

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica**

**ESTUDIO DEL GONIOFOTÓMETRO MARCA
PSI DEL LAFTLA PARA MEDICIONES
FOTOMÉTRICAS**

Por:

JOHN I. ROSSES MONGE

**Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
Febrero de 2020**

ESTUDIO DEL GONIOFOTÓMETRO MARCA PSI DEL LAFTLA PARA MEDICIONES FOTOMÉTRICAS

Por:

JOHN I. ROSSES MONGE

Sometido a la Escuela de Ingeniería Eléctrica
de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad de Costa Rica
como requisito parcial para optar por el grado de:
LICENCIADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Aprobado por el Tribunal:

Ing. LOCHI YU LO
Director, Escuela de Ingeniería Eléctrica

Ing. LUIS D. MARÍN NARANJO
Director, Comité Asesor

Ing. Heyleen Villalta Mayetta
Miembro, Comité Asesor

Ing. Luis Poveda Wong
Miembro, Comité Asesor

Ing. Jaime Cascante Vindas
Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi madre Isabel y a mi hermano Jean Carlo por ser los pilares de mi vida y conducirme a ser la persona que soy.

A mis profesores Luis Diego Marín y Jaime Cascante quienes se interesaron en enseñarme y me mostraron el camino de la fotónica la cual marcó mi carrera en la ingeniería eléctrica.

A mis lectores Luis Poveda y Heyleen Villalta por corregir mis errores en este proceso y ayudarme a crecer.

A mis amigos quienes me ayudaron a salir de los momentos difíciles sacándome de mis problemas para volver a ellos con más fuerza.

A mis compañeros de Universidad por acompañarme durante todo este camino.

A todos los que me apoyaron para elaborar y concluir esta tesis.

Gracias.

RECONOCIMIENTOS

A la Universidad de Costa Rica por brindarme la oportunidad de desarrollar mis capacidades, competencias y optar por el Grado de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica. Además, por ayudarme a formar un juicio humanista y por siempre velar por el bienestar de sus estudiantes.

También quiero dar reconocimiento al LAFTLA de Ingeniería Eléctrica que es ahí donde conocí el mundo de la fotónica, fue ahí donde elaboré mi proyecto brindándome todas las herramientas necesarias para lograr este trabajo. Al LEE del ICE pues me permitió conocer sus labores y su impacto en la fotometría del país y aportar los elementos necesarios para terminar este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
NOMENCLATURA.....	x
CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Planteamiento del problema.....	2
1.4 Objetivos.....	2
1.4.1 Objetivo general.....	2
1.4.2 Objetivos específicos.....	2
1.4.3 Alcance.....	3
1.5 Metodología.....	4
1.5.1 Primera etapa: Estudio del equipo (20%).....	4
1.5.2 Segunda etapa: Medición (50%).....	4
1.5.3 Tercera etapa: Análisis de resultados (30%).....	4
1.5.4 Procedimiento de evaluación.....	4
CAPÍTULO 2: Desarrollo teórico.....	6
2.1 Conceptos de Fotometría.....	6
2.1.1 La función $V(\lambda)$	6
2.1.2 Flujo luminoso.....	6
2.1.3 Iluminancia.....	7
2.1.4 Ángulo sólido.....	8
2.1.5 Intensidad Luminosa.....	9
2.1.6 Luminancia.....	10
2.1.7 Excitancia luminosa.....	11
2.1.8 Ley del inverso al cuadrado.....	12
2.1.9 Ley del coseno.....	13
2.2 Introducción a la goniometría.....	13
2.2.1 Fotómetro y goniómetro.....	13
2.2.2 Goniómetro.....	14
2.3 Sistema de coordenadas tridimensional.....	15
2.3.1 Sistema tipo A.....	16
2.3.2 Sistema tipo B.....	16

2.3.3	Sistema tipo C	17
2.4	Matriz de intensidades	18
2.5	Curvas fotométricas polares.....	19
2.6	Requisitos de laboratorio para las pruebas	20
2.7	Incertidumbre de la medición	21
2.7.1	Evaluación Tipo A	22
2.7.2	Evaluación Tipo B	22
2.7.3	Incertidumbre combinada	24
2.8	Método de evaluación.....	24
2.9	Goniofotómetro LG-1 marca PSI	25
CAPÍTULO 3: Desarrollo del montaje para la medición		29
3.1	Equipo que conforma el sistema.....	29
3.1.1	Espectroradiómetro SP-3C:	29
3.1.2	Fotocelda y amplificador:	30
3.1.3	Goniómetro:.....	32
3.1.4	Control de Motores:	32
3.1.5	PC:	33
3.2	Montaje	33
CAPÍTULO 4: Software PSI y primeras mediciones		38
4.1	LGcontrol.....	38
4.1.1	Distribución Fotométrica C / Gamma.....	40
4.2	Adquisición de datos.....	41
4.3	Joystick Control	42
4.3.1	Medición del color	43
CAPÍTULO 5: Resultados primeras mediciones		44
CAPÍTULO 6: Medición de luminaria LED del LEE del ICE		48
6.1.	Condiciones ambientales del laboratorio.....	49
6.2	Medición de la bombilla LED marca Phillips	51
6.3	Incertidumbre asociada al equipo	55
6.4	Obtención de las curvas polares y diagramas espectrales de la lámpara LED Phillips de 8 Watts.	57
CAPÍTULO 7: Comparación de resultados		59
CAPÍTULO 8: Conclusiones.....		63
CAPÍTULO 9: Recomendaciones.....		64
BIBLIOGRAFÍA.....		65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Curva $V(\lambda)$ (A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins.2016).....	6
Figura 2.2: Concepto de iluminancia (L. Marín, 2019).....	7
Figura 2.3: Concepto de ángulo sólido (L. Marín, 2019).....	8
Figura 2.4: Concepto de Intensidad Luminosa (L. Marín, 2019).....	9
Figura 2.5: Concepto de luminancia (L. Marín, 2019).....	10
Figura 2.6: Concepto Excitancia luminosa (L. Marín, 2019).....	11
Figura 2.7: Concepto de iluminancia (L. Marín, 2019).....	12
Figura 2.9: Orientación de la Luminaria para goniómetro tipo A (CIE, 1996).....	16
Figura 2.10: Orientación de la Luminaria par goniómetro tipo B (CIE, 1996).....	17
Figura 2.11: Orientación de la Luminaria para goniómetro tipo C (CIE, 1996).....	18
Figura 2.12: Ejemplo de una matriz de intensidades (Sanclemente. 2011.....	19
Figura 2.13: Ejemplos de curvas fotométricas polares (Schwanengel. 2010).....	20
Figura 2.14: Goniómetro LG.01 y espectroradiómetro SP-3C ubicado en el LAFTLA	26
Figura 3.1: Espectroradiómetro SP-3C marca PSI.....	29
Figura 3.2: Esquemático del espectroradiómetro marca PSI.....	30
Figura 3.3: Focelda PSI (derecha e imagen central) y amplificador de corriente (imagen de la izquierda).....	31
Figura 3.4: Goniómetro LG.01 y sus ejes de rotación.....	32
Figura 3.5: Esquema de conexión de datos.....	33
Figura 3.6: Evolución de la mesa móvil.....	34
Figura 3.7: Alineación del eje óptico.....	35
Figura 3.8: Sistema láser implementado para el eje óptico entre el goniómetro y la focelda.....	36
Figura 3.9: Alineamiento de la lámpara con el punto de pivote.....	36
Figura 3.10: Máscara utilizada para medir la luz extraviada.....	37
Figura 4.1: Menú principal del LGcontrol.....	38
Figura 4.2: Detalle de la opción de fotometría tipo C.....	40

Figura 4.3: Ventana de adquisición de datos	42
Figura 4.4: La ventana de control de Joystick	43
Figura 5.1: Fuentes de luz utilizadas como muestra para estudiar las funciones del equipo (a) bombilla incandescente de 100 W (b) bombilla LED de 2 W.....	44
Figura 5.2: Curvas polares de la bombilla incandescente 100 W.....	45
Figura 5.3: Curvas polares de la bombilla LED 2 W.....	46
Figura 5.4: Bombilla incandescente 100 W. (a) espectro de emisión (b) diagrama de cromaticidad.....	47
Figura 5.5: bombilla LED 2 W. (a) espectro de emisión (b) diagrama de cromaticidad.....	47
Figura 6.1: Goniofotómetro del LEE, ICE. (a) Posición cero (b) Medición en elevación a 180 grados.....	48
Figura 6.2: Lámpara de muestra, bombilla LED marca Phillips 8 W	49
Figura 6.3: Valor máximo y mínimo de la temperatura del laboratorio alrededor de la lámpara durante la medición.....	50
Figura 6.4: Ejemplo del valor de la tensión eléctrica utilizada para alimentar la lámpara ...	51
Figura 6.5: Ejemplo de iluminancia medida por la fotocelda durante la hora de estabilización de la bombilla LED marca Phillips 8 W.	52
Figura 6.6: Luz extraviada para cada posición de elevación en pasos de 5 grados	53
Figura 6.7: Curva polar de la bombilla LED Phillips 106-18 de 8 W.	57
Figura 6.8: Isométrico generado por la emisión de la bombilla LED Phillips 106-18 de 8 W.	57
Figura 6.9: bombilla LED marca Phillips 8 W. (a) espectro de emisión (b) diagrama de cromaticidad.....	58
Figura 7.1: Resultado porcentual del error de medición entre el LAFTLA y el LEE.	61
Figura 7.2: Resultado porcentual de la comparación por el método de Z-Score entre el LAFTLA y el LEE.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Tolerancias máximas del error para los fotómetros utilizados en goniofotómetros. (CIE,1996).....	21
Tabla 2.2: Serie LG-1 y sus características generales (Photometric Solutions International Pty Ltd,2018)	27
Tabla 2.3: Especificaciones del SP-3C (Photometric Solutions International Pty Ltd,2018)	28
Tabla 6.1: Mediciones obtenidas con el goniofotómetro del LAFTLA	54
Tabla 6.2: Ejemplo del cálculo de incertidumbre para un ángulo de 0 grados en el azimut y 0 grados en la elevación.	56
Tabla 7.1: Comparación de resultados por el método de Z-Score entre el LAFTLA el LEE	60

