donde “d” es la distancia medida del luxómetro al centro fotométrico de la lámpara y “d₀” es la corrección cuyo valor más probable se obtiene por el método de mínimos

cuadrados usando la ecuación:

$$d_0 = \frac{\sum_{i=1}^{17} \frac{1}{\sqrt{E^i}} \sum_{i=1}^{17} \frac{d_i}{\sqrt{E^i}} - \sum_{i=1}^{17} \frac{1}{E^i} \sum_{i=1}^{17} d_i}{17 \sum_{i=1}^{17} \frac{1}{E_V^i} - \left(\sum_{i=1}^{17} \frac{1}{E_V^i} \right)^2} \quad (73)$$

La posición en la cual se realizó esta evaluación fue en la cual el difusor tenga una mayor dimensión y corresponde a las siguientes direcciones:

- Lámpara LED Zimpertec se evaluó en el semi plano $C=0^\circ-180^\circ$, $\gamma=0^\circ$ y tiene un difusor semi-esférico cuyo diámetro es 6,4 cm.
- Lámpara Sun King Pro se evaluó en el semi plano $B=0^\circ$, $\beta=0^\circ$ y cuenta con un difusor que tiene una forma semi-esférica en la parte central y termina formando una elipse en los bordes cuyas diámetros son de 11,7 cm y 13,6 cm.
- Lámpara LED OSRAM se evaluó en el semi plano $C=0^\circ-180^\circ$, $\gamma=0^\circ$ y cuenta con una capsula transparente cuya forma se asemeja a un esferoide con un diámetro mayor de 5,9 cm e internamente tiene un lente.

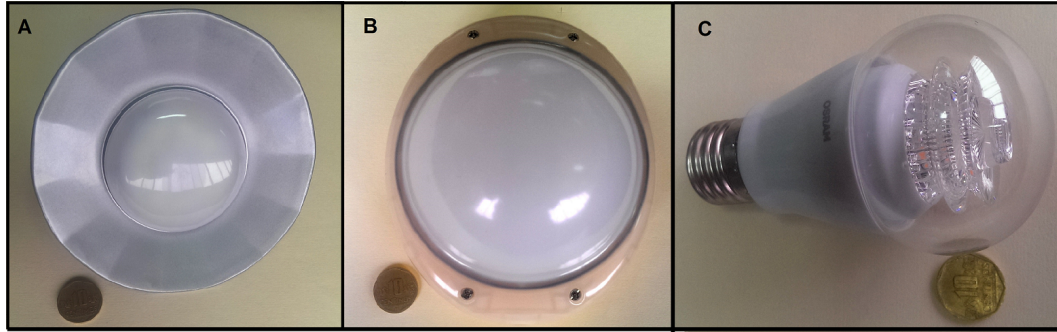


Figura 35: Imagen de las 3 lámparas evaluadas. A: lámpara Zimpertec. B: Lámpara Sun King Pro. C: Lámpara OSRAM.

Para hallar la corrección, los datos tomados de la distancia entre el sensor y el centro fotométrico fueron de 0,80 a 1,7 m con una variación constante de 5 cm. Los datos de iluminancia y distancia para cada lámpara se encuentran en la tabla 17 y en la figura 36.

La figura 36 muestra el comportamiento de la iluminancia versus la distancia para cada una de las tres lámparas, de triángulos azules corresponde a la lámpara OSRAM, de círculos rojos corresponde a la lámpara Zimpertec y de cuadrados negros corresponde a la lámpara Sun King Pro.

Tabla 17: Distancia versus iluminancia para cada una de las tres lámparas.

Distancia (m)	Iluminancia (lx)			Distancia (m)	Iluminancia (lx)		
	Sun King Pro	Zimpertec	OSRAM		Sun King Pro	Zimpertec	OSRAM
1,70	10,4	34,7	24,6	1,20	19,85	69,7	49,8
1,65	10,72	36,8	26,1	1,15	21,6	75,9	54,3
1,60	11,06	39,1	27,8	1,10	23,6	82,9	59,4
1,55	11,79	41,7	29,6	1,05	26,0	91,1	65,2
1,50	12,6	44,5	31,7	1,00	28,7	100,5	72,1
1,45	13,51	47,7	33,9	0,95	31,8	111,3	79,8
1,40	14,5	51,2	36,4	0,90	35,5	123,9	89,2
1,35	15,62	55,0	39,2	0,85	39,8	139,0	100,1
1,30	16,85	59,3	42,3	0,80	43,9	156,7	110,4
1,25	18,27	64,5	45,8				

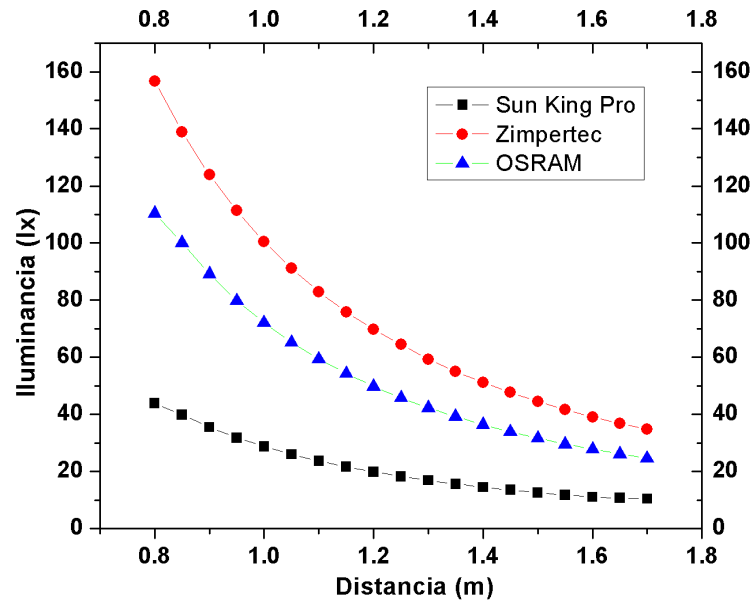


Figura 36: Iluminancia versus la distancia.

Los valores obtenidos de “ d_0 ” se muestra en la tabla 18. Al ser los valores de d_0 pequeños comparados con la distancia utilizada (1,6 m) para la evaluación, menos del 0,6%, no fueron considerados en los cálculos pero sí en la incertidumbre.

Tabla 18: Valores de d_0 para las tres lámparas evaluadas.

	Zimpertec	Sun King Pro	OSRAM
d_0	menor a 0,1 cm	0,9 cm	menor a 0,1 cm

14. Evaluación de la lámpara Zimpertec

La lámpara Zimpertec (figura 35A) es una lámpara LED que funciona a 12 V DC, una potencia de 3 W, rosca E27 y cuenta con un difusor de forma semi-esférica.

El voltaje se midió lo más cerca de la lámpara y la corriente que pasa a través de la lámpara se midió usando un shunt de $10\text{ m}\Omega \pm 0,01\%$. El voltaje suministrado a la lámpara fue de $(12,00 \pm 0,01)\text{ V}$ y la corriente fue de $(252 \pm 1)\text{ mA}$ ambos valores durante todo el periodo de evaluación. Por lo tanto la potencia fue de $(3,02 \pm 0,02)\text{ W}$ con un factor de cobertura igual a 2.

14.1. En la esfera LMS-400

Para la evaluación de la lámpara Zimpertec en la esfera integradora LMS-400, se usó como lámpara de referencia SCL-050-A41 con una humedad relativa menor al 70 % y una temperatura de $(22 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 19. Sustituyendo el valor del flujo luminoso de la lámpara SCL-050-A41 y los valores promedio de E_{aT} , E_{aR} , E_T y E_R en la ecuación 53 se obtiene el flujo luminoso de la lámpara Zimpertec:

$$\Phi_T = \frac{42,37 \times 259,12 \times 583}{517,12 \times 42,53} \quad (74)$$

$$\Phi_T = 291,03\text{ lm}$$

Para obtener la incertidumbre de la medida se utilizó la ecuación 56, la tabla 5 y los datos de iluminancia que fueron medidos en lúmenes (tabla 19).

Tabla 19: Datos obtenidos por medio de la esfera LMS-400 para la evaluación de la lámpara Zimpertec

Número	E_{aT}	E_{aR}	E_T	E_R
1	517,1	583	259,2	42,29
2	517,1	583	259,1	42,49
3	517,1	583	259,1	42,59
4	517,1	583	259,1	42,66
5	517,2	583	259,1	42,62
Promedio	517,12	583	259,12	42,53
Desviación estándar	$4,47 \times 10^{-2}$	$0,00 \times 10^0$	$4,47 \times 10^{-2}$	$1,48 \times 10^{-2}$
Incertidumbre estándar	$\pm 2,00 \times 10^{-2}$	$\pm 0,00 \times 10^0$	$\pm 2,00 \times 10^{-2}$	$\pm 6,63 \times 10^{-2}$
Grados de libertad	4	4	4	4

A partir del certificado de calibración de la lámpara SCL-050-A41, se sabe que tiene un flujo luminoso de $42,37 \text{ lm} \pm 1\%$ con un factor de cobertura igual a 2.

Reemplazando los datos obtenidos en la ecuación 56 obtenemos:

$$\begin{aligned}
\frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= \sqrt{\frac{(2,0 \times 10^{-2})^2}{(517,12)^2} + \frac{(0,00)^2}{(583)^2} + \frac{(2,0 \times 10^{-2})^2}{(259,12)^2} + \frac{(6,63 \times 10^{-2})^2}{(42,53)^2} + \frac{(0,212)^2}{(42,37)^2}} \\
\frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= \sqrt{(3,87 \times 10^{-5})^2 + (0,00) + (7,72 \times 10^{-5})^2 + (1,56 \times 10^{-3})^2 + (5,00 \times 10^{-3})^2} \\
\frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= 0,52 \times 10^{-2} \\
\mu_c(\Phi_T) &= 291,03 \times 0,52 \times 10^{-2} \\
\mu_c(\Phi_T) &= 1,52
\end{aligned} \tag{75}$$

Ahora hallaremos los grados de libertad que viene dado por:

$$\begin{aligned}
\nu_{ef} &= \frac{(0,52 \times 10^{-2})^4}{\left[\frac{(5,00 \times 10^{-3})^4}{\infty} + \frac{(1,56 \times 10^{-3})^4}{4} + \frac{(7,72 \times 10^{-5})^4}{4} + \frac{(0,00)^4}{4} + \frac{(3,87 \times 10^{-5})^4}{4} \right]} \\
\nu_{ef} &\approx 511 \Rightarrow \infty
\end{aligned} \tag{76}$$

El valor de t-Student para infinitos grados de libertad a 95,45 % de nivel de confianza es 2, entonces, la incertidumbre expandida al 95,45 % es:

$$1,52 \times 2 = 3,04 \tag{77}$$

Entonces el valor del flujo luminoso la lámpara Zimpertec es

$$\Phi_T = (291 \pm 3) \text{ lm}$$

y la eficacia es $\eta = (96 \pm 2) \text{ lm/W}$, ambos con un nivel de confianza del 95,45 %.

Adicionalmente se obtiene del espectro de la lámpara Zimpertec algunas características colorimétricas con el programa CCT-lab, los resultados se muestran en la tabla 20.

Los resultados del software de la esfera LMS-400 (figura 55) son muy similares a los obtenidos.

Tabla 20: Características adicionales de la lámpara Zimpertec.

Característica	valor	incertidumbre	K
CCT	6792	48	2
Chrom x	0.3087	0.0012	2
Chrom y	0.3234	0.0013	2
Chrom u'	0.1971	0.0006	2
Chrom v'	0.4669	0.0024	2
RA	84		

14.2. En el goniofotómetro

Se mantuvo encendida la lámpara 30' antes que se realice la medición, la temperatura ambiente fue de $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$. Para la evaluación de la lámpara se usó las tres diferentes rutinas que posee el goniofotómetro a una distancia de 1,60 cm, cada rutina se repitió 3 veces.

La figura 37 muestra la distribución de la intensidad luminosa para los planos $C=0^\circ$ - 180° y $C=90^\circ$ - 270° para las tres rutinas que posee el goniofotómetro. Los resultados de flujo luminoso obtenidos se muestran en la tabla 21 y considerando la rutina 0 como la más exacta se obtiene que la eficacia de la lámpara fue de: $\eta=(99 \pm 5) \text{ lm/W}$.

Tabla 21: Resultados del flujo luminoso obtenidos por el goniofotómetro por las diferentes rutinas.

	Flujo luminoso (lm)		
	Rutina 0	Rutina 1	Rutina 2
Toma 1	298,4	302,1	301,9
Toma 2	297,4	298,9	301,9
Toma 3	298,4	300,2	301,7
Promedio	298,1	300,4	301,8

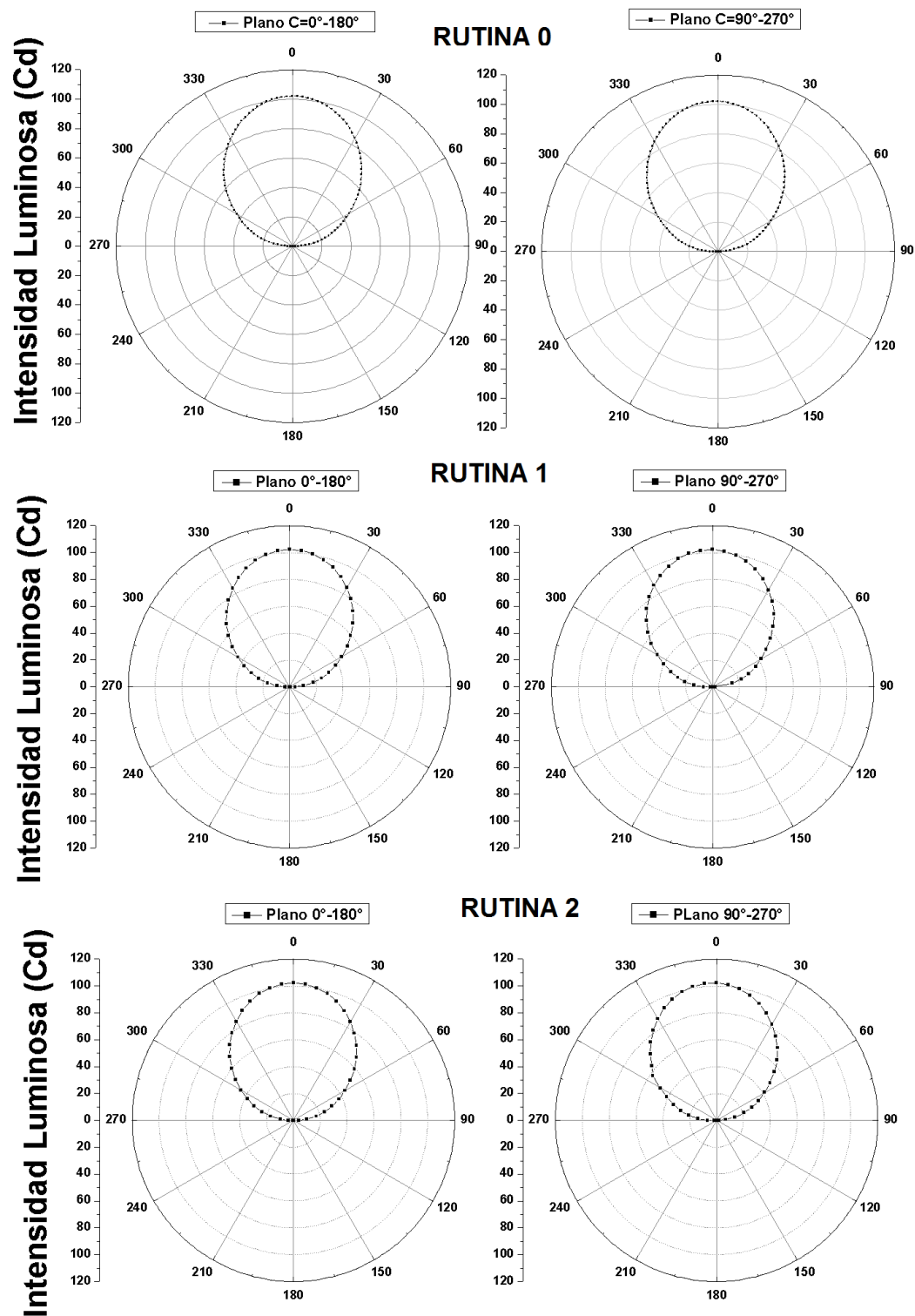


Figura 37: Resultados de la distribución de la intensidad luminosa de la lámpara Zimpertec para cada rutina.

De la figura 38 y considerando una simetría axial se obtiene por medio del programa Gonio-lab que el FWHM es $110^\circ \pm 4^\circ$.

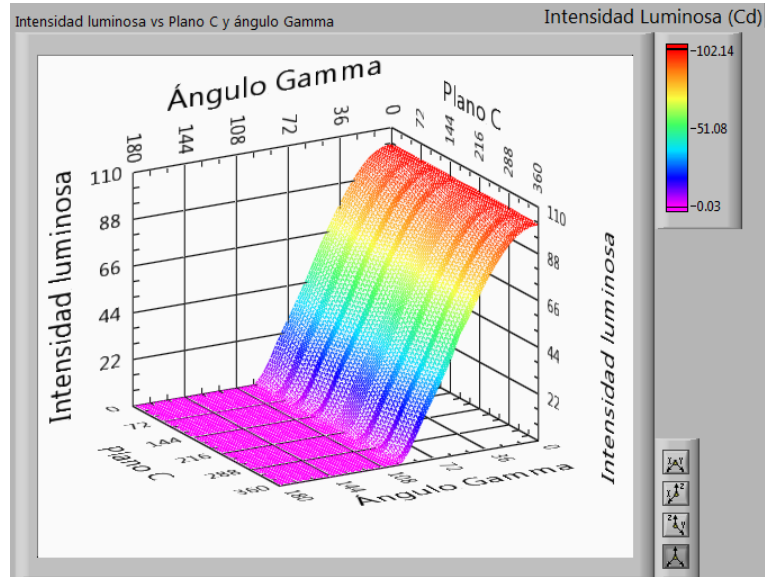


Figura 38: Distribución de la intensidad luminosa de la lámpara Zimpertec respecto al ángulo γ y a los planos C.

15. Evaluación de la lámpara Sun King Pro

La lámpara Sun King Pro (figura 35B) es una lámpara que forma parte de un sistema pico-fotovoltaico y tiene una batería interna de Litio Ferro-Fosfato (LFP) que mantiene el flujo luminoso prácticamente constante pues el flujo luminoso inicial, flujo luminoso después de media hora de encendido, varía menos del 0,5 % durante casi 5 horas continuas y luego decae a un nivel de iluminación menor y después de prácticamente 11 horas se apaga. Esto se puede apreciar en la figura 39. Para la evaluación de esta lámpara no se usó ninguna fuente de corriente-voltaje y la potencia eléctrica consumida fue de $1,16W \pm 0,01$ usando un shunt de $10\text{ m}\Omega \pm 0,01\%$ para medir la corriente y un voltímetro en la salida de la batería.

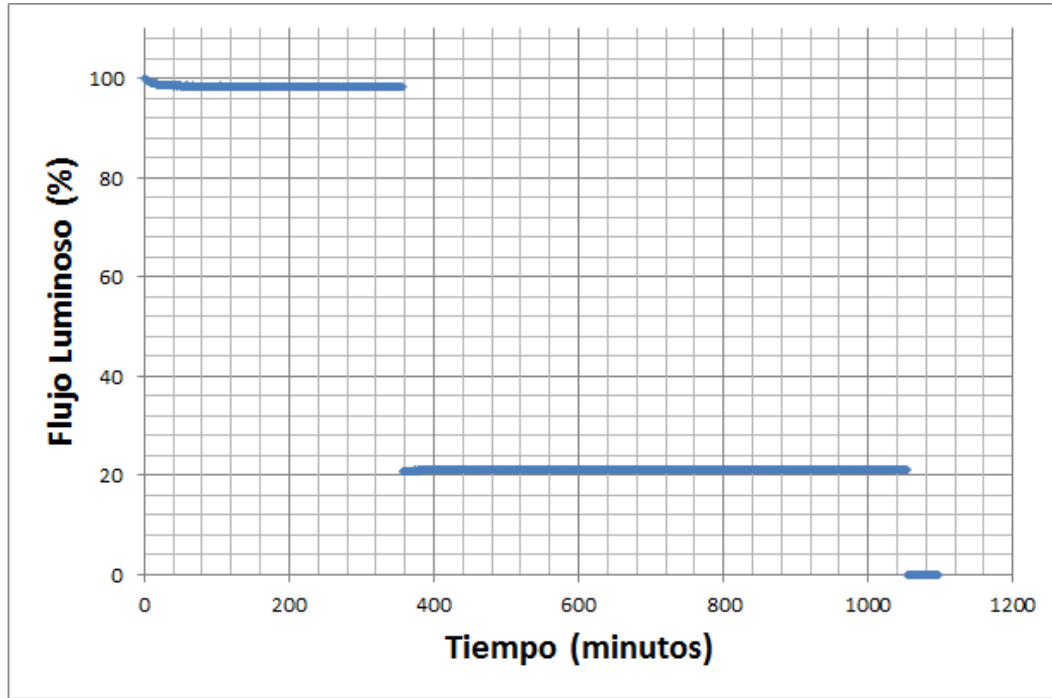


Figura 39: Comportamiento del flujo en el tiempo para la lámpara Sun King Pro.

15.1. En la esfera integradora

La evaluación en la esfera integradora se realizó a una temperatura ambiente de $22^{\circ}\text{C} \pm 1$ con una humedad relativa menor al 70 %. Se espero 30' antes de realizar la medición con el fin de que el flujo de la lámpara se estabilice.

La lámpara de referencia usada fue la SCL-050-A41 y los valores obtenidos se muestran en la tabla 22. El valor de flujo luminoso obtenido por medio de la ecuación 53 o 54 fue de:

$$\Phi_T = \frac{42,37 \times 111,5 \times 583,1}{527,7 \times 42,73} \quad (78)$$

$$\Phi_T = 122,20 \text{ lm}$$

Tabla 22: Datos obtenidos por medio de la esfera LMS-400 para la evaluación de la lámpara Sun King Pro.

Número	E_{aT}	E_{aR}	E_T	E_S
1	527,7	583,0	111,5	42,86
2	527,6	583,0	111,5	43,67
3	527,7	583,1	111,5	42,62
4	527,7	583,1	111,5	42,17
5	527,6	583,1	111,5	42,33
Promedio	527,7	583,1	111,5	42,73
Desviación estándar	$5,48 \times 10^{-2}$	$5,48 \times 10^{-2}$	0,00	$5,89 \times 10^{-1}$
Incertidumbre estándar	$\pm 2,45 \times 10^{-2}$	$\pm 2,45 \times 10^{-2}$	$\pm 0,00$	$\pm 2,63 \times 10^{-1}$
Grados de libertad	4	4	4	4

La incertidumbre asociada al flujo luminoso de la lámpara SunKing Pro se halla de manera similar a la hallada de la lámpara Zimpertec y es 0,97 lm.

$$\begin{aligned}
 \frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= \sqrt{\frac{(2,45 \times 10^{-2})^2}{(527,66)^2} + \frac{(2,45 \times 10^{-2})^2}{(583,06)^2} + \frac{(0,00)^2}{(111,5)^2} + \frac{(2,63 \times 10^{-2})^2}{(42,73)^2} + \frac{(0,212)^2}{(42,37)^2}} \\
 \frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= \sqrt{(4,64 \times 10^{-5})^2 + (4,20 \times 10^{-5})^2 + (0,00) + (6,16 \times 10^{-3})^2 + (5,00 \times 10^{-3})^2} \\
 \frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= 7,93 \times 10^{-3} \\
 \mu_c(\Phi_T) &= 122,20 \times 7,93 \times 10^{-3} \\
 \mu_c(\Phi_T) &= 0,97
 \end{aligned}
 \tag{79}$$

Para aumentar el nivel de confianza se debe primero hallar el grado de libertad efectivo:

$$\begin{aligned}
 \nu_{ef} &= \frac{(7,93 \times 10^{-3})^4}{\left[\frac{(5,00 \times 10^{-3})^4}{\infty} + \frac{(6,16 \times 10^{-3})^4}{4} + \frac{(4,20 \times 10^{-5})^4}{4} + \frac{(0,00)^4}{4} + \frac{(4,64 \times 10^{-5})^4}{4} \right]} \\
 \nu_{ef} &\approx 11
 \end{aligned}
 \tag{80}$$

De la tabla de t-Student para obtener un nivel de confianza de 95 % para 11 grados de libertad, el factor de cobertura es 2,20 sin embargo como el valor es mayor que 11, tomaremos como si tuviera 12 grados de libertad para asegurar el nivel de confianza, para este valor de grados de libertad el factor de cobertura es 2,23. Entonces el valor

del flujo luminoso es:

$$(122 \pm 2) \text{ lm}$$

con un nivel de confianza del 95 %.

Adicionalmente se obtiene del espectro de la lámpara Sun King Pro algunas características colorimétricas con el programa CCT-lab, los resultados se muestran en la tabla 23.

Tabla 23: Características colorimétricas de la lámpara Sun King Pro.

Característica	valor	incertidumbre	K
CCT	4050	19	2
Chrom x	0,3802	0,0013	2
Chrom y	0,3822	0,0012	2
Chrom u'	0,2228	0,0006	2
Chrom v'	0,5013	0,0005	2
RA	59		

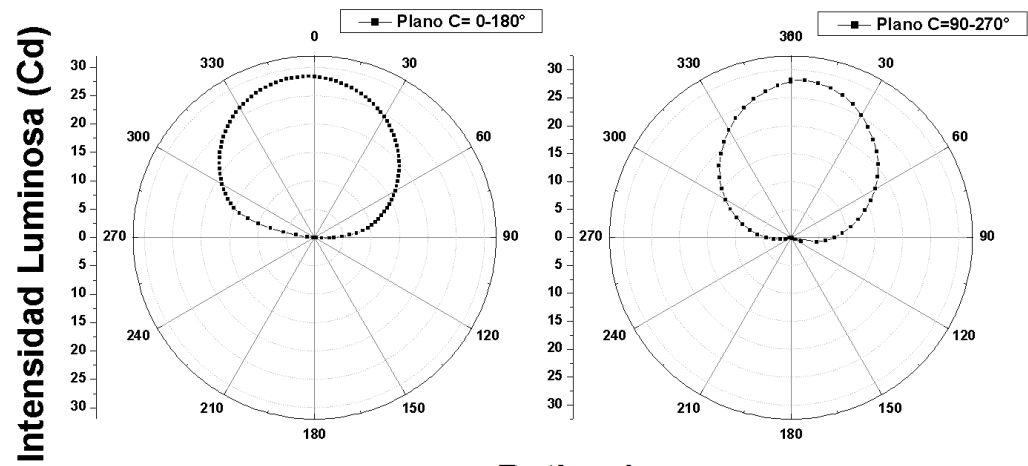
Los resultados del software de la esfera LMS-400 (figura 56) son muy similares a los obtenidos por nuestro programa.