NOMENCLATURA

<i>CIE</i>	<i>Comisión Internacional de la Luz</i>
<i>ICE</i>	<i>Instituto Costarricense de Electricidad</i>
<i>c</i>	<i>constante de la velocidad de la luz</i>
<i>LAFTLA</i>	<i>Laboratorio de Fotónica y Tecnología Láser Aplicada</i>
<i>LEE</i>	<i>Laboratorio de Eficiencia Energética</i>
λ	<i>Longitud de onda</i>
<i>PSI</i>	<i>Photometric Solutions International</i>
<i>V(λ)</i>	<i>Eficiencia Luminosa Fotópica</i>

RESUMEN

Se realizaron medidas goniométricas de 3 lámparas diferentes en coordenadas tipo C con el goniómetro del LAFTLA, así como su montaje y alineación. El objetivo principal del proyecto consistió en validar la información obtenida con el equipo del LAFTLA bajo la norma CIE-121 y comprobar su funcionamiento para fines académicos y comerciales. Se compararon los datos obtenidos de una de las lámparas muestra con los datos de un goniómetro del LEE del ICE, ambos adquiriendo datos en coordenadas tipo C. Se utilizó el método metrológico Z-Score que permite a través de los valores medidos y la incertidumbre de los equipos, dar un resultado cuantitativo de que tan comparables son los resultados. Un valor Z menor a 2 es satisfactorio. Se compararon los datos obtenidos en el plano $C = 0$ de la lámpara muestra con pasos de 5 grados en elevación. Finalmente se demostró que el equipo cumplía con la norma CIE 121 pero el espacio en el que se encontraba el equipo no cumplía con los requisitos, lo cual generó un valor del Z-Score insatisfactorio para ángulos mayores a 60 grados. Los resultados de la comparación poseen un error menor al 5 % de 0 grados a 90 grados, medida la cual es suficiente en muchos casos de lámparas y luminarias por lo que se demuestra que el equipo funciona correctamente y puede ser usado para fines académicos en cursos de Radiometría y Fotometría. Se concluye dando una serie de recomendaciones que permitiría mejorar el Z-score lo cual validaría el equipo y el laboratorio para un uso comercial.

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Antecedentes

Al ser este un tema de trabajo de un área específica como lo es la medición de curvas fotométricas, se tiene como primer antecedente en el año 2010, la empresa Techno Team Bildverarbeitung GmbH realizó un trabajo llamado Comparison of techniques for measuring luminous intensity distribution overall and across segments por Dipl.-Ing Christian Schwanengel donde expone las técnicas actualmente disponibles para medir la distribución de intensidad luminosa. Se enfoca principalmente en que la técnica de medición se debe utilizar según sea la aplicación. Además, expone que en los casos donde la aplicación coincide con varios métodos, se podrían usar varias técnicas para la misma luminaria. El trabajo también propone exponer un conocimiento acerca de conceptos técnicos en la medición de la distribución de la intensidad luminosa. Muestra a su vez, una gran variedad de goniómetros que existen según sea su aplicación, sus características, diferencias y sus respectivos métodos técnicos de medición, asociados a sus ventajas y desventajas.

Como segundo antecedente se tiene, en el año 2016, un documento presentado por la empresa Photometric Solutions International titulado Fundamental Concepts in Goniophotometry por A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins donde se expone una guía que tiene como objetivo ayudar al fotometrista en el aprendizaje de los principales fundamentos de la goniometría. Comienza con los fundamentos de la fotometría, luego examina la diferentes geometrías y sistemas de coordenadas utilizados en goniometría, enfocándose en procedimientos y cálculos de prueba estándar. Finalmente examina algunos de las fuentes de error que contribuyen a los cálculos de incertidumbre.

1.2 Justificación

En la actual sociedad costarricense, las pautas de diseño de iluminación parten de diferentes estándares según sea el criterio del diseñador. A pesar de que las normas de INTECO son normas nacionales, aprobadas y establecidas, estas son de uso voluntario. Se

espera que en unos años estas normas sean de uso obligatorio lo que vendría a darle más protagonismo a equipos como lo son las esferas de integración y los goniofotómetros. El uso de un goniofotómetro vendrá a ser indispensable para poder verificar la verdadera eficacia lumínica de las luminarias con respecto a sus niveles de flujo luminoso (lm).

Actualmente existen pocos centros que trabajen en esta área, entre ellos el Laboratorio de Eficiencia Energética (LEE) del ICE el cual posee equipo capaz de llevar a cabo estas mediciones. El laboratorio vende estos servicios de medición desde hace más de 4 años a la industria, a empresas nacionales e internacionales, acreditado bajo la norma ISO 17025.

Se espera que con este trabajo se pueda ofrecer comparación entre el equipo LG01 marca PSI del LAFTLA con el equipo utilizado en el LEE para corroborar su buen funcionamiento y/o mejorar de manera académica los conceptos y prácticas de la fotometría en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, para el curso de Radiometría y fotometría.

1.3 Planteamiento del problema

El equipo LG.01 se encuentra en el LAFTLA sin ser utilizado aún. Se espera que con este trabajo se compruebe que el equipo pueda trabajar bajo los estándares de medición CIE 121 para la medición de la distribución espacial de la intensidad luminosa.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diagnosticar la capacidad del goniofotómetro marca PSI bajo las condiciones actuales del LAFTLA para la medición de la distribución de intensidad luminosa de luminarias bajo la norma de medición CIE 121.

1.4.2 Objetivos específicos

- Estudiar las distintas partes mecánicas y eléctricas del goniofotómetro marca PSI y su funcionamiento.

- Analizar el espacio y acondicionamiento actual del laboratorio bajo la norma CIE 121.
- Obtener curvas fotométricas con el goniómetro marca PSI para una muestra de luminarias bajo el método de ensayo basado en la norma CIE 121.
- Obtener las mediciones fotométricas de la luminaria LED marca Phillips nombrada como 106-18 con el goniómetro del Laboratorio de Eficiencia energética del ICE bajo el método de ensayo basado en la norma CIE 121.
- Comparar los resultados obtenidos con las mediciones del goniómetro del LAFTLA con el goniómetro del LEE para determinar la precisión y repetibilidad de las mediciones.

1.4.3 Alcance

Durante la ejecución de este proyecto se utilizará únicamente el goniómetro marca PSI que se encuentra en el laboratorio de fotónica y láser aplicada (LAFTLA) de la Universidad de Costa Rica y el goniómetro del Laboratorio de Eficiencia Energética (LEE) del ICE. La luminaria que se va a utilizar es una luminaria LED marca Phillips con el número de serie 106-18 ya que se encuentra dentro de las capacidades de medición del goniómetro marca PSI las cuales estarán bajo ensayo para una distancia máxima de 3 m. Las luminarias presentarán un peso relacionado a una masa menor a los 3 kg. La alimentación de las luminarias se realizará con una tolerancia de $(V \pm 5 \%) V$ de su valor de referencia y una temperatura ambiente de $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$. El método de comparación será el Z-score (definido en la ISO/IEC 17043:2010) el cual es un método de comparación para laboratorios de ensayo que utiliza los valores obtenidos y sus incertidumbres para realizar la comparación. Finalmente, si el resultado del z-score es menor que 2, se considera un resultado satisfactorio. Las mediciones se realizarán en el plano de 0 grados en azimut y de 0 grados a 180 grados en la elevación con pasos de ángulo de 5 grados. Se trabajará con los materiales y herramientas actuales que posea el laboratorio con el fin de evaluar las condiciones actuales y proponer futuras mejoras para la medición.

1.5 Metodología

Para la realización del proyecto se llevarán a cabo 3 etapas explicadas a continuación haciendo uso del goniofotómetro LG.01 marca PSI:

1.5.1 Primera etapa: Estudio del equipo (20%)

La primera etapa consistirá en revisar el manual del equipo y realizar las prácticas y experimentos ofrecidos por el fabricante para entender y dominar el equipo para su uso correcto. Esto mediante mediciones de luminarias de baja intensidad que permita proteger el sensor evitando la saturación por un exceso de luz que pueda poner en riesgo el buen funcionamiento del espectro radiómetro. Finalmente, esta etapa concluirá al momento de poder generar curvas fotométricas con el equipo.