15.2. En el goniofotómetro

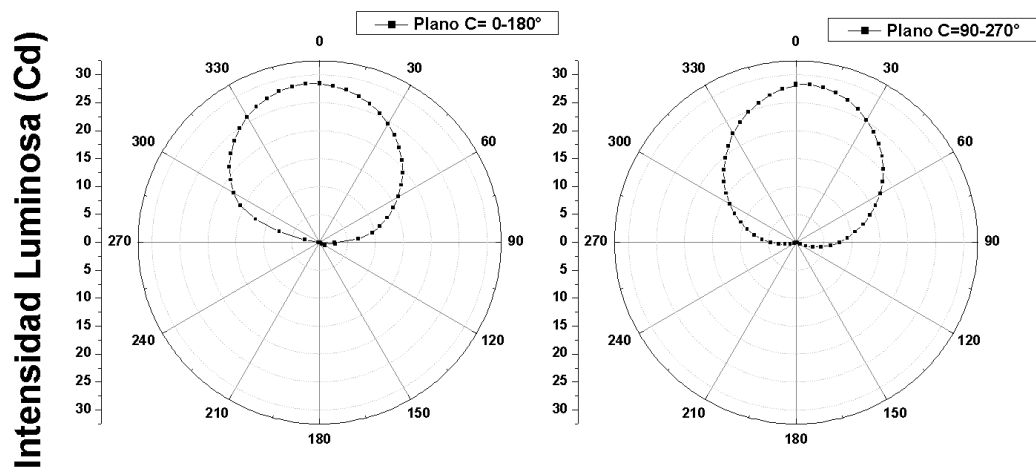
Se mantuvo encendida la lámpara 30' antes que se realice la medición, la temperatura ambiente fue de $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Para la evaluación de la lámpara se usó las tres diferentes rutinas que posee el goniofotómetro a una distancia de 1,60 cm, cada rutina se repitió 3 veces. La figura 40 muestra la distribución de la intensidad luminosa para los planos $C=0^\circ-180^\circ$ y $C=90^\circ-270^\circ$ para las tres rutinas que posee el goniofotómetro.

Rutina 0



Rutina 1



Rutina 2

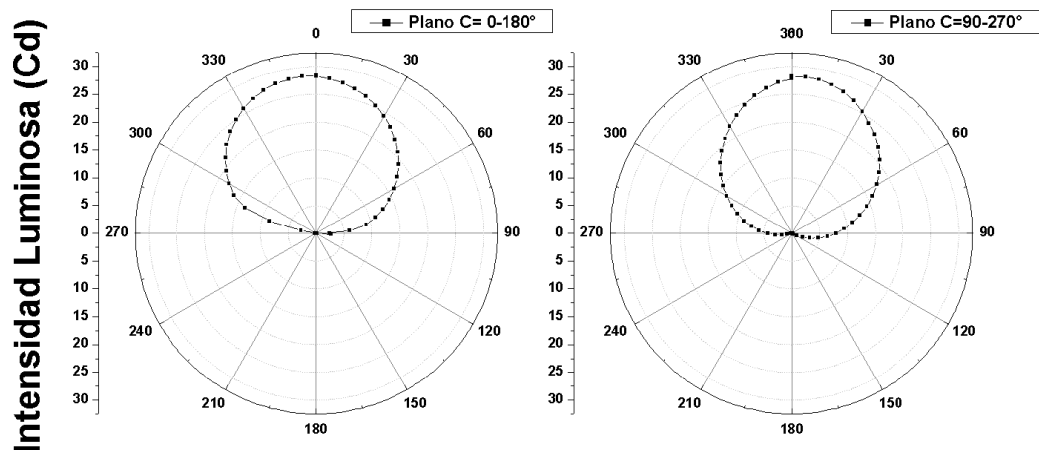


Figura 40: Resultados de la distribución de la intensidad luminosa de la lámpara Sun king Pro para cada rutina.

Los resultados de flujo luminoso obtenidos se muestran en la tabla 24 y considerando la rutina 0 como la más exacta se obtiene que la eficacia de la lámpara fue de: $\eta = 100 \text{ lm/W}$.

Tabla 24: Resultados del flujo luminoso obtenidos por el goniómetro por las diferentes rutinas.

	Flujo luminoso (lm)		
	Rutina 0	Rutina 1	Rutina 2
Toma 1	116,2	116,9	115,8
Toma 2	115,4	116,5	116,8
Toma 3	115,6	115,9	115,9
Promedio	115,7	116,4	116,2

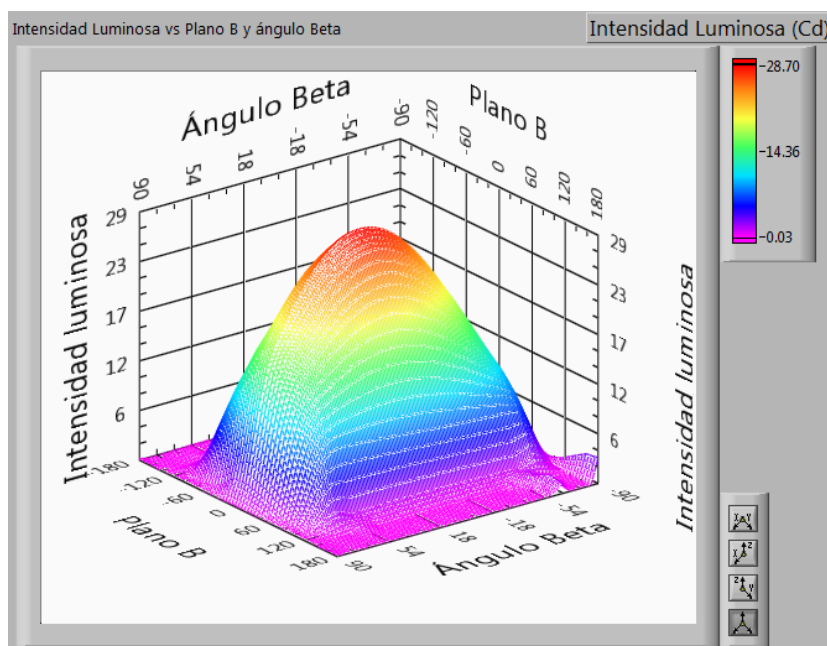


Figura 41: Distribución de la intensidad luminosa de la lámpara Sun King Pro respecto al ángulo β y a los planos B

De la figura 41 se obtuvo que el FWHM es $(120 \pm 4)^\circ$.

Observación En el caso de la evaluación de la lámpara Sun King Pro tiene un error adicional debido a que una parte del flujo luminoso no llega al detector debido a la partes mecánicas del goniómetro.

16. Evaluación de la lámpara LED marca OSRAM

La lámpara OSRAM (figura 35C) es una lámpara LED de 220 V AC y 10W. Para poder medir la potencia eléctrica que consume la lámpara se usó un analizador de potencia, modelo WT210 de la marca YOKOGAWA. Después de unos minutos de que la lámpara está encendida se forma una capa en el interior de la cúpula protectora que se asemeja a una capa debido a la condensación de agua. La imagen 42 muestra la lámpara con pocos minutos después de haberse apagado y se puede notar la extraña capa.



Figura 42: Imagen de la lámpara OSRAM donde se aprecia una extraña capa.

16.1. En la esfera integradora

Las condiciones de la evaluación en la esfera integradora fueron de $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa menor a 70 %. Se espero 30' para que el flujo estabilice. La potencia registrada fue de $(9,44 \pm 0,01)$ W.

La lámpara de referencia usada fue la SCL-050-A41 y los valores obtenidos para hallar el flujo luminoso se muestran en la tabla 25.

El valor de flujo luminoso obtenido usando la ecuación 53 o 54 fue de:

$$\Phi_T = \frac{42,37 \times 760,32 \times 583,06}{567,20 \times 42,73} \quad (81)$$
$$\Phi_T = 775,00 \text{ lm}$$

Tabla 25: Datos obtenidos por medio de la esfera LMS-400 para la evaluación de la lámpara OSRAM.

Número	E_{aT}	E_{aR}	E_T	E_S
1	567,2	583	760,3	42,86
2	567,2	583	760,4	43,67
3	567,2	583,1	760,3	42,62
4	567,2	583,1	760,3	42,17
5	567,2	583,1	760,3	42,33
Promedio	567,2	583,06	760,32	42,73
Desviación estándar	0,00	$5,48 \times 10^{-2}$	$4,47 \times 10^{-2}$	$5,89 \times 10^{-1}$
Incertidumbre estándar	$\pm 0,00$	$\pm 2,45 \times 10^{-2}$	$\pm 2,00 \times 10^{-2}$	$\pm 2,63 \times 10^{-1}$
Grados de libertad	4	4	4	4

La incertidumbre asociada al flujo luminoso de la lámpara OSRAM se halla de manera similar a las dos lámparas anteriores y es 6,15 lm.

$$\begin{aligned}
\frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= \sqrt{\frac{(0,0)^2}{(567,2)^2} + \frac{(2,45 \times 10^{-2})^2}{(583,06)^2} + \frac{(2,0 \times 10^{-2})^2}{(760,32)^2} + \frac{(2,63 \times 10^{-1})^2}{(42,73)^2} + \frac{(0,212)^2}{(42,37)^2}} \\
\frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= \sqrt{(0,00) + (4,20 \times 10^{-5})^2 + (2,63 \times 10^{-5})^2 + (6,15 \times 10^{-3})^2 + (5,00 \times 10^{-3})^2} \\
\frac{\mu_c(\Phi_T)}{\Phi_T} &= 7,94 \times 10^{-3} \\
\mu_c(\Phi_T) &= 775,0 \times 7,94 \times 10^{-3} \\
\mu_c(\Phi_T) &= 6,15
\end{aligned} \tag{82}$$

Para aumentar el nivel de confianza se debe primero hallar los grados de libertad efectivo:

$$\begin{aligned}
\nu_{ef} &= \frac{(7,94 \times 10^{-3})^4}{\left[\frac{(5,00 \times 10^{-3})^4}{\infty} + \frac{(6,15 \times 10^{-3})^4}{4} + \frac{(2,63 \times 10^{-5})^4}{4} + \frac{(4,20 \times 10^{-5})^4}{4} + \frac{(0,00)^4}{4} \right]} \\
\nu_{ef} &\approx 14
\end{aligned} \tag{83}$$

De la tabla de t-Student para obtener un nivel de confianza de 95 % para 14 grados de libertad el factor de cobertura es 2,15. Entonces el valor del flujo luminoso es: $(775 \pm 13) \text{ lm}$ con un nivel de confianza del 95 %.

Como se conoce el valor de la potencia consumida, $(9,44 \pm 0,01)W$, el valor de la eficacia

es: $\eta = (82 \pm 2) \text{ lm/W}$.

Adicionalmente se obtiene del espectro de la lámpara OSRAM algunas características colorimétricas con el programa CCT-lab, los resultados se muestran en la tabla 26.

Tabla 26: Características colorimétricas de la lámpara OSRAM.

Característica	valor	incertidumbre	K
CCT	2780	13	2
Chrom x	0,4551	0,0012	2
Chrom y	0,4113	0,0008	2
Chrom u'	0,2591	0,0007	2
Chrom v'	0,5204	0,0068	2
RA	80		

Los resultados del software de la esfera LMS-400 (figura 57) son muy similares a los obtenidos por nuestro programa.

16.2. En el goniofotómetro

Se mantuvo encendida la lámpara 30' antes que se realice la medición, la temperatura ambiente fue de $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$. Durante la medida en el goniofotómetro la potencia eléctrica osciló entre 9,42 y 9,48 W, y fue medido con un analizador de potencia YOKOGAWA WT210 con un promedio en 9,44 W.

Para la evaluación de la lámpara se usó las tres diferentes rutinas que posee el goniofotómetro a una distancia de 1,60 cm, cada rutina se repitió 3 veces.

La figura 43 muestra la distribución de la intensidad luminosa para los planos $C=0^\circ-180^\circ$ y $C=90^\circ-270^\circ$ para las tres rutinas que posee el goniofotómetro.

Los resultados de flujo luminoso obtenidos se muestran en la tabla 27 y considerando la rutina 0 como la más exacta se obtiene que la eficacia de la lámpara fue de: $\eta = (83 \pm 6) \text{ lm/W}$.

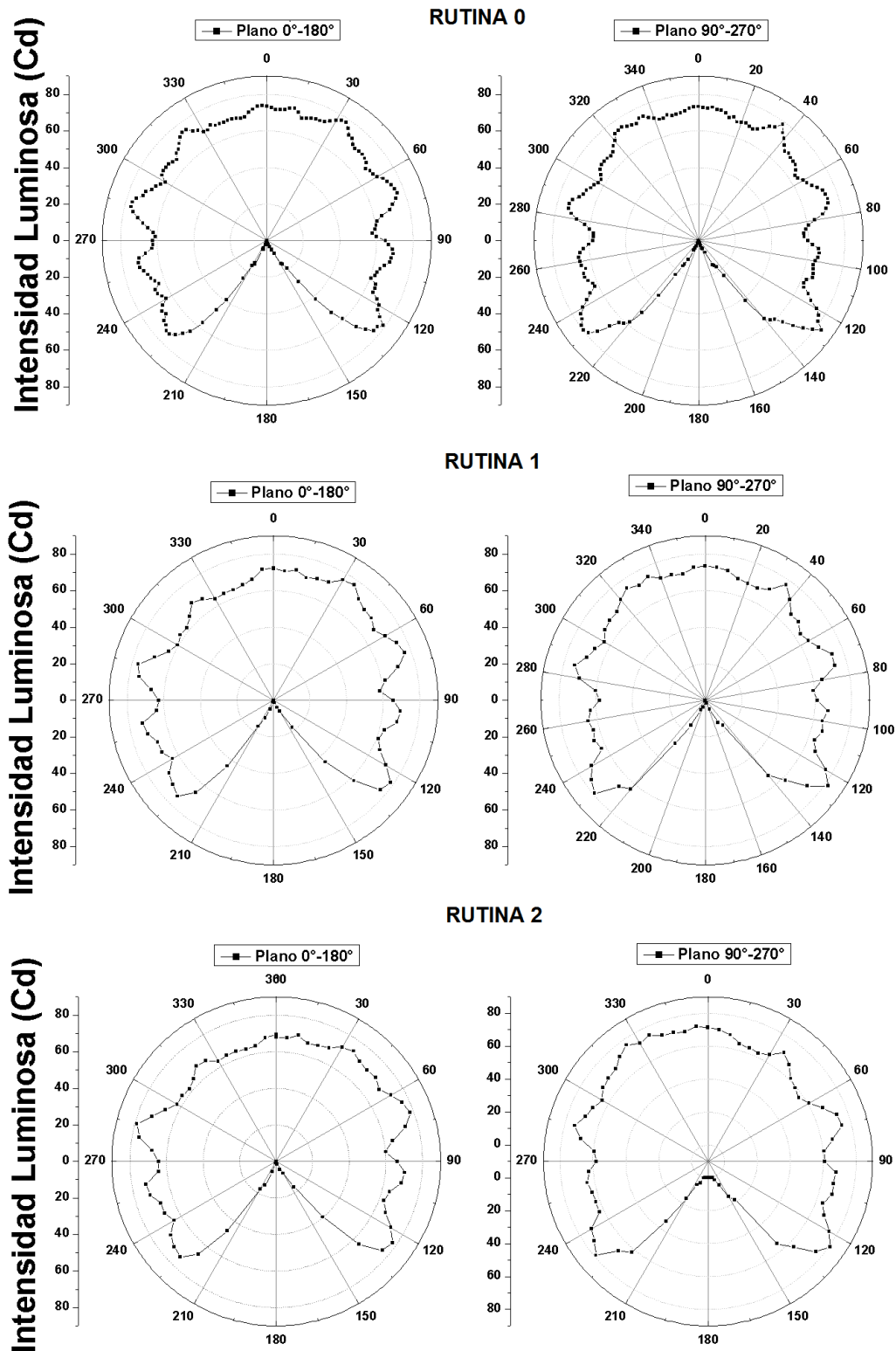


Figura 43: Resultados de la distribución de la intensidad luminosa de la lámpara OSRAM para cada rutina.

Tabla 27: Resultados del flujo luminoso obtenidos por el goniofotómetro por las diferentes rutinas.

	Flujo luminoso (lm)		
	Rutina 0	Rutina 1	Rutina 2
Toma 1	785,3	772,1 ¹	790,8
Toma 2	785,3	786,4	785,1
Toma 3	785,4	786,6	784,8
Promedio	785,3	786,5	786,9

De la figura 44 y considerando una simetría axial se obtiene por medio del programa Gonio-lab se obtuvo que el FWHM es $286^\circ \pm 4^\circ$.

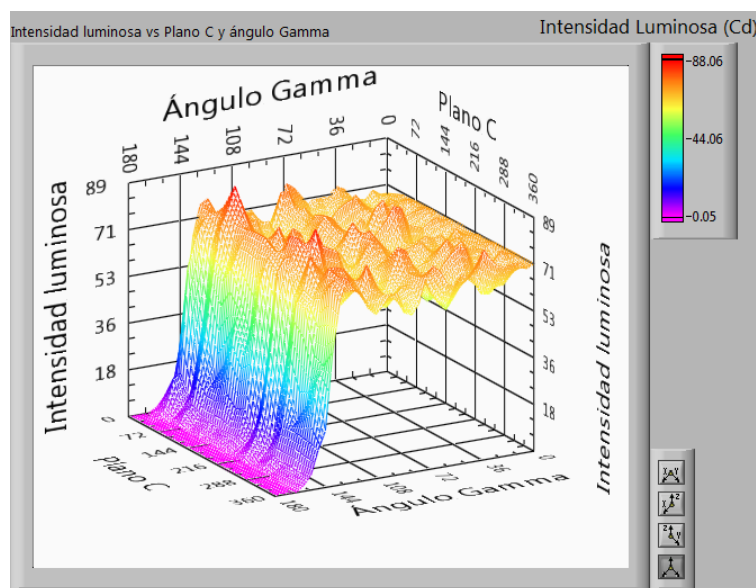


Figura 44: Distribución de la intensidad luminosa de la lámpara OSRAM respecto al ángulo γ y a los planos C.

Observación Uno de los resultados obtenidos en el rutina 1 dio como resultado 772,1 lm sin embargo al analizar este resultado fue descartado porque existen puntos donde el luxómetro otorgaba un valor de 0 lx cuando no debería serlo. En la imagen 45 se aprecia la iluminancia vs el ángulo gamma, con los planos C superpuestos y se puede apreciar los errores encerrados por una elipse. Este tipo de error está relacionado con la adquisición de datos de luxómetro a través del programa. A la fecha de entrega de la

¹Este valor no fue considerado porque en esta toma se obtuvo errores. Se explica en la observación.

tesis este error de adquisición fue resuelto.

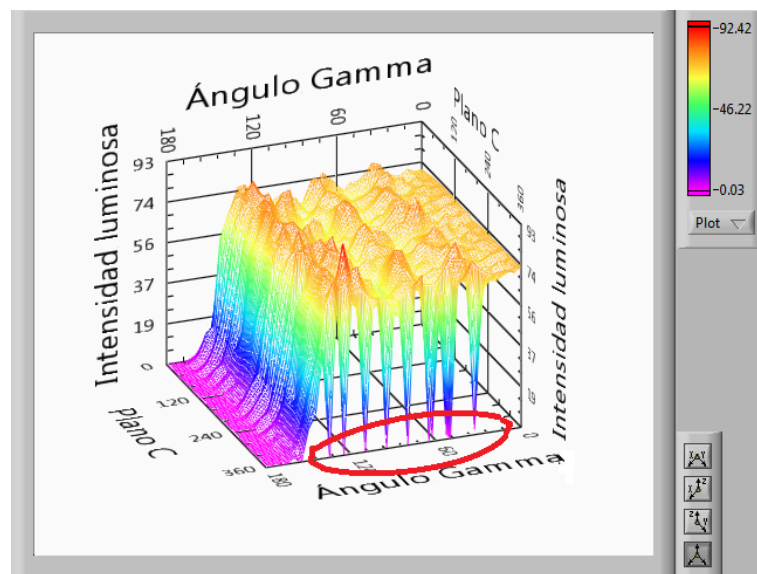


Figura 45: Iluminancia respecto al ángulo gamma, los planos C están superpuestos.

Discusión

Esfera integradora LMS-400 La incertidumbre asociada al flujo luminoso que se obtuvo para las diferentes lámparas a través de la esfera integradora LMS-400 fueron menores al 1,8%. Podemos decir que la incertidumbre para cualquier lámpara LED blanca que se produzca por incidencia de un haz azul en la capa del fósforo es menor al 3,0 % y así incluimos errores que no han sido previstos en los cálculos.

Esfera PCE-LED La calibración de la esfera PCE-LED se llevó a cabo debido a una gran diferencia entre los resultados de flujo luminoso de diferentes lámparas usando la esfera integradora LMS-400 y la esfera en cuestión.

Esfera integradora UNI-LAB La esfera integradora UNI-LAB es la primera esfera integradora que se construyó a bajo costo en el taller mecánico de la Facultad de Ciencias con un objetivo claro, el poder realizar exclusivamente evaluaciones de rutina con una incertidumbre aceptable.

La esfera UNI-LAB al estar hecho de plástico presento el problema de calentamiento debido a la lámpara en su interior, pues el plástico actuó como aislante térmico. Este problema se resolvió manteniendo la esfera abierta hasta un momento antes que se tome las medida. Se recomienda realizar la siguiente esfera de metal.

Se analizó la reflectancia total de la pintura utilizada, sin embargo no se tomó en cuenta la influencia de la temperatura sobre la tonalidad de la pintura. Se recomienda analizar como afecta la temperatura durante un tiempo a la reflectancia.

Goniofotómetro Debido a que el goniofotómetro cuenta actualmente con tres diferentes rutinas de movimientos, el tiempo de medida es diferente dependiendo de la rutina. Para la rutina 0 toma aproximadamente 1 hora, para la rutina 1 toma aproximadamente 50' y para la rutina 2 toma aproximadamente 30'.

Conclusiones

- Los equipos del laboratorio pueden medir las características mostradas en la tabla 28 con una buena incertidumbre:

Tabla 28: Características e incertidumbres de los equipos del laboratorio de fotometría.

Esfera LMS-400		
Característica	Incertidumbre	K
Flujo luminoso	3 %	2
CCT	1 %	2
Chrom x	2 %	2
Chrom y	2 %	2
Chrom u'	2 %	2
Chrom v'	2 %	2
Goniofotometro		
Característica	Incertidumbre	K
Flujo luminoso	5 %	2
Distribución espacial de la intensidad luminosa	—	—
FWHM	2°	
Esfera UNI-LAB		
Característica	Incertidumbre	K
Flujo luminoso	5,5 % ¹	2
Esfera PCE-LED		
Característica	Incertidumbre	K
Flujo luminoso	5 % ²	2

- La esfera UNI-LAB sirvió para evaluar 382 lámparas LFC con una incertidumbre menor al 5 % y el costo de los materiales fue alrededor de 200 nuevos soles sin considerar el luxómetro.
- EL goniofotómetro de la Facultad de Ciencias cuenta con un banco óptico de 2 m de largo hecho a partir de un tubo de aluminio de perfil rectangular que le otorga una excelente estabilidad de tal manera que se puede desplazar el cabezal de fotómetro

¹Cuando el flujo luminoso es menor a 50 lm.

²Cuando el flujo luminoso es menor a 100 lm.

sin perder la alineación entre este y el centro fotométrico de la lámpara. También cuenta con 2 formas de soportar la lámpara por lo cual el actual goniofotómetro se puede considerar de tipo B o de tipo C.

- El anexo D muestra un ejemplo de reporte que el laboratorio puede realizar.

Bibliografía

- [1] R. J. M. J. Vogels (auth.) W.D. van Driel X.J. Fan (eds.) T. de Groot, T. Vos. *Solid State Lighting Reliability: Components to Systems*. Solid State Lighting Technology and Application Series 1. Springer-Verlag New York, 1 edition, 2013.
- [2] Yukio Narukawa, Masatsugu Ichikawa, Daisuke Sanga, Masahiko Sano, and Takashi Mukai. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *Journal of physics D: Applied physics*, 43(35):354002, 2010.
- [3] Fairchild M. *Color appearance models*. The Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology. Wiley, 2ed edition, 2005.
- [4] Peter Robert Boyce. *Human factors in lighting*. Crc Press, 2014.
- [5] Christian Sterken and Jean Manfroid. *Astronomical photometry: a guide*, volume 175. Springer Science Business Media, 2012.
- [6] Mark Stanley Rea Illuminating Engineering Society of North America. *IESNA Lighting Handbook*. Illuminating Engineering, 9 edition, 2000.
- [7] Comission Internationale de l'Eclairage. Colorimetry. *Central Bureau of the CIE, Vienna*, (15.3), 2004.
- [8] Comission Internationale de l'Eclairage. The basis of physical photometry. *Central Bureau of the CIE, Vienna*, (18.2), 1983.
- [9] Teresa Goodman. Mesopic Photometry for SSL. In *Metrology for Solid State Lighting*, Teddington, UK, 24 Abril de 2013. National Physical Laboratory.
- [10] E. Fred Schubert. *Light Emitting Diodes*. Cambridge University Press, 2 edition, 2006.
- [11] Puolakka M. Halonen L. CIE and mesopic photometry. In *Workshop 27th session CIE*, Sun city; South Africa, 9-16 Julio del 2011.
- [12] Myke Rolan Ruiz Prado. Diseño y Contruccion de Goniofotómetro. Tesis para optar el título de ingeniero, Universidad Nacional de Ingeniería-Facultad de Ciencias, 2007.
- [13] Yoshihiro Ohno. Nist measurement services: Photometric calibrations. *NIST Special publication*, 250:37, 1997.