1.5.2 Segunda etapa: Medición (50%)

La segunda etapa consistirá en la medición de curvas fotométricas de la luminaria muestra con el goniofotómetro del LAFTLA, tomar mediciones de la misma luminaria con el goniofotómetro del ICE. Ambos bajo el método de ensayo basado en la norma CIE 121.

1.5.3 Tercera etapa: Análisis de resultados (30%)

La tercera etapa consistirá en la comparación de las curvas obtenidas con ambos goniofotómetros mediante la ISO/IEC 17043:2010 y determinar la precisión y repetibilidad del goniofotómetro del LAFTLA con respecto al goniofotómetro del ICE.

1.5.4 Procedimiento de evaluación

El procedimiento de evaluación consistirá en comparar las curvas fotométricas generadas con el LG.01 y compararlas con las curvas fotométricas generadas en la medición con el goniofotómetro del ICE. Bajo la norma ISO/IEC 17043:2010, se comprobará el correcto

funcionamiento del equipo para mediciones comerciales si solo sí, el valor de las comparaciones del z-score es menor que 2 para la mayoría de los resultados

CAPÍTULO 2: Desarrollo teórico

2.1 Conceptos de Fotometría.

2.1.1 La función $V(\lambda)$

La función $V(\lambda)$ es una la función principal de la fotometría, todas las mediciones fotométricas se basan en esta función conocida como la curva fotópica CIE (coeficiente de eficiencia luminosa) y es representada bajo la respuesta espectral relativa del ojo humano en condiciones de visión diurna. La curva $V(\lambda)$ presenta su punto máximo a 555 nm y cae a cada lado para convertirse cero en la radiación infrarroja y ultravioleta como se muestra en la figura 1. La curva $V(\lambda)$ abarca normalmente el rango de 380 nm a 780 nm. En la fotometría se usan detectores con una responsabilidad espectral que ha sido filtrada con un filtro que presente la curva $V(\lambda)$ por lo que el detector se asemeja a la respuesta del ojo humano (únicamente el espectro visible al ojo humano) (A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins.2016) En la figura 2.1 se muestra la curva $V(\lambda)$ referente a la visión del ser humano.

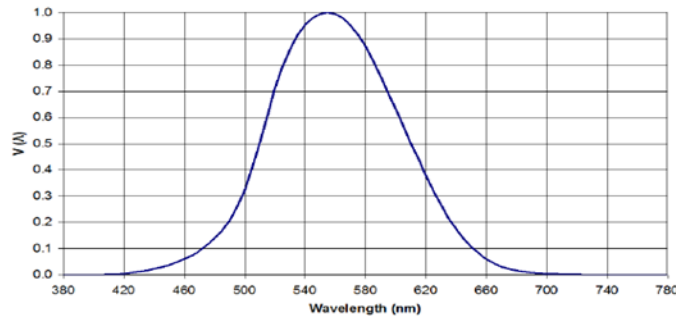


Figura 2.1: Curva $V(\lambda)$ (A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins.2016)

2.1.2 Flujo luminoso

Medido en lúmens, el flujo luminoso es la unidad fundamental de la fotometría. Es una medida de la tasa total de energía óptica emitida por una fuente de luz visible, en otras palabras, la cantidad de luz emitida por la fuente.

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.1-1)$$

Donde Φ_v es el flujo luminoso en lúmenes, $\Phi_e(\lambda)$ es la distribución de potencia espectral de la fuente de luz y $V(\lambda)$ es la función de eficiencia luminosa fotópica CIE, K_m es la máxima eficacia lumínica espectral, la cual es una constante que relaciona las variables fotométricas con las radiométricas. (A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins.2016).

2.1.3 Iluminancia.

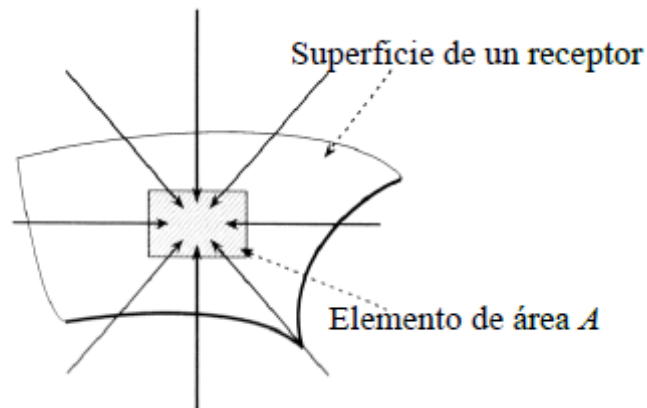


Figura 2.2: Concepto de iluminancia (L. Marín, 2019)

La iluminancia es una medida de la cantidad de luz visible que incide sobre una superficie dada zona. Un lumen de flujo luminoso que cae en un metro cuadrado se denomina lux.

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (2.1-2)$$

donde E_v es la iluminancia en lux; Φ_v es el elemento de flujo luminoso instantáneo en lúmenes; y A es el área del elemento de superficie en metros cuadrados. (A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins.2016) En la figura 2.2 se muestra el concepto de luminancia.

2.1.4 Ángulo sólido

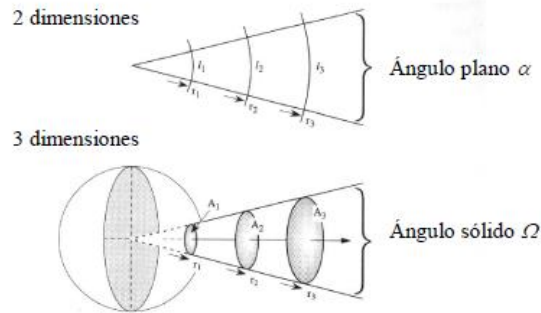


Figura 2.3: Concepto de ángulo sólido (L. Marín, 2019)

Un estereorradián se define como el cono subtendido en el centro de una esfera por un área en la superficie igual al cuadrado del radio.

$$\omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.1-3)$$

donde ω es el ángulo sólido en los estereorradianes; A es el área de superficie de un elemento de esfera en metros cuadrados; y r es el radio de la esfera en metros. (A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins.2016) En la figura 2.3 se muestra el concepto de ángulo sólido.

2.1.5 Intensidad Luminosa.

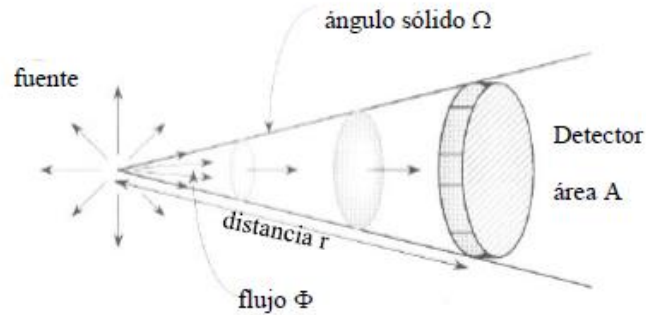


Figura 2.4: Concepto de Intensidad Luminosa (L. Marín, 2019)

La intensidad luminosa es la cantidad de flujo luminoso emitido uniformemente en un ángulo sólido. Una candela es igual a un lumen por estereorradián.

$$I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega} \quad (3) \quad (2.1-4)$$

donde I es la intensidad luminosa en candelas. Φ_v es el flujo luminoso instantáneo en lúmenes y Ω es el ángulo sólido en estereorradianes. La intensidad luminosa suele ser la unidad principal utilizada en goniometría. Porque la intensidad luminosa es una función del ángulo sólido, su valor permanece constante independientemente de distancia (sin embargo, como veremos más adelante, la iluminancia se reduce en el cuadrado de la distancia). (A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins.2016) En la figura 2.4 se muestra el concepto de Intensidad luminosa.

2.1.6 Luminancia.

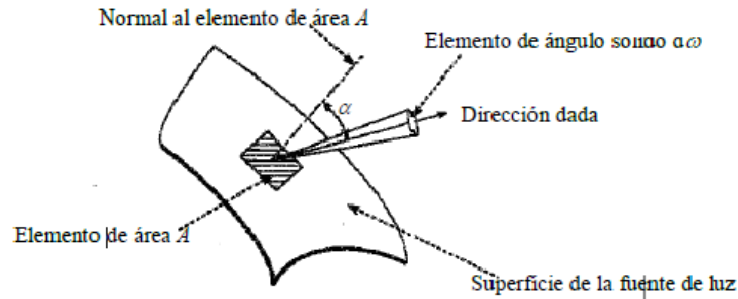


Figura 2.5: Concepto de luminancia (L. Marín, 2019)

Una medida objetiva de brillo, la luminancia es una medida dependiente de la dirección del flujo luminoso desde una fuente por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada de la fuente. La luminancia se expresa en candelas por metro cuadrado.

$$L_v = \frac{d^2 \Phi_v}{A \cos \alpha d\omega} \quad (4) \quad (2.1-5)$$

L es la luminancia en candelas por metro cuadrado; Φ_v es el flujo luminoso instantáneo en lúmenes; A es el área de la fuente en metros cuadrados; α es el ángulo del observador desde la superficie normal; y ω es el elemento de ángulo sólido en esteroradianes. (A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins.2016) En la figura 2.5 se muestra el concepto de luminancia.