- [14] Janos Schanda. *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Wiley-Interscience, 1 edition, 2007.
- [15] Michael Bukshtab (auth.). *Applied Photometry, Radiometry, and Measurements of Optical Losses*. Springer Series in Optical Sciences 163. Springer Netherlands, 1 edition, 2012.
- [16] Ph.D G Hunt; Michael Pointer. *Measuring colour*. Wiley-IS & T series in imaging science and technology. Wiley, 4 edition, 2011.
- [17] Alan Robertson Noboru Ohta. *Colorimetry: Fundamentals and Applications (The Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology)*. 1 edition, 2006.
- [18] Comission Internationale de l'Eclairage. International lighting vocabulary. *Central Bureau of the CIE, Vienna*, (017/E), 2011.
- [19] A. R. Robertson. Computation of correlated color temperature and distribution temperature. *Journal of the Optical Society of America*, 58, 1968.
- [20] Raymond L.; Romero Javier Hernández-Andrés, Javier; Lee. Calculating correlated color temperatures across the entire gamut of daylight and skylight chromaticities. *Applied Optics*, 38, 1999.
- [21] Comission Internationale de l'Eclairage. Measurement of leds. (127), 2007.
- [22] F Sametoglu. Construction of two-axis goniophotometer for measurement of spatial distribution of a light source and calculation of luminous flux. *Acta Physica Polonica A*, 119(6):783–791, 2011.
- [23] Patrick Mottier. *LEDs for Lighting Applications*. Wiley-ISTE, 1 edition, 2009.
- [24] Comission Internationale de l'Eclairage. The photometry and goniophotometry of luminaires. *Central Bureau of the CIE, Vienna*, (121), 1996.
- [25] Yoshi Ohno. OSA Handbook of Optics, Volume III Visual Optics and Vision Chapter for Photometry and Radiometry. *Optical Technology Division*, 1999.
- [26] Labsphere. A guide to integrating sphere radiometry & photometry. *Labsphere Technical Guide, Labsphere Inc.*
- [27] Labsphere. RSA-FO-150 Fiber optic reflectance spectroscopy Accessory. *Labsphere Technical Guide, Labsphere Inc.*

- [28] Sheng Liu and Xiaobing Luo. *LED packaging for lighting applications: design, manufacturing, and testing*. John Wiley & Sons, 2011.
- [29] Shuji Nakamura. InGaN-based blue/green LEDs and laser diodes. *Advanced Materials*, 8(8):689–692, 1996.
- [30] Brian Howard, Seth Leitman, and William Brinsky. *Green lighting*. McGraw Hill Professional, 2010.
- [31] Gao Y. Shama R. Hu E.L. DenBaars S.P. Fujii, T. and S. Nakamura. Increase in the extraction efficiency of gan-based light-emitting diodes via surface roughening. *Applied Physics Letters*, 84(6):855–857, 2004.
- [32] IESNA. IES LM-79-08: ELECTRICAL AND PHOTOMETRIC MEASUREMENTS OF SOLID-STATE-LIGHTING PRODUCTS. Technical report, 2008.
- [33] International Electrotechnical Commission. *IEC/TS 62257-9-5, Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification - Part 9-5: Integrated systems - Selection of stand-alone lighting kits for rural electrification*. 2 edition, 2012.
- [34] S. V. Gupta (auth.). *Measurement Uncertainties: Physical Parameters and Calibration of Instruments*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1 edition, 2012.
- [35] Enrique Villa Diharce. El número efectivo de grados de libertad. In *Simposio de Metrología 2004*. Centro de Investigación en Matemáticas, A. C., 25 al 27 de Octubre.
- [36] Jorge Luis De La Cruz-Oré. ¿ Qué significan los grados de libertad? *Revista Peruana de Epidemiología*, 17(2):1–6, 2013.
- [37] Glenn D Boreman. *Fundamentos de electro-óptica para ingenieros*, volume 37. SPIE Press, 1999.
- [38] Gamma Scientific. <http://www.gamma-sci.com>, revisado el 22 de Octubre de 2015.
- [39] Photometric Solutions International Pty Ltd. <http://www.photometricsolutions.com>, revisado el 22 de Octubre de 2015.
- [40] Lisun Group. <http://www.lisungroup.com>, revisado el 22 de Octubre de 2015.

Anexos

A. Anexo A: Procedimiento en la evaluación de los sistemas pico-fotovoltaicos en el laboratorio de fotometría UNI

Este procedimiento esta basado en la referencia [33] y en la experiencia del laboratorio de fotometría.

Tabla 29: Datos obtenidos por reconocimiento visual.

	Incluida (Sí/No)	Tipo	Idioma	Comentarios
Manual de usuario				
Duración de la garantía (meses)				
Términos y condiciones de la garantía				
	Kit	Lista de componentes		
Producto completo				
Cable	Longitud (m)	Descripción		
1				
Componentes	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Descripción
Lámpara				
Batería				
...				
Lámpara	Tipo	Número de puntos de luz	Número de arreglos o niveles de intensidad	Descripción
1				
2				
Componente	Número de indicadores	descripción		
Lámpara				
Batería				
...				
Radio (Sí/No)				
Cargador de celular				
<i>continua en la siguiente página</i>				

Otro accesorio					
Mecanismo de carga	Soportado	Tipo	Descripción		
Independiente					
Central					
Módulo Fotovoltaico	Largo (cm)	Ancho (cm)	Área activa (cm ²)	Forma/Tipo	
Información adicional					
¿Puede el dispositivo estar encendido mientras se carga con el modulo fotovoltaico?					
Especificaciones del producto	Fuente de información				
	Fuera del empaque	Dentro del empaque	En el componente	Otra	Otra fuente
Química de la batería					
Capacidad de la batería (mAh)					
Voltaje nominal de la batería (V)					
Tipo de lámpara					
Voltaje de protección de descarga profunda (V)					
Voltaje de protección de sobrecarga (V)					
Módulo solar, potencia pico (W)					
Módulo solar, voltaje de circuito abierto, Voc (V)					
<i>continua en la siguiente página</i>					

Módulo solar, corriente de corto circuito, I_{sc} (A)					
Módulo solar, voltaje de máxima potencia (V)					
Módulo solar, corriente de máxima potencia (A)					
Especificaciones de tiempo de funcionamiento	Arreglo de lámparas	Fuente de información			
		Fuera de la caja	Dentro de la caja	Otra fuente	Otro
Tiempo de funcionamiento con batería llena					
Flujo luminoso (lm)					
Características de las piezas	Lámpara	Controlador de carga	Módulo solar	otro	
Tornillo (Sí/No)					
Pegamento (Sí/No)					
Cinta (Sí/No)					
Correa/Sujetador (Sí/No)					
Otro (Sí/No)					
Facilidad para reemplazar la batería (Sí/No)					
Facilidad para reemplazar el circuito impreso (Sí/No)					
Fotografía-Propiedades					
<i>continua en la siguiente página</i>					

Fotografía-Especificaciones
Fotografía-Funcionamiento interno

A.0.1. Evaluación de la batería

La evaluación de la batería consiste en hallar:

la capacidad de la batería y la eficiencia de la misma.

Para hallar estas características debemos, en primer lugar, descargar totalmente la batería luego cargarla por completo y finalmente descargarla por completo. La carga y la última descarga son las que nos servirán para nuestro objetivo.

El ambiente debe ser de 20°C, si no se puede controlar la temperatura ambiente, esta se debe medir y reportarse.

Después de que la batería se haya cargado o descargado deben estar en reposo por lo menos 1 hora y como máximo 10 horas antes de realizar otro proceso.

A.0.2. Descarga completa de la batería

El proceso de descarga completa se realizará por medio del controlador del DUT (device under test), como muestra la figura 46. Se mide el voltaje en la batería y la corriente que llega a ella, estas mediciones se realizan cada minuto. La corriente se mide usando un shunt de $10\text{ m}\Omega \pm 0,01\%$.

Los cables utilizados deben ser menores a 1 m de longitud para evitar una caída de

potencial considerable.

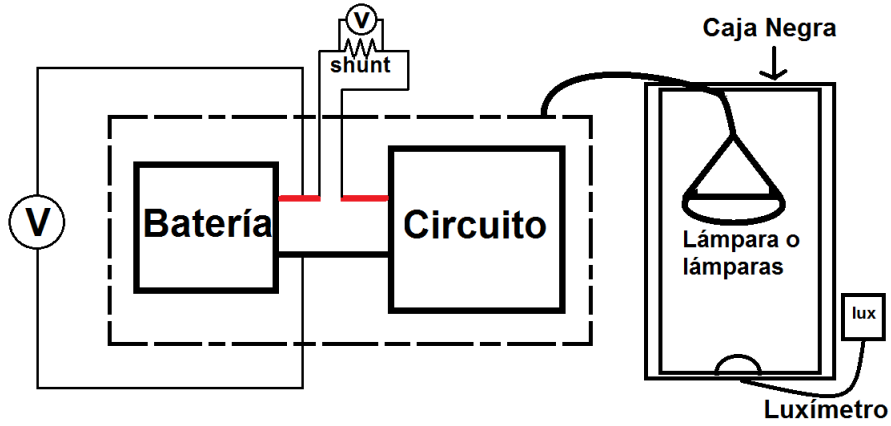


Figura 46: Proceso de descarga completa de la batería.

Se utilizará como carga la lámpara o lámparas, del DUT, en la posición en la cual tengan mayor iluminancia. La descarga se detendrá en 3 casos:

- Cuando la lámpara o lámparas se hayan apagado por completo.
- Cuando el voltaje de descarga por celda sea igual o menor al “voltaje de protección de descarga profunda” mostrado en la tabla 30.
- Cuando la corriente sea menor o igual al 1 % de la corriente inicial de descarga.

A.0.3. Carga Completa de la batería

El proceso de carga será similar al proceso de descarga, usando el mismo circuito, pero quitando la lámpara(s) y adicionando una fuente de poder que estará conectado al DUT a través del controlador, como muestra la figura 47.

Los cables utilizados deben ser menores a 1 m de longitud para evitar una caída de potencial considerable.

La fuente de poder debe estar limitada al voltaje de máxima potencia (V_{mp}) y a la corriente de máxima potencia (I_{mp}) del correspondiente panel fotovoltaico.

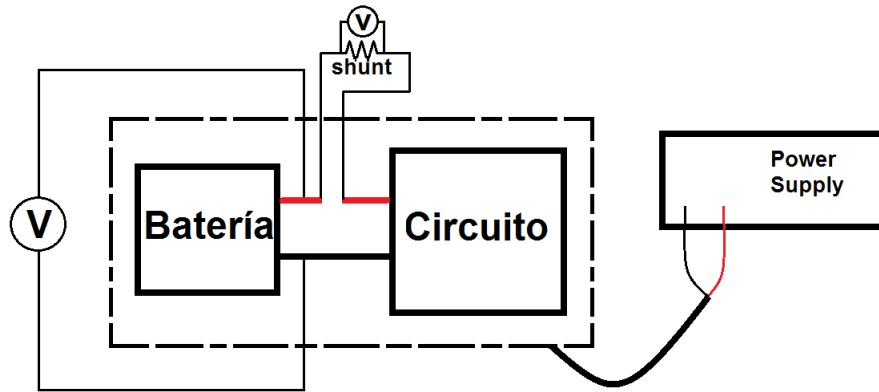


Figura 47: Proceso de carga completa.

En el proceso de carga se debe medir el voltaje en la batería y la corriente que llega a ella cada minuto.

El proceso se detiene por 3 motivos:

- El controlador evita que la batería se cargue llevando la corriente a 0.
- El voltaje en la batería iguala o supera el voltaje máximo de carga (ver tabla 30).
- La razón de carga es igual o menor a la razón tope de carga (ver tabla 30).

Tabla 30: Especificaciones recomendadas para el cuidado de las baterías [33].

Tipo de batería	Voltaje máximo en reposo (V)	Voltaje máximo en carga (V)	Fin de carga /razón tope de carga (A)	Voltaje de protección de descarga profunda (V/cell) $\pm 0,05$
Plomo-ácido	2,25	2,40	0,05 It	1,00
Ion- Litio	4,05	4,10	0,05 It	3,00
Litio ferro-fosfato	3,55	3,60	0,01 It	2,00

A.0.4. Cálculos y resultados

Del proceso de carga se obtiene la energía (E_c) que se pudo almacenar en la batería. Las ecuaciones usadas son:

$$E_c = \sum_i (V_{c,i} \times I_{c,i} \times \delta t) \quad (84)$$

donde

- $I_{c,i}$ es la corriente en el proceso de carga en el instante i, en Amperios (A).
- $V_{c,i}$ es la voltaje en el proceso de carga en el instante i, en Voltios (V).
- δt , es el intervalo entre dos subsecuentes datos obtenidos, en horas (h).

Del proceso de descarga se obtiene la capacidad de la batería (C_d) y energía extraída (E_d) que se pudo almacenar en la batería. Las ecuaciones usadas son:

$$C_d = \sum_i (I_{d,i} \times \delta t) \quad (85)$$

$$E_d = \sum_i (V_{d,i} \times I_{d,i} \times \delta t) \quad (86)$$

donde

- $I_{d,i}$ es la corriente en el proceso de descarga en el instante i, en Amperios (A).
- $V_{d,i}$ es la voltaje en el proceso de descarga en el instante i, en Voltios (V).
- δt , es el intervalo entre dos subsecuentes datos obtenidos, en horas (h).

Por último se obtiene la eficiencia de la batería (η_b) usando la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{E_d}{E_c} \quad (87)$$

A.0.5. Evaluación del DUT con la batería completamente cargada

Antes de comenzar este procedimiento debemos tener en cuenta ciertos términos y procedimientos que se utilizaran. Los términos son:

Flujo luminoso inicial: Flujo luminoso después de encender la lámpara en cuestión por 20 minutos, a menos que el evaluador diga lo contrario. Es el punto en el cual el flujo luminoso relativo toma el valor de 100 %.

Punto L70: Cuando el flujo luminoso de la lámpara ha disminuido un 30 % a partir del flujo inicial.

Proceso L70: Proceso que inicia cuando el DUT tiene un flujo luminoso relativo de 100 % (flujo luminoso inicial) y termina cuando se llega al punto L70.

En este proceso se desea obtener:

- Periodo de tiempo en horas hasta llegar al punto L70
- Salida de luz promedio durante todo el periodo hasta el punto L70.
- Punto de operación promedio, voltaje promedio y corriente promedio.
- Energía removida de la batería hasta llegar al punto L70.
- Potencia utilizada hasta llegar al punto l70.
- Presencia de protección de descarga profunda.
- Voltaje de protección de descarga.