2.1.7 Excitancia luminosa.

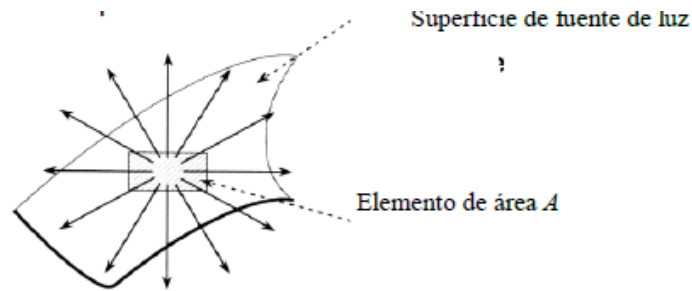


Figura 2.6: Concepto Excitancia luminosa (L. Marín, 2019)

Se define como la razón de la cantidad de flujo dejando la superficie desde un punto dividido por el área de esa superficie.

$$M_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (6) \quad (2.1-6)$$

La cantidad fotométrica de la excitancia luminosa es lumen por metro cuadrado (lm m^2). En la figura 2.6 se muestra el concepto de excitancia luminosa.

2.1.8 Ley del inverso al cuadrado.

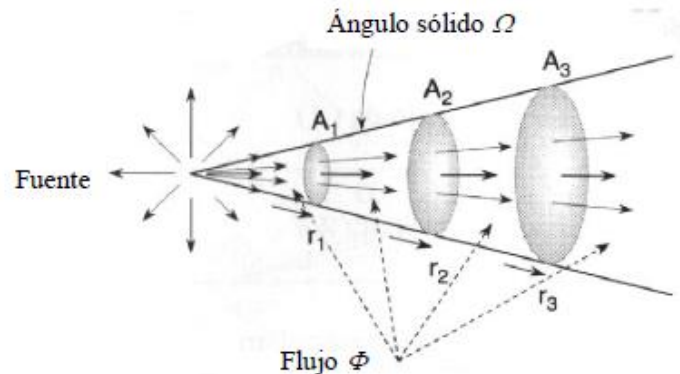


Figura 2.7: Concepto de iluminancia (L. Marín, 2019)

Esta ley se relaciona con la relación entre la iluminación desde una fuente puntual y su distancia desde una superficie. La iluminancia en la superficie varía en inverso, proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y la superficie:

$$E = \frac{I}{d^2} \quad (2.1-7)$$

donde E es la iluminancia en lux; I es la intensidad luminosa de la fuente en la dirección dada en candelas y d es la distancia desde la fuente en metros. La ley del cuadrado inverso es particularmente relevante para la goniofotometría, donde normalmente utiliza un medidor de iluminancia para medir la iluminancia a una distancia de una fuente de luz, y luego se multiplica por el cuadrado de la distancia de prueba para calcular la intensidad luminosa en un solo punto. (A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins.2016) En la figura 2.7 se muestra el concepto de la ley del inverso al cuadrado.

2.1.9 Ley del coseno.

Esta ley se relaciona con la relación entre la iluminación desde una fuente puntual y su ángulo de lo normal a una superficie. La iluminancia en la superficie varía con coseno del ángulo.

$$E = \frac{I \cos \theta}{d^2} \quad (2.1-8)$$

donde E es la iluminancia en lux; I es la intensidad luminosa de la fuente en la dirección dada en candelas θ es el ángulo de incidencia de la iluminancia desde la normal a la superficie; y d es la distancia desde la fuente en metros. (A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins.2016)

2.2 Introducción a la goniometría

2.2.1 Fotómetro y goniómetro

El término fotómetro deriva de las palabras griegas, foto que significa luz, y metro, que significa un instrumento de medida. Un fotómetro es un dispositivo para medir cantidades luminosas. Este dispositivo podría medir iluminancia, luminancia, flujo luminoso, etc. Un fotómetro típico consiste en un detector, un amplificador y un lector digital. El detector normalmente está corregido por $V(\lambda)$ lo que significa que su espectro de respuesta se filtra para que coincida con la curva $V(\lambda)$.

El término goniómetro deriva del griego gonios, que significa ángulo, y metro, que significa un instrumento de medición. Un goniómetro es un dispositivo para me-

dir ángulos o rotar a diferentes ángulos. Normalmente, un goniómetro utiliza dos ejes de rotación diferentes en combinación para que toda la esfera puede ser generada.

2.2.2 Goniofotómetro

Un goniofotómetro es un fotómetro en combinación con un goniómetro. El goniómetro rota una fuente de luz y / o un detector a través de diferentes ángulos. El fotómetro mide la luz y proporciona una posición de referencia para el goniómetro. Entonces, un goniofotómetro es, literalmente, un dispositivo para medir la luz desde diferentes ángulos. Es también llamado fotómetro de distribución o fotogoniómetro. (A.S.J. Bergen & S.E. Jenkins,2016).

Finalmente se puede concluir que el goniofotómetro es un fotómetro para medir la distribución característica de la luz de una luminaria, fuente de luz, o superficie. Los datos fotométricos de una luminaria consisten en una serie de valores de intensidad luminosa en diferentes direcciones, producido por mediciones directas. Estas mediciones involucran mediciones fotométricas y angulares por lo que es necesario definir un espacio de trabajo alrededor de la luminaria. Por esta razón las luminarias son instaladas en un goniofotómetro para facilitar la posición de ángulos definidos (CIE 121,1996).

Existen básicamente 3 formas en que los goniofotómetros realizan su rotación para generar la matriz de intensidad:

- Un goniofotómetro el cual rota la luminaria alrededor de 2 ejes mutuamente perpendiculares donde su intersección es el centro del goniómetro. Usa simplemente un sensor fotométrico posicionado a una adecuada distancia del centro.
- Un goniómetro el cual solo rota la luminaria alrededor de un eje, la segunda rotación está dada por el movimiento relativo entre la luminaria y el sensor fotométrico alrededor de un segundo eje en ángulo recto con el primero y corrigiéndolo en el centro fotométrico.

- Un goniofotómetro en donde la luminaria no se mueve del todo y el sensor fotométrico rota alrededor de dos ejes mutuamente perpendiculares que se cruzan en el centro fotométrico del goniofotómetro.

La determinación de la distribución de intensidad de una luminaria en el espacio requiere de un sistema de coordenadas que defina la dirección en que las mediciones de intensidad son realizadas. El sistema utilizado es un sistema de coordenadas esféricas donde su centro coincide con el centro fotométrico de la luminaria.

2.3 Sistema de coordenadas tridimensional.

Este sistema de coordenadas define una dirección a partir de dos coordenadas angulares (C, γ). Donde el eje vertical es representado como el eje OZ y llamado a su vez eje polar. En este sistema de coordenadas cada dirección de haz de flujo luminoso queda definido por dos valores angulares C y γ siendo el punto (0.0) el centro fotométrico de la luminaria. En la figura 2.8 se muestra un diagrama de diferentes planos para una lámpara de ejemplo.

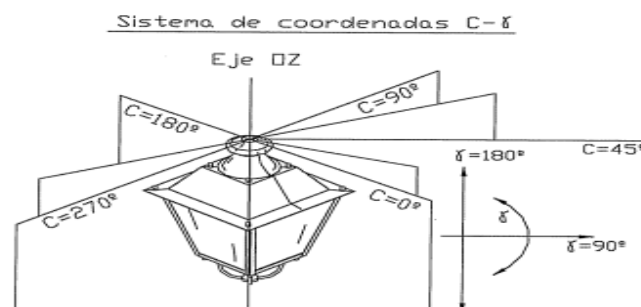


Figura 2.8: Ejemplo de una luminaria con coordenadas tridimensionales (Sanclemente, 2011)

2.3.1 Sistema tipo A

Es un grupo de planos por el que la línea de intersección atraviesa el centro fotométrico y es perpendicular al plano que contiene los ejes primero y segundo de la luminaria. El sistema de planos A está acoplado rígidamente a la luminaria y sigue su inclinación si la luminaria está inclinada. El primer eje es el eje que va a través del centro fotométrico y perpendicular al área de emisión de la luz. (CIE,1996). Esta orientación se muestra en la figura 2.9.

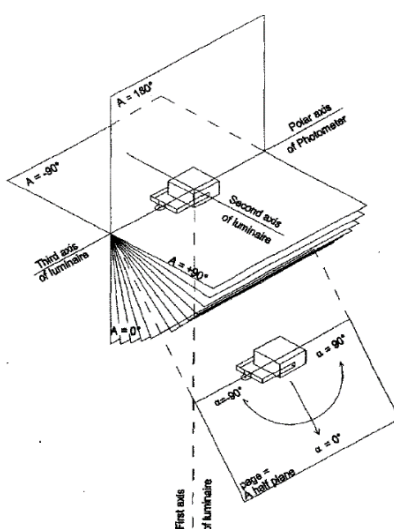


Figura 2.9: Orientación de la Luminaria para goniómetro tipo A (CIE, 1996)

2.3.2 Sistema tipo B

Es un grupo de planos por el que la línea de intersección atraviesa el centro fotométrico y es paralelo al segundo eje de la luminaria. El sistema de planos B está acoplado rígidamente a la luminaria y sigue su inclinación si la luminaria está inclinada. El primer eje es el que va a través del centro fotométrico y perpendicular al área de emisión de la luz. (CIE,1996). Esta orientación se muestra en la figura 2.10.

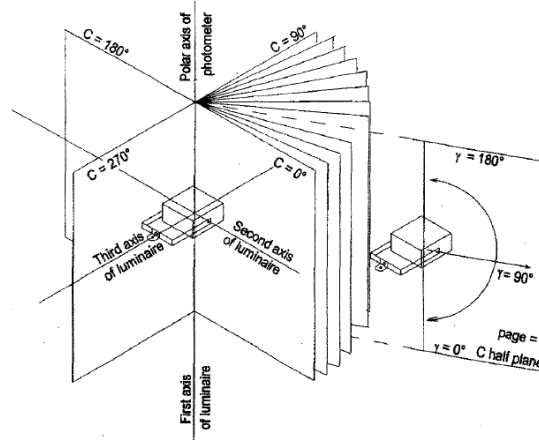


Figura 2.11: Orientación de la Luminaria para goniofotómetro tipo C (CIE, 1996)

2.4 Matriz de intensidades

Los valores de la intensidad luminosa pueden encontrarse en una tabla de manera matricial para las distintas direcciones en el espacio. Se puede expresar la matriz de intensidades de una luminaria como una tabla de doble entrada (C, γ) donde cada entrada corresponde a un valor de intensidad luminosa. Como norma general se representa la matriz de intensidades para un flujo luminoso nominal de 1000 lúmenes. Cuando se quiere calcular la intensidad luminosa en una dirección será necesario multiplicar el valor dado en la tabla por el factor. Factor: flujo nominal de la lámpara / 1000. (Sanclemente. 2011) Un ejemplo de esta matriz se muestra en la figura 2.12.

DISTRIBUCIÓN ANGULAR DE INTENSIDAD LUMINOSA

Ángulo γ grados sexagesimales (°)	Intensidad luminosa referida a 1.000 lm (cd/klm)					
	Direcciones de medida					
	C0	C15	C30	C45	C60	C75
0	39,2	39,2	39,2	39,2	39,2	39,2
5	40,5	40,2	40,9	37,4	37,7	38,7
10	46,2	46,5	47,0	38,1	45,7	46,7
15	60,1	57,5	56,5	42,6	52,8	55,5
20	75,4	71,0	70,5	48,8	67,4	70,6
25	80,4	79,6	83,3	53,9	80,9	84,2
30	84,3	86,5	77,9	58,7	82,6	72,1
35	81,6	82,0	64,8	50,6	66,6	63,5
40	61,9	62,6	66,1	63,2	63,0	64,8
45	61,6	63,3	67,3	65,4	64,5	66,1
50	59,7	63,0	67,8	66,4	66,5	66,6
55	57,7	61,6	66,8	66,0	65,8	67,1
60	55,1	60,1	65,0	64,8	64,3	65,7
65	51,8	57,6	62,7	63,1	62,7	63,3
70	48,0	53,5	60,1	61,0	60,9	59,3
75	43,3	49,8	57,5	58,9	58,8	57,1
80	40,6	47,0	54,9	56,4	56,6	55,0
85	38,3	44,2	52,0	54,2	54,1	52,7
90	37,0	42,2	49,9	52,2	52,0	50,5
95	36,1	40,2	47,8	50,1	50,1	48,3
100	34,7	37,9	45,4	48,3	47,5	45,8
105	33,1	35,1	42,4	44,9	44,7	42,9
110	31,3	32,1	38,9	41,7	41,3	39,7
115	29,2	29,1	34,9	38,0	37,4	36,2
120	26,7	25,7	30,9	33,5	32,8	32,6
125	24,1	22,5	26,1	28,3	27,9	28,5
130	20,8	19,2	20,9	22,8	22,8	24,4
135	17,2	15,7	15,6	17,3	17,5	20,2
140	13,5	12,1	10,5	11,8	12,4	15,7
145	9,7	8,6	6,3	6,4	7,8	11,3
150	6,0	5,1	3,2	1,9	4,2	6,9
155	2,6	1,9	0,7	0,0	1,1	2,8
160	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
165	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
170	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
175	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Figura 2.12: Ejemplo de una matriz de intensidades (Sanclemente. 2011)

2.5 Curvas fotométricas polares

El volumen formado por las tres coordenadas: intensidad luminosa (I), plano vertical (C) e inclinación respecto al eje vertical (γ), forman el sólido fotométrico, que determina la distribución de la luminaria en todo el espacio. Como es complicado trabajar en tres dimensiones, para simplificar el trabajo se realizan cortes al sólido fotométrico de modo que se obtiene una curva en dos dimensiones, conocida como curva polar, mucho más sencilla de comprender. Normalmente la curva polar representa los dos planos verticales: el transversal (0°) y longitudinal (90°), aunque si la intensidad máxima no está contenida en estos dos planos, se representa también la curva polar del plano que la contiene. El centro del diagrama polar tiene intensidad 0, no hay luz, por lo que el valor de intensidad máxima será el punto que esté más alejado del centro. En la figura 2.13 se muestran ejemplos de curvas polares.

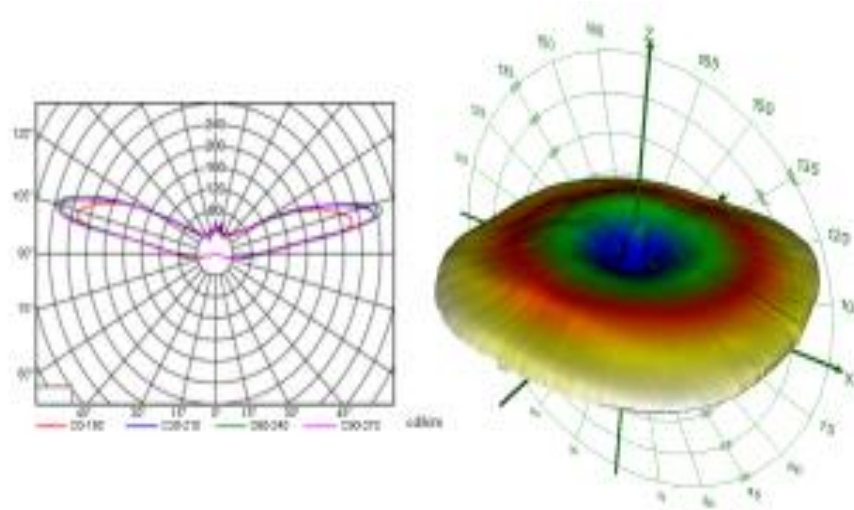


Figura 2.13: Ejemplos de curvas fotométricas polares (Schwanengel. 2010)

2.6 Requisitos de laboratorio para las pruebas

El objetivo de que las mediciones se realicen bajo ciertas condiciones de laboratorio nace con el fin de poder comparar los resultados entre laboratorios que están cercanos entre condiciones normalizadas para una luminaria.

Según la CIE 121-1996 se deben tener las siguientes consideraciones:

1. Laboratorio:

- Se debe procurar que la única luz que reciba el sensor fotométrico sea de la luminaria.
- El ambiente tiene que estar libre de humo, polvo y niebla. Con una temperatura alrededor de la luminaria de $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$.
- El movimiento en el aire no debe superar los 0,2 m/s.

2. Luminarias:

- Las mediciones se deben realizar una vez que la luminaria está estabilizada.

- La luminaria se deberá mover a la misma velocidad a una igual para todos los ángulos. Se deben tomar dos medidas una seguida de la otra y se debe comprobar que el valor no exceda el 2 % de diferencia.

3. Medidores de iluminancia usados en goniofotómetros:

En la tabla 2.1 se muestra las tolerancias máximas del error para los fotómetros utilizados en goniofotómetros. (CIE,1996).

Tabla 2.1: Tolerancias máximas del error para los fotómetros utilizados en goniofotómetros. (CIE,1996).

Characteristic	Symbol for associated error parameter	Maximum value
V(λ) match	f_1	2 %
UV response	u	0,2 %
IR response	r	0,2 %
Cosine response *	f_2	1,5 %
Polarization dependence	f_3	0,2 %
Influence of non-uniform illumination	f_6	0,2 %
Linearity	f_5	0,2 %
Fatigue	f_5	0,2 %
Temperature dependence *	a	0,2 %/K
Evaluation of modulated light	f_7	0,1 %
Error of display unit	f_4	0,2 %
Range change	f_{11}	0,1 %

2.7 Incertidumbre de la medición

La incertidumbre de una medición se puede definir como “el parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando”. De una forma más sencilla se puede decir que la incertidumbre es la duda de que tan válida es la medición. (INCOTEC, 2000).