A.0.6. Procedimiento del DUT hasta el punto L70

Este procedimiento está basado parcialmente en la norma EC TS62257-9-5 segunda edición y en la experiencia que se ha ido recogiendo a través de los años en el laboratorio de fotometría de la UNI y sigue como:

- Cargar la batería completamente (A.0.3.) usando el controlador de carga. Cuando la batería está totalmente cargada esperar entre 1 y 10 horas para continuar con la descarga.
- Descargar la batería usando una lámpara como carga en una caja cuyas paredes internas no permitan la reflexión. Se debe tomar valores del flujo luminoso relativo usando un luxómetro (tanto la lámpara como el luxómetro deben estar en lugares fijos), voltaje y corriente en la batería. A partir de esto se cuenta con 3 opciones:
 - EL DUT cuenta con más de una lámpara y cada lámpara solo cuenta con un nivel de iluminación. En este caso se repite el proceso de carga y descarga igual veces que el número de lámparas que el DUT posee y una adicional con todas las lámparas como carga.
 - La lámpara que el DUT posee tiene diferentes niveles de iluminación. Si este es el caso se debe repetir el proceso de carga y descarga para los dos niveles de mayor iluminación.
 - Si el DUT tiene ambas características mencionadas en los puntos anteriores se debe evaluar cada lámpara con los 2 niveles de mayor iluminación.
- La opción donde haya mayor consumo eléctrico debe realizarse al final y servirá para verificar la protección de descarga profunda.
- El proceso de descarga se caracteriza por 3 etapas. La primera es el periodo donde se enciende la lámpara hasta 20 minutos después (Tiempo donde el flujo luminoso

relativo es 100 %), la segunda etapa comienza después de encender la lámpara por 20 minutos hasta que el flujo luminoso relativo alcanza el 70 % (Este punto es llamado L 70), la tercera etapa inicia después de llegar a L70 y termina cuando el flujo luminoso relativo alcanza un 10 % o menos. Después de la tercera etapa acaba el procedimiento.

A.1. Cálculos del DUT hasta llegar al punto L70

En este punto se desean obtener todas las características posibles DUT hasta que llegue al punto L70.

- Tomar nota del tiempo transcurrido desde el que el flujo relativo es 100 % hasta que llega al 70 % (L70).
- Realizar una gráfica donde el eje Y sea el flujo luminoso relativo y el eje X sea el tiempo en minutos. Comenzar de $t=0$, cuando $t=20$ el flujo luminoso relativo será igual a 100 %.
- Para hallar la potencia promedio hasta que se llega al L70

$$P_{b,i} = \frac{\sum_i (I_{b,i} \times V_{b,i})}{n} \quad (88)$$

donde

- $P_{b,i}$: es la potencia promedio que se extrae de la batería durante el proceso L70 (W).
 - $I_{b,i}$: Es la corriente que se va extrayendo de la batería durante el proceso L70 (A).
 - $V_{b,i}$: Es el voltaje en la batería a medida que se realiza el proceso L70 (V).
 - n : Es el número total de medidas de corriente y voltaje durante el proceso L70.
- Para hallar la energía extraída de la batería durante el proceso L70:

$$E_{b,i} = \sum_i (V_{b,i} \times I_{b,i} \times \delta t) \quad (89)$$

- $E_{b,i}$: es la energía promedio que se extrae de la batería durante el proceso L70 (Wh).
- $I_{b,i}$: Es la corriente que se va extrayendo de la batería durante el proceso L70 (A).

- $V_{b,i}$: Es el voltaje en la batería a medida que se realiza el proceso L70 (V)
 - Δt : Es el intervalo de tiempo entre dos datos subsecuentes en horas.
- Determinar el flujo luminoso relativo promedio hasta que se llegó al L70.
 - Hallar la corriente y voltaje promedio hasta que se llega al punto L70. Estos valores son denominados voltaje y corriente de operación promedio.

Para saber que el DUT tiene protección contra una descarga profunda tienen que ocurrir 2 cosas, la primera es que el voltaje en la batería no debe ser menor al establecido en la tabla 31 y debe tener uno de los siguientes comportamientos:

- Ocurre una caída abrupta del flujo luminoso relativo y la corriente, y ambos llegan a cero rápidamente.
- El flujo luminoso relativo y la corriente decaen relativamente rápido y llegan a 0.

Tabla 31: Voltaje mínimo de protección de descarga profunda dependiendo de su composición.

Química de la batería	Mínimo voltaje de descarga profunda por celda (V)
Plomo-ácido	$1,87 \pm 0,05$
NiMH	$1,00 \pm 0,05$
NiCd	$1,00 \pm 0,05$
Li-ión	$3,00 \pm 0,05$
$LiFePO_4$	$2,00 \pm 0,05$

A.1.1. Flujo luminoso y distribución de la intensidad luminosa

Una fuente de poder debe reemplazar la batería como muestra la imagen 48 a menos que la variación del flujo luminoso del DUT no tenga un cambio significativo durante toda la evaluación fotométrica. El uso de condensadores es opcional y su función es eliminar, si es que lo hubiera, interferencia electrónica entre el DUT y la fuente de voltaje.

El voltaje que se debe aplicar al DUT debe ser el voltaje de operación promedio.

A.1.2. Evaluación del flujo luminoso

La evaluación del flujo luminoso se lleva a cabo usando una esfera integradora o el goniómetro.

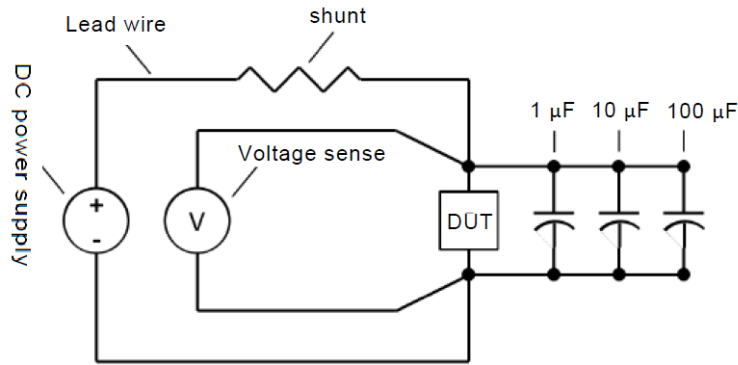


Figura 48: Esquema eléctrico para la evaluación de la distribución de la intensidad luminosa y del flujo luminoso [33].

A.1.3. Evaluación de la distribución luminosa

Antes de realizar la evaluación de la distribución luminosa se debe reconocer el tipo de lámpara que se va a evaluar.

- Luz ambiental: Es aquella lámpara que tiene un gran ángulo de apertura u omnidireccional
- Lámpara para tareas: Aquella lámpara cuya función es iluminar cierta zona en particular, generalmente va suspendido sobre la zona que se desea iluminar
- Lámpara de escritorio: Aquella lámpara que se ubica sobre un escritorio o mesa para iluminarla.

En cualquiera de los 3 casos se trabaja con el nivel más alto de intensidad.

Caracterización de la luz ambiental Los procedimientos que sirven para evaluar este procedimiento en el laboratorio son el goniofotómetro y el disco rotatorio. En ambos casos se debe usar el esquema para la alimentación mostrado en la figura 48.

El uso del disco rotatorio se basa en el siguiente esquema donde la lámpara gira ciertos ángulos para obtener la distribución de la intensidad luminosa en un plano dado (figura 49):

Caracterización de lámparas de tarea Para la caracterización de las lámparas de tareas se aplica el método iluminancia en un plano que se basa en suspender la lámpara 0,75 m del nivel del fotómetro y medir la iluminancia en 1 m^2 (figura 50). La iluminancia

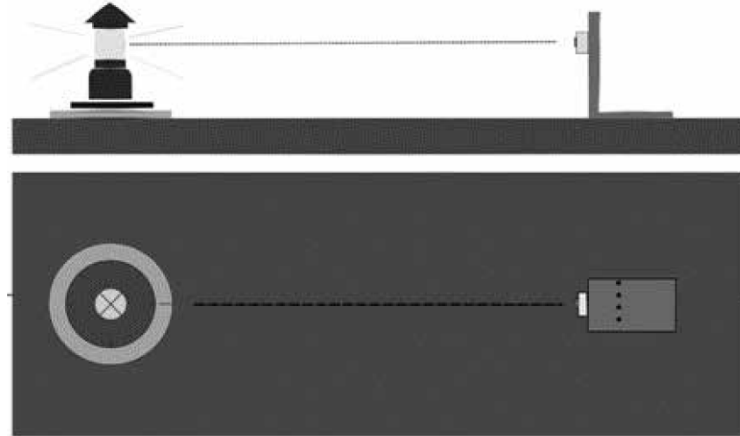


Figura 49: Esquema del funcionamiento del disco rotatorio [33].

será medida en una red compuesta por 100 puntos equidistantes que componen el área de $1m^2$.

Los datos obtenidos son:

- El ángulo del FWHM, que es el ángulo en el que la iluminancia ha disminuido a la mitad
- La iluminancia promedio en el metro cuadrado
- El área utilizable en función de la iluminancia máxima.

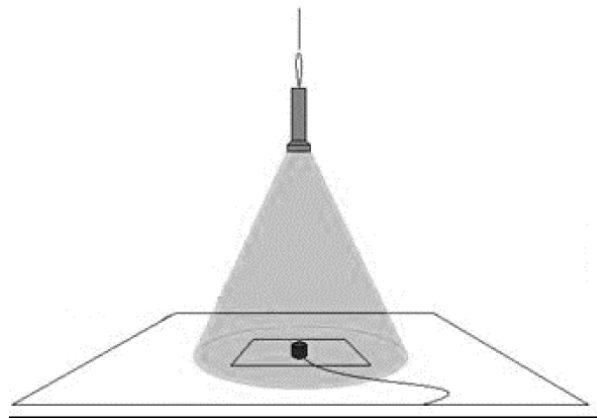


Figura 50: Esquema para la evaluación de las lámparas de tarea [33].

Caracterización de lámparas de escritorio El procedimiento se basa en medir la iluminancia tal como muestra la figura 51. Se debe medir en cada cuadrado, la red está compuesta por 100 puntos.

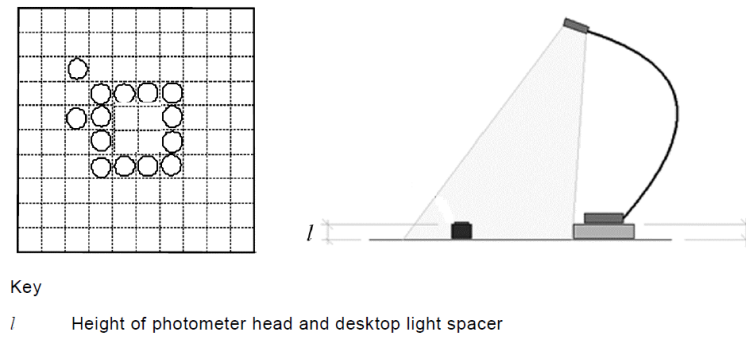


Figura 51: Esquema para la evaluación de las lámparas de escritorio [33].

B. Anexo B: Apariencia del programa CCT-lab, del programa de control del goniofotómetro y del programa Gonio-lab

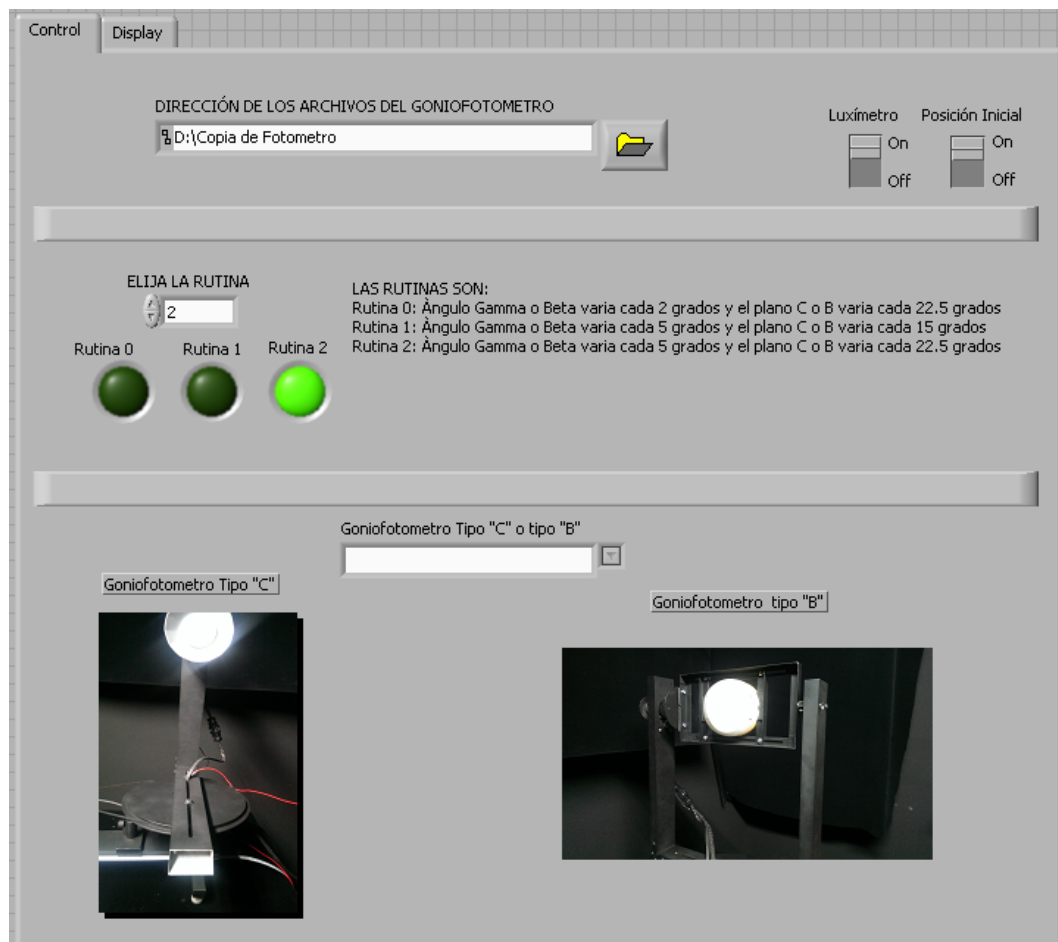


Figura 52: Apariencia del programa para el manejo del goniofotómetro.