2.7.1 Evaluación Tipo A

En la evaluación de incertidumbre tipo A, se obtienen una serie de observaciones repetidas, para determinar la varianza del resultado de la medición. Es la incertidumbre obtenida exclusivamente por medios estadísticos. La raíz cuadrada positiva de la varianza, es la incertidumbre Tipo A (U_A). Se utiliza la desviación estándar del promedio, como representante de la incertidumbre. Para evaluar la incertidumbre tipo A se debe utilizar el promedio de la medición \bar{x} , la desviación estándar s y el número de datos N . La ecuación (2.7-1) es la ecuación del promedio, la ecuación (2.7-2) es la ecuación de la desviación estándar y por último la ecuación (2.7-3) es la ecuación de la incertidumbre U_A asociada a la repetibilidad.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N x_i) \quad (2.7-1)$$

$$s = \frac{1}{N-1} \sqrt{(\sum_{i=1}^N x_i - \bar{x})^2} \quad (2.7-2)$$

$$U_A = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (2.7-3)$$

2.7.2 Evaluación Tipo B

La información para la evaluación de incertidumbre tipo B, se obtienen en reportes de calibración, certificados, especificaciones del fabricante, etc., y se usan para estimar una desviación estándar, conocida como la incertidumbre estándar tipo B (U_B). El uso apropiado de la información disponible, para la evaluación Tipo B de la incertidumbre estándar, considera un conocimiento basado en la experiencia y el es-

tudio, y es una habilidad que debe ser aprendida con la práctica. Debe reconocerse que la evaluación Tipo B, es tan confiable como la evaluación Tipo A, especialmente en una situación de medición, donde una evaluación Tipo A, se basa en un número comparativamente pequeño de observaciones independientes.

Para realizar la evaluación tipo B se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones.

Un intervalo establecido de confianza que tiene un nivel establecido de confianza, tal como 95% o 99%, debe ser convertido a una incertidumbre estándar, con el tratamiento de la incertidumbre considerada, como si se usara una distribución normal para calcularla, y dividirla por el factor apropiado para tal distribución. Estos factores son 1,960 y 2,576 respectivamente para los dos niveles de confianza dados.

Si son dados una incertidumbre expandida y un factor k, se divide la incertidumbre expandida por el factor k, para obtener la incertidumbre estándar.

Se modela la cantidad con una probabilidad uniforme, rectangular o triangular, y se estiman los límites inferior y superior a- y a+ para el valor de la cantidad, tal que la probabilidad de que el valor esté en el intervalo de a- hasta a+ es 100% para todos los propósitos prácticos.

Para estimar la incertidumbre debido a una distribución rectangular, las fuentes de error que posee una distribución rectangular son aquellas que sean especificaciones del equipo de trabajo y resolución del equipo de medición. La incertidumbre U_{B1} vamos a referir a la ecuación (2.7-4) a la incertidumbre asociada al error a partir de las especificaciones del equipo, mientras que la ecuación (2.7-5) U_{B2} se refiere a la incertidumbre asociada al error de la resolución del equipo de medición o del patrón, donde para ambas ecuaciones “a” se refiere al valor del límite.

$$U_{B1} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.7-4)$$

$$U_{B2} = \frac{a}{\sqrt{12}} \quad (2.7-5)$$

2.7.3 Incertidumbre combinada

El resultado de una medición es obtenido usando una ecuación que combina diferentes magnitudes variables, por lo que la incertidumbre de la medición es calculada al combinar las incertidumbres estándar de las magnitudes de entrada, como una incertidumbre combinada U_C . Si las entradas al sistema son independientes se puede definir la incertidumbre combinada como en la ecuación (2.7-6).

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + U_{Bn}^2} \quad (2.7-6)$$

2.8 Método de evaluación

Las comparaciones entre laboratorios se utilizan ampliamente para varios propósitos y su uso está en aumentando constante en el mundo. Algunas de las razones por la que se debe hacer la comparación entre laboratorios comprende:

- Evaluar el desempeño del equipo para llevar a cabo ensayos o mediciones específicos y hacer el seguimiento del desempeño.
- Identificar problemas en el equipo e iniciar acciones para la mejora. Pueden estar relacionadas con procedimientos inadecuados de ensayo o medida, eficacia de la formación y supervisión del personal o la calibración de los equipos;
- Establecer la eficacia y la comparabilidad de los métodos de ensayo para el goniofotómetro.

- Identificar las diferencias entre laboratorios.
- Validar las estimaciones de incertidumbre declaradas.

Los criterios de aprobación o rechazo para las pruebas de aptitud se basan en la puntuación de z-score. Si se proporciona información de incertidumbre, el número del error normalizado (ambos En y z-score definidos en ISO / IEC 17043: 2010) se calcula con fines informativos. La puntuación de z-score se calcula para todos los resultados y se determinará por:

$$z = \frac{x-X}{\sqrt{\sigma^2 + u_x^2 + u_{deriva}^2}} \quad (2.8-1)$$

Donde x es para este caso sería el valor obtenido para el goniofotómetro del LAFTLA y X sería de con quien se quiere hacer la comparación, en este caso el goniofotómetro del ICE. Tenemos que σ sería la desviación estándar para la evaluación, u_x sería la incertidumbre del LEE y u_{deriva} corresponde a la incertidumbre de la medición, la cual puede despreciarse si es muy baja. (ISO / IEC 17043: 2010) Las incertidumbres se organizan en tipo A y tipo B donde tipo A son incertidumbres asociadas a la repetibilidad de la medición a partir de la desviación estándar y el número de mediciones y las incertidumbres tipo B provienen de características del equipo o de los medidores o certificados de calibración.

2.9 Goniofotómetro LG-1 marca PSI

El goniofotómetro del LAFTLA se observa en la figura 13 en el estado inicial en que se encontraba el equipo.

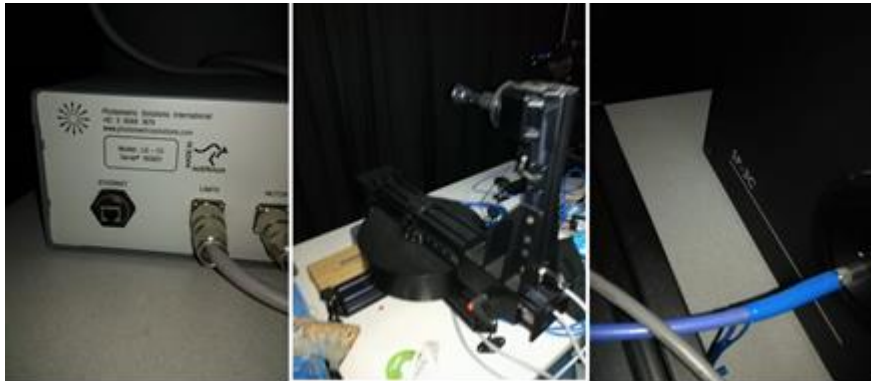


Figura 2.14: Goniofotómetro LG.01 y espectroradiómetro SP-3C ubicado en el LAFTLA

Los goniofotómetros de luminarias rotativas de la serie LG-1 de PSI son goniofotómetros compactos para lámparas, luminarias, LED y grupos de LED. Son adecuados para fabricantes o instituciones que no cuentan con el espacio, el presupuesto o los requisitos para un gran goniofotómetro de tipo espejo giratorio. Cuando las lámparas de medición cuyo flujo luminoso cambia con la posición de la descarga, como las lámparas HID y los tubos fluorescentes, se puede proporcionar una fotocélula auxiliar para corregir las diferentes posiciones del tubo de descarga. La serie LG-1 tiene una variedad de diseños para satisfacer diferentes especificaciones de tamaño y forma de luminarias. En la tabla 2.2 se muestran las características generales que ofrece el fabricante de la serie LG.01.

Tabla 2.2: Serie LG-1 y sus características generales (Photometric Solutions International Pty Ltd,2018)

Maximum dimensions of the DUT and load capacity (can be customised for specific applications)	Model	Max dimensions (diagonal)	Load Capacity
	LG-1.0	500 mm	3 kg
	LG-1.1	1300 mm	10 kg
	LG-1.2	1300 mm	20 kg
	LG-1.3	2000 mm	30 kg
	LG-1.5	2000 mm	50 kg
Type	C/γ with rotating luminaire The burning position is not maintained during the test. We only recommend this setup for LED measurements. Type B/β adapter (optional)		
Standards	CIE S 025/E:2015 IES LM-79-08 EN 13032-1:2012-06		
Test distance	Test distance : ≥ 15 times the DUT diagonal (S 025)		

Estos equipos llevan consigo un espectroradiómetro que es conectado a través de una fibra óptica, para el caso del proyecto se tiene un medidor SP-3C. El SP-3C es un espectroradiómetro compacto y rápido, diseñado principalmente para la medición de cromaticidad en tiempo real. Cuenta con una única red de difracción y una disposición de matriz CCD, de modo que todo el espectro se adquiere en una única exploración de la matriz CCD. Una vez que el SP-3C ha adquirido un espectro, se muestra en la pantalla junto con las coordenadas de cromaticidad y (si corresponde) la temperatura de color de la fuente y otros datos derivados. Los tiempos de integración pueden variar de 0.01 milisegundos a 65,535 segundos. Para fuentes de luz brillante, las coordenadas de cromaticidad se pueden actualizar en la pantalla varias veces por segundo. Los espectros se pueden registrar a lo largo del tiempo, lo que convierte al SP-3C en una herramienta de investigación muy útil para controlar el cambio de color de una muestra a lo largo del tiempo. Contiene una selección de filtros de densidad neutral incorporada en el sistema para que la intensidad de la señal se pueda reducir, que normalmente saturarían el detector. La rueda del filtro también contiene un filtro de bloqueo para la resta de la corriente de oscuridad. En la tabla 2.3 se muestran las características generales del espectroradiómetro ofrecido por parte del fabricante.