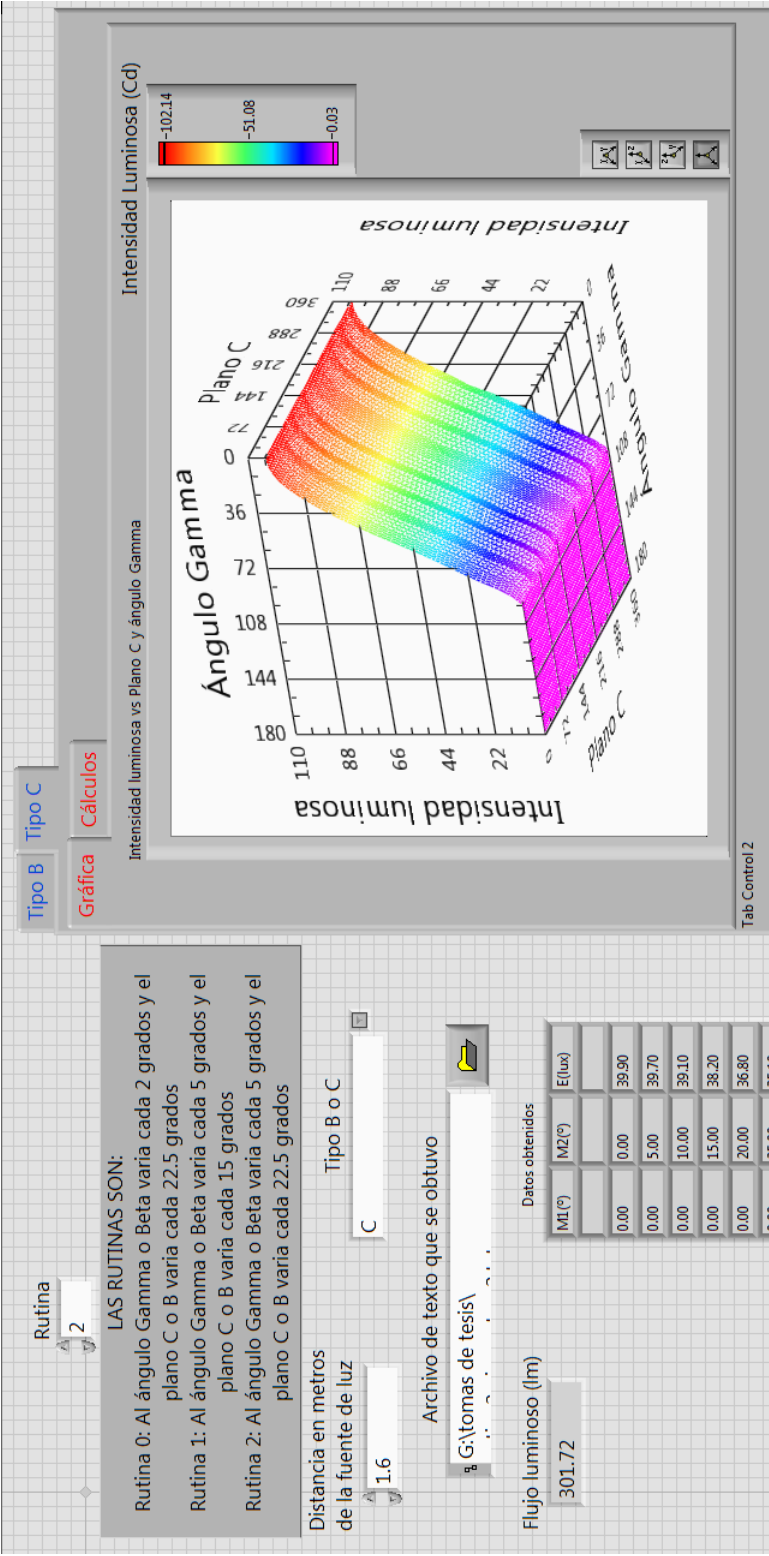


Figura 53: Apariencia del programa para la obtención de resultados del goniofotómetro.

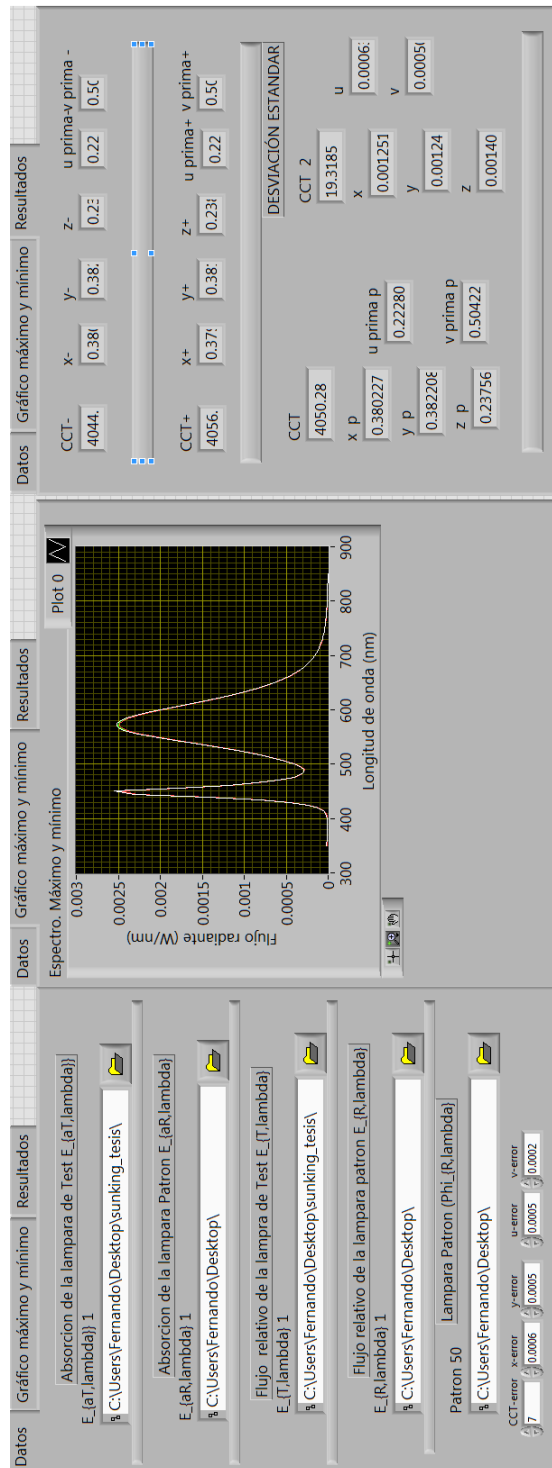


Figura 54: Apariencia del programa CCT-lab.

C. Anexo C: Informe del programa de la esfera LMS-400 de las lámparas Zimpertec, Sun King Pro y OSRAM

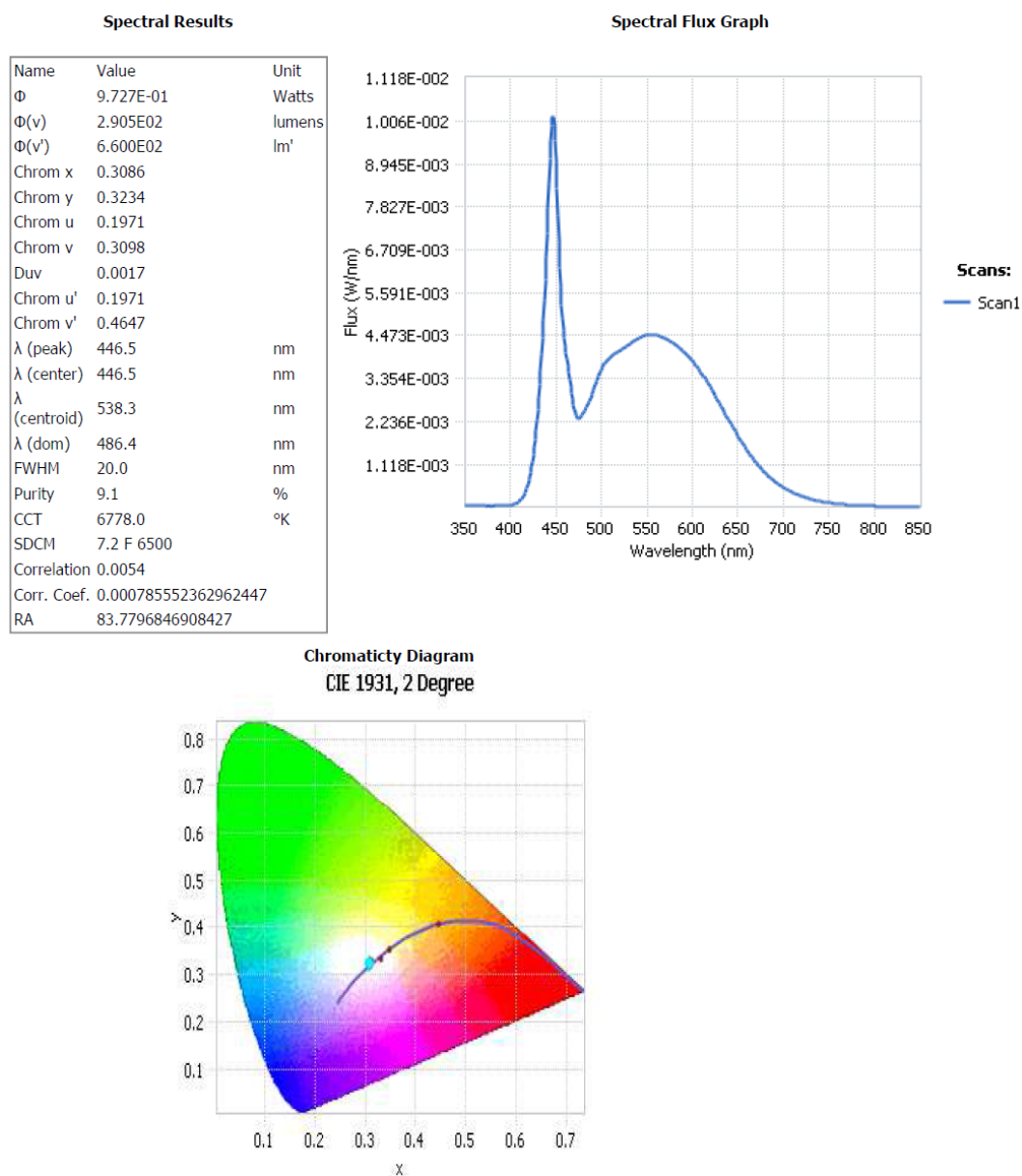


Figura 55: Resultados de la lámpara Zimpertec realizada por la esfera LMS-400.

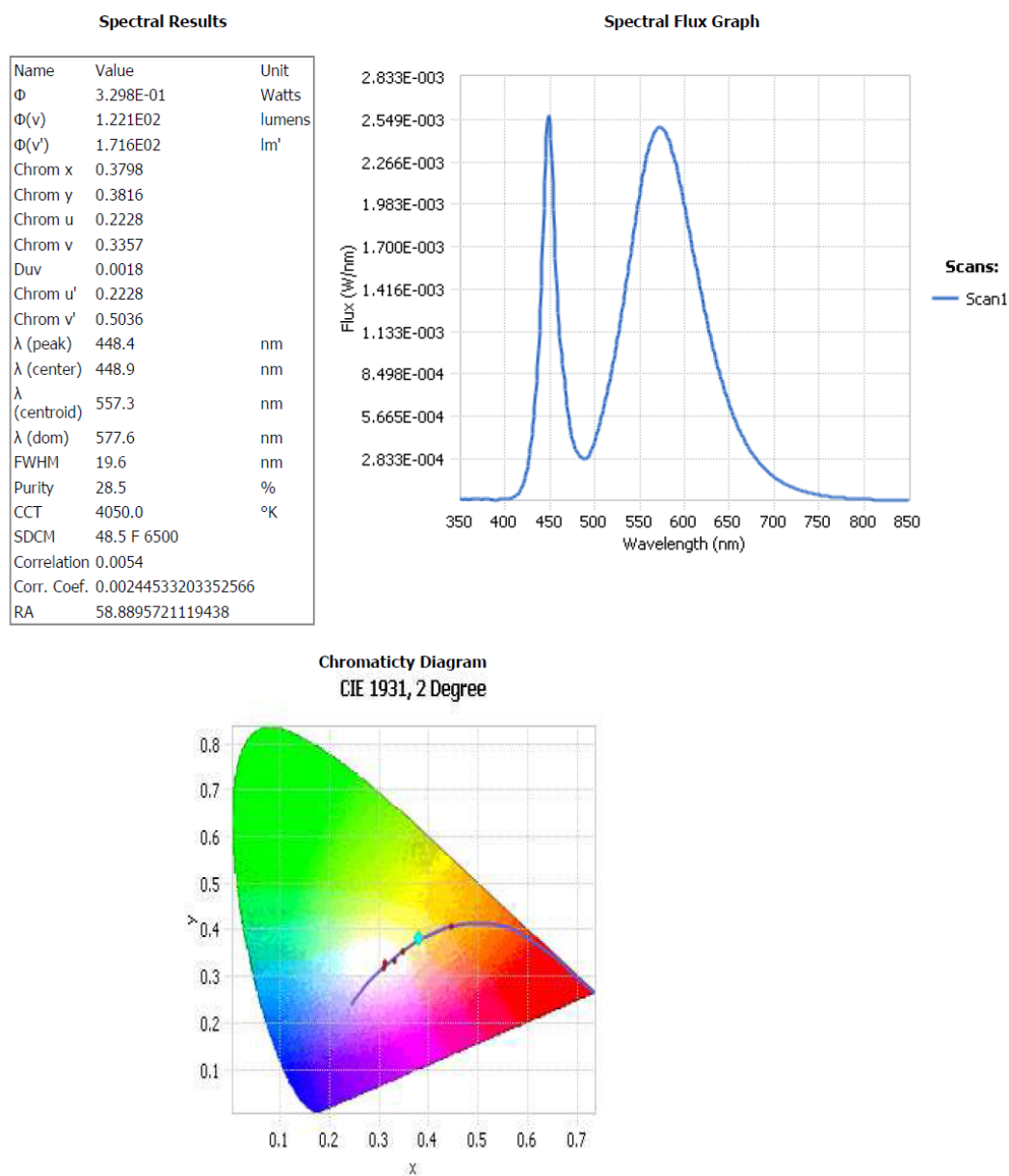


Figura 56: Resultados de la lámpara Sun King Pro realizada por la esfera LMS-400.

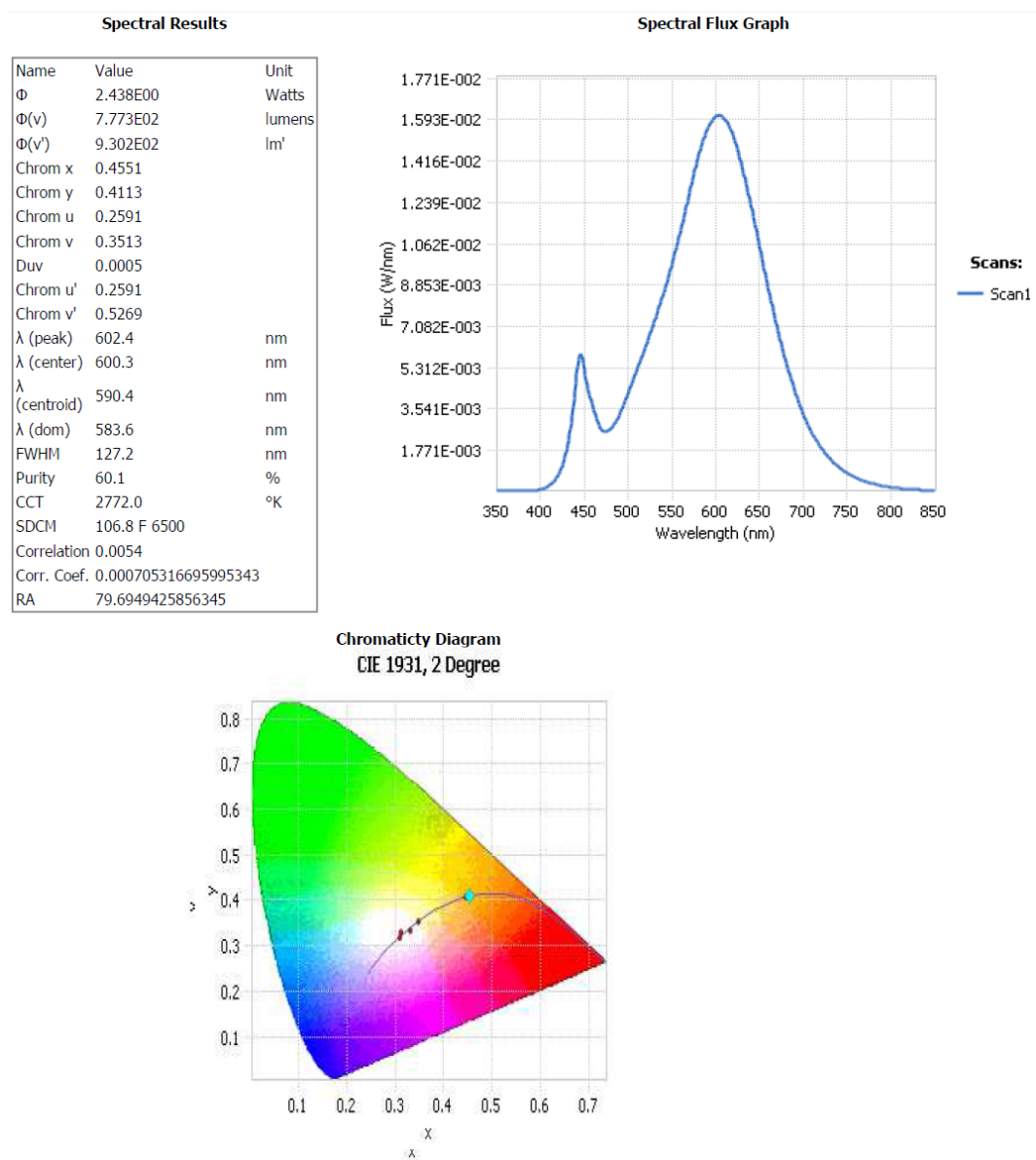


Figura 57: Resultados de la lámpara OSRAM realizada por la esfera LMS-400.

D. Anexo D: Reporte de la lámpara Zimpertec

LABORATORIO DE FOTOMETRÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA



Evaluación de la lámpara Zimpertec

Informe: LF-151023

23 de Octubre, 2015

Preparado por

Lic. Fernando Oscco

Aprobado por

Dr. Manfred Horn

Resumen

La lámpara Zimpertec es una lámpara LED que produce 291 lm de flujo luminoso consumiendo 3,02 W de potencia eléctrica. La lámpara por tal motivo tiene una eficacia de 96 lm/W con una temperatura de color de 6678 K.

Tabla 32: Resultados más relevantes de la evaluación realizada.

Característica	Resultado
Flujo luminoso total ¹ (lm)	291
Potencia eléctrica ¹ (W)	3,02
Eficacia ¹ (lm/W)	96
Voltaje ¹ (V)	12,00
CCT ¹ (K)	6778
CRI-Ra ¹	80
Cromaticidad ¹ (x-coord.)	0,3086
Cromaticidad ¹ (y-coord.)	0,3234
Tiempo de estabilización ¹ (minutos)	30

Inspección Visual

La figura 58 muestra la lámpara recibida la cual no muestra daños físicos aparentes.



Figura 58: Lámpara recibida para su evaluación.

¹El resultado fue obtenido por el uso de la esfera integradora.

Resultados de las pruebas

Los resultados mostrados en la tabla 33 fueron obtenidos después de un periodo de 30 minutos en los cuales la lámpara se estabilizo.

Tabla 33: Resultados.

Características fotométricas	Esfera Integradora	Goniofotómetro
Flujo luminoso total (lm)	$290,5 \pm 3 \%$	$298,1 \pm 5 \%$
Eficacia (lm/W)	$96,19 \pm 3,5 \%$	$98,71 \pm 5,5 \%$
Temperatura de color correlacionada - CCT (K)	6778	
Indice de rendimiento de color -CRI	84	
Cromaticidad(x-coord/y-coord)	0,3086/0,3234	
Cromaticidad(u'-coord/v'-coord)	0,1971/0,4647	
Tiempo de estabilización (minutos)	30	30
Características eléctricas	Esfera Integradora	Goniofotómetro
Potencia eléctrica (W)	$3,02 \pm 0,02$	
Voltaje (V DC)	$12,00 \pm 0,01$	
Corriente (mA DC)	252 ± 1	
Información adicional	Esfera Integradora	Goniofotómetro
Humedad relativa	menor a 70 %	menor a 73 %
Temperatura ambiente (°C)	22 ± 1	22 ± 1
Detector	Espectrofotómetro CDS-1100	Luxómetro Mavolux 5032-B
¿Se usó la corrección debido a la auto-absorción?	Sí	—

Flujo espectral y diagrama de cromaticidad

La figura 59 muestra el flujo espectral de la lámpara y el diagrama de cromaticidad donde se aprecia las coordenadas $x/y=0,3086 / 0,3234$ correspondientes a la lámpara.

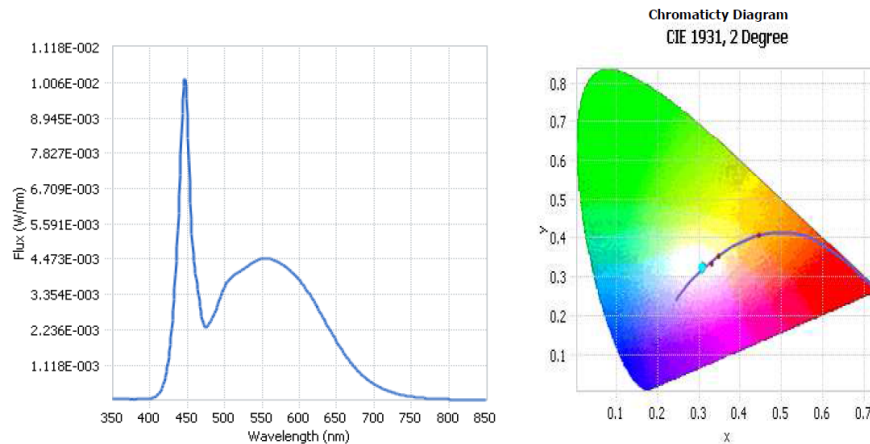


Figura 59: Flujo espectral de la lámpara y diagrama de cromaticidad donde se aprecia las coordenadas de cromaticidad de la lámpara.

Diagrama polar de la distribución de la intensidad luminosa

La figura 60 se muestra las curvas de distribución de la intensidad luminosa de la lámpara en los planos $C=0^{\circ}$ - 180° y $C=90^{\circ}$ - 270° .

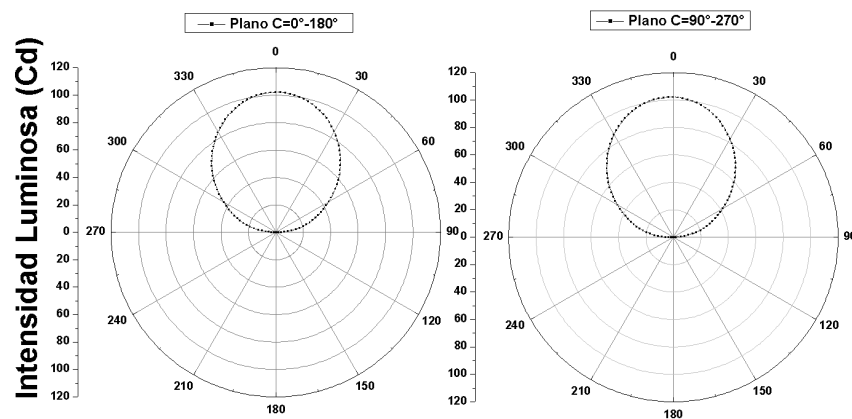


Figura 60: Distribución de la intensidad luminosa en los planos $C=0^{\circ}$ - 180° y $C=90^{\circ}$ - 270° .

Diagrama en 2D y 3D de la distribución de la intensidad luminosa

La figura 61 se aprecia la distribución de la intensidad luminosa en el plano C y el ángulo gamma en 2D y 3D.

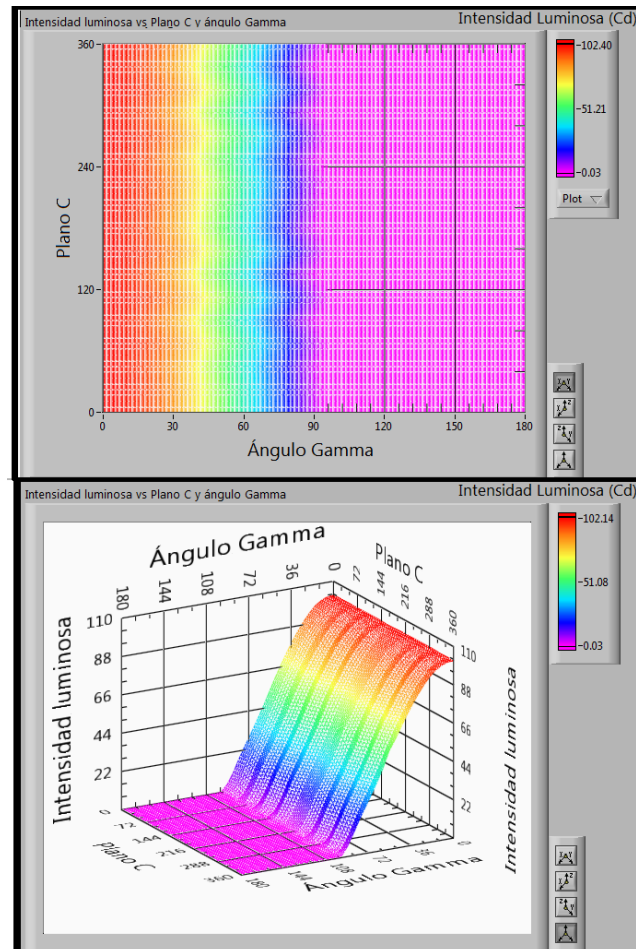


Figura 61: Imagen de la distribución en 2D (arriba) y en 3D (abajo) de la intensidad luminosa en el plano C y ángulo gamma.

Zonas de distribución del flujo luminoso

La tabla 34 muestra que porcentaje del flujo luminoso total se encuentra en un determinado ángulo de apertura.

Tabla 34: Zona de iluminación.

Zona de iluminación (°)	Porcentaje
0-10	18
10-20	17
20-30	16
30-40	14
40-50	12
50-60	9
60-70	7
80-90	4
90-100	2
100-180	0

Equipo utilizado

La tabla 35 muestra el equipo utilizado y algunas de sus características.

Tabla 35: Equipo utilizado.

Equipo	Empresa y modelo	Breve descripción
Esfera integradora	Labsphere, LMS-400	Esfera integradora de 1 m de diámetro
Espectroradiómetro	Labsphere, CDS-1100	Resolución de 1 nm de 350 a 1050 nm
Lámpara patrón	Labsphere, SCL-050-A41	
Goníofotómetro	de fabricación propia	Puede tener una geometría tipo C- γ o B- β
Fuente de voltaje	ATTEN, TPR-3010S	
Multímetro	PRASEK, PR-61D	
Multímetro	Fluke, 45	
Shunt	Bader, de 10m Ω	Incertidumbre de 0.1 %