Tabla 2.3: Especificaciones del SP-3C (Photometric Solutions International Pty Ltd,2018)

No. of pixels	2048
Spectral range	360-830 nm (others options in the UV/NIR regions are available upon request)
Wavelength interval	From 1 to 10 nm, software-selectable
Wavelength accuracy	≤ 0.3 nm
Wavelength repeatability	≤ 0.02 nm
Optical bandwidth	4.5 nm FWHM typical
Integration time	0.01-65535 ms
Stray light	$< 0.1\%$

CAPÍTULO 3: Desarrollo del montaje para la medición

En este capítulo se estudia cada parte del equipo perteneciente al goniómetro y se desarrolla el montaje utilizado para las mediciones de las lámparas en el sistema.

3.1 Equipo que conforma el sistema

Podemos destacar 5 equipos principales en el goniómetro LG-01 que se encuentra en el LAFTLA.

3.1.1 Espectroradiómetro SP-3C:

El SP-3C es un espectroradiómetro CCD en tiempo real que se puede usar de forma independiente operación o interconectado a un goniómetro para una automatizada medición de la cromaticidad espacialmente promediada de lámparas y luminarias. Este equipo se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1: Espectroradiómetro SP-3C marca PSI

Este equipo se comunica con la PC a través de un cable de datos categoría 6A. Este equipo es el encargado de obtener los espectros a través de una fibra óptica multimodo acoplada de su salida terminal al trípode con un difusor lambertiano. Los terminales de la fibra

son ambos SMA. El equipo contiene por dentro una rueda de filtros que utiliza para limitar la cantidad de luz que le incide dentro de la CCD. Esta rueda de filtros contiene un filtro de bloqueo, el cual se utiliza para medir la corriente de oscuridad del equipo. El esquemático del espectroradiómetro se muestra en la figura 3.2.

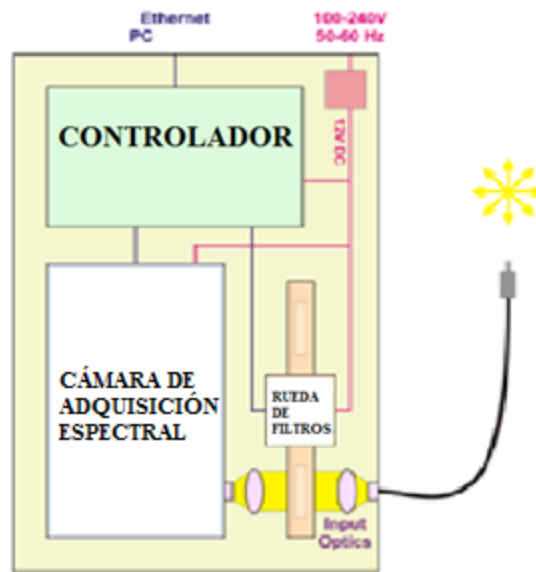


Figura 3.2: Esquemático del espectroradiómetro marca PSI

3.1.2 Fococelda y amplificador:

La fococelda se usa para medir la intensidad luminosa de la luz incidente sobre ella. Se coloca en el eje óptico a una distancia y directamente hacia el goniómetro. Tiene un diámetro de 8 mm. La fococelda está montada sobre un pedestal que la sostiene, en posición, y un tubo deflector rodea la fotocélula para bloquear la dispersión ligera. La fotocélula se controla termostáticamente a 35 grados Celsius. La fotocélula tiene una excelente corrección $V(\lambda)$ con un $f1 = 1.21\%$ Este se encuentra sobre un trípode junto con un baffle para eliminar la incidencia de luz extraviada. Hay dos puntos de conexión en el costado de la fococelda, ambos que están conectados al amplificador. El conector más grande con dos pines es la señal de salida de fotocorriente. El conector más pequeño con tres pines

es para la alimentación del control de temperatura. En la figura 3.3 se observa la fotocelda y el amplificador respectivamente.

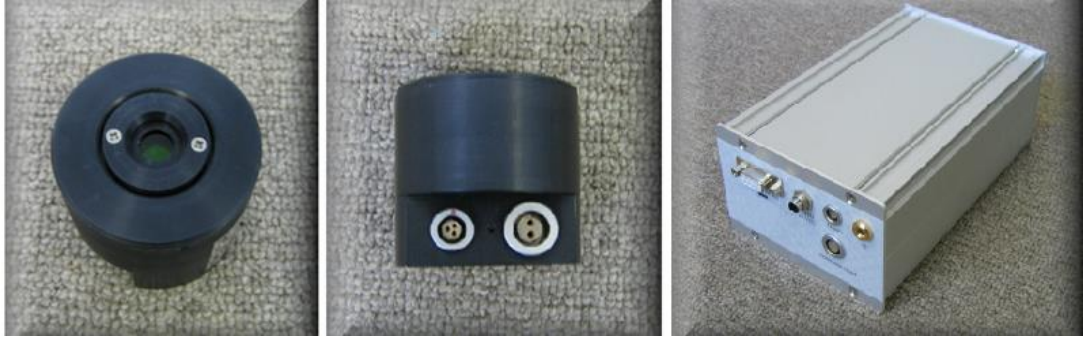


Figura 3.3: Fotocelda PSI (derecha e imagen central) y amplificador de corriente (imagen de la izquierda)

La salida de la fotocelda es una corriente muy pequeña, típicamente entre picoamperios y miliamperios en magnitud. Dado que la corriente es muy pequeña y la fotocelda está muy lejos de la PC se utiliza un amplificador de fotocorriente. El amplificador tiene múltiples rangos y produce una salida de 0-10V. También en el amplificador hay un convertidor analógico a digital (A / D). Esta convierte la tensión eléctrica en una medición digital. Es esta medida que se transfiere digitalmente a larga distancia a la PC en lugar de la pequeña salida de corriente de la fotocelda, que ayuda a prevenir ruido eléctrico por interferir con las mediciones.

Hay cinco puntos de conexión en el amplificador:

- El conector hembra DB9 marcado "RS485" es el RS-485 puerto de comunicaciones, que está conectado a la PC. El conector macho de dos pines marcado como "Suministro 24 VDC" es la potencia de entrada que está conectada a la fuente de alimentación.
- El conector hembra de dos pines marcado "Cabeza del fotómetro" es la entrada de señal de fotocorriente desde la fotocelda y está conectada a la fotocelda

- El pin de tierra normalmente no se usa, pero se puede conectar a una tierra de referencia, como el marco de la PC, en ambientes con alto ruido.
- El conector hembra de tres pines marcado "Therm." es la salida para el control de temperatura de la fotocelda.

La combinación de fotocelda y amplificador tienen una responsividad típica de 14 nA/lx, cuya incertidumbre se toma en consideración para el cálculo de incertidumbre combinada del equipo. Este se conecta a la PC mediante cable USB.

3.1.3 Goniómetro:

Es el actuador que sostiene la luminaria capaz de rotar en dos ejes, el Elevación (Vertical) y el Azimut o plano C (Horizontal). Un esquema del goniómetro se observa en la figura 3.4.

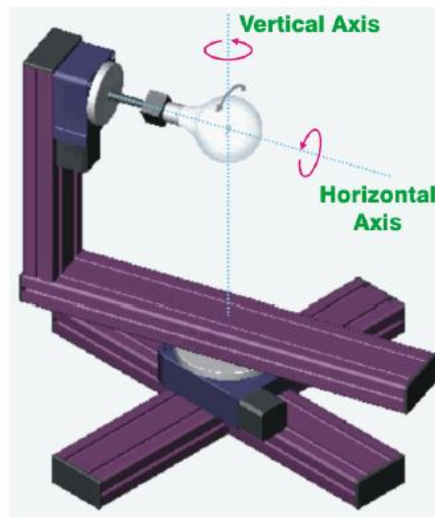


Figura 3.4: Goniofotómetro LG.01 y sus ejes de rotación

3.1.4 Control de Motores:

Este equipo se encarga de controlar la potencia de los motores del goniómetro, tanto a nivel de energía como de control de posición. Los cables del controlador van al equipo por medio de un cable grueso de 12 pines.

3.1.5 PC:

Es la encargada de correr los softwares de obtención de datos y de procesamiento de la información de cada una de las partes del sistema. El amplificador se comunica con el software en la PC usando el protocolo de comunicaciones RS- 485. RS-485 es un formato de transmisión de datos utilizando solo dos cables en un par trenzado arreglo. La longitud del cable puede ser muy larga, incluso más de un kilómetro, y los amplificadores se pueden usar en múltiples arreglos, lo que significa que se puede usar más de un amplificador en un único circuito. El esquema de conexión se muestra en la figura 3.5.

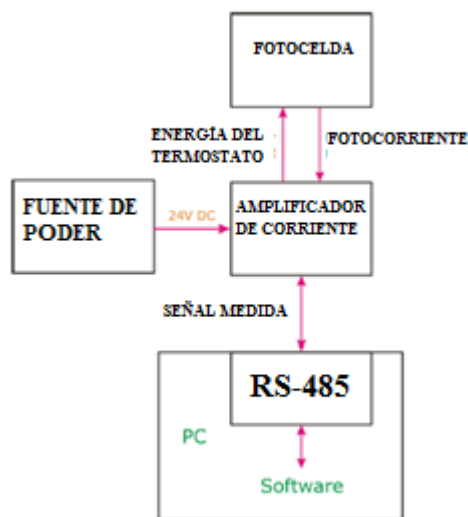


Figura 3.5: Esquema de conexión de datos

3.2 Montaje

Para el montaje del equipo se debía tener varias consideraciones, la primera de ellas es que el equipo debe estar al menos a 3 metros de distancia según la CIE 121, lo segundo por recomendación del fabricante es que el medidor y el goniómetro debían estar en diferentes superficies para que de esta manera las vibraciones del equipo no afectaran al medi-

dor y por último se debía tomar en cuenta la alineación de los ejes ópticos del sistema. En primera instancia se trató el problema de separar los equipos, para ello se trabajó en conjunto con el curso del taller de mecánica en el cual el proyecto realizado por un grupo de estudiantes consistía en elaborar una mesa móvil para instalar el detector de manera que se pudiera separar el equipo del goniómetro y poder manipular la posición del detector con respecto al goniómetro. En la figura 3.6 se muestra el proceso de elaboración de la mesa por parte de los estudiantes.



Figura 3.6: Evolución de la mesa móvil

Una vez obtenida la mesa se procedió a la alineación de los ejes ópticos. Esta se realizó siguiendo el montaje de la figura 3.7 donde se muestra como debe ser la configuración del sistema para que el equipo sea capaz de medir en coordenadas tipo C. El gonio está en la posición del ángulo de elevación 0° cuando el elemento de prueba la mesa de montaje está orientada directamente hacia la fotocélula a lo largo del eje óptico.

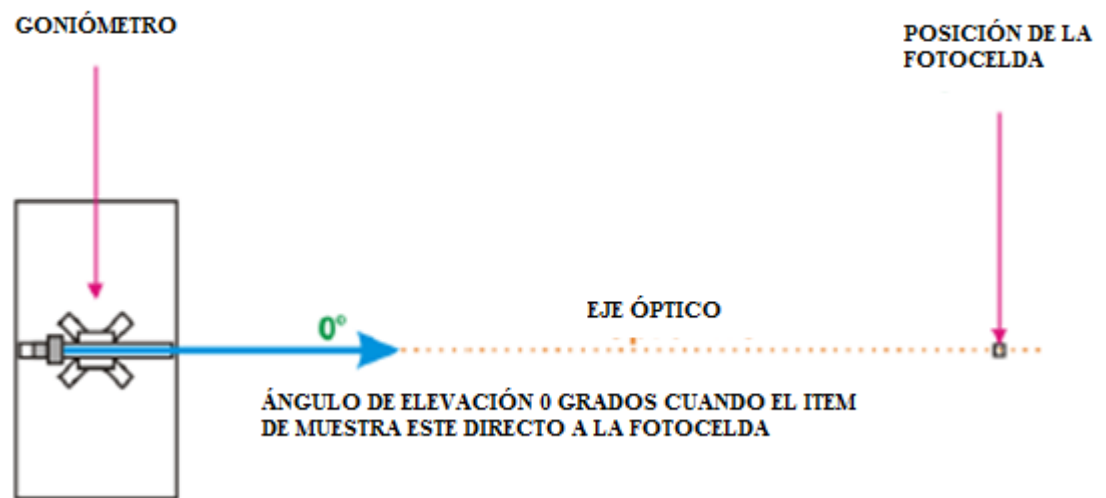


Figura 3.7: Alineación del eje óptico

Esta alineación se logró mediante el uso de niveles en ambas mesas, en el gonio y en la fotocelda. Se incorporó sobre la placa de montaje del gonio un sistema con un puntero láser para así garantizar un camino en línea recta entre el gonio y la fotocelda. Este equipo se muestra en la figura 3.8. A medida que el ángulo de elevación cambia de 0° a 180° , el elemento de prueba será girado de cara a cara directamente hacia la fotocelda recorriendo todos los ángulos de emisión de la luminaria.

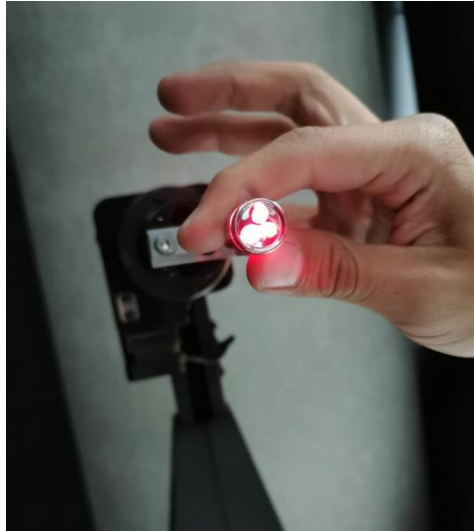


Figura 3.8: Sistema láser implementado para el eje óptico entre el goniómetro y la fotocélula.

Además, se ajustó el eje óptico de la luminaria con el punto de pivote del gonio mediante el láser incorporado al goniómetro. Este se ajustó según el eje óptico definido por la CIE. En la figura 3.9 se observa un ejemplo de este alineamiento.

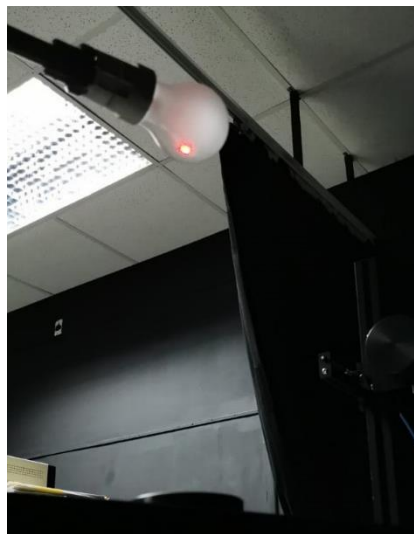


Figura 3.9: Alineamiento de la lámpara con el punto de pivote.

Por último, se agregó al esquema una “máscara” removible entre el detector y la luminaria para así poder medir y restar la luz extraviada además de un cobertor negro sobre la mesa. El equipo se encarga de medir la luz extraviada y restarla a los datos obtenidos, en la figura 3.10 se puede observar el montaje con la máscara incluida. Esta debe eliminar la incidencia directa de la luminaria en la fotocelda y así solo dejar pasar las reflexiones que se den por el cielo, paredes y mesa. La máscara está conformada por un soporte un elemento que obstruye la incidencia directa de la luz sobre la fotocelda.



Figura 3.10: Máscara utilizada para medir la luz extraviada

CAPÍTULO 4: Software PSI y primeras mediciones

En la PC se instalaron varios softwares para manipular y extraer los datos del sistema, los principales son el LGcontrol.exe, el SPreport.exe y el PhotometricCentre.exe suministrados por el fabricante.

4.1 LGcontrol

Este es el software encargado de tener control del sistema completo y obtener los datos de medición de intensidad luminosa y la iluminancia, control de la posición, activación del láser y obtención de mediciones espectro radiométricas. El menú principal se puede observar en la figura 4.1.



Figura 4.1: Menú principal del LGcontrol.

Cada opción tiene la siguiente función:

- Distribución Fotométrica C / Gamma. realiza una prueba utilizando geometría C, es decir ángulos azimut y elevación.
- Distribución Fotométrica B / Beta. Una prueba fotométrica tipo B realiza una prueba con geometría B, es decir ángulos horizontal y vertical. El elemento de

prueba se monta a 90 grados en la posición Tipo C que produce una genuina geometría tipo B-b.

- Prueba de flujo luminoso. (esta opción queda fuera de la investigación).
- Operación de joystick. El Joystick es un modo de operación donde usted puede mover el goniómetro a través de rotaciones arbitrarias. Esto es principalmente usado para alinear luminarias y lámparas, observar cambios en la salida de intensidad luminosa en función de ángulo.
- Determinación de la clasificación NEMA para pruebas fotométricas tipo B
- Parquear. Estacionar el sistema LG-1.03 implica girar la lámpara o luminaria al plano $C = 0$ y moviendo el eje de elevación a un ángulo de 90° , es decir: perpendicular al eje óptico.
- Config. La configuración de LGControl se utiliza para establecer varias configuraciones que determine cómo LGControl y el LG-1.03 realizan pruebas fotométricas.
- Exit. Esta opción saldrá de LGControl y volverá a la operación sistema.
- Parquear y Exit. Esta opción estacionará el gonio, luego saldrá de LGControl y volver al sistema operativo.

Para este trabajo dejaremos por fuera las opciones de distribución Fotométrica B y determinación del NEMA ya que estas opciones son solo para curvas tipo B y este trabajo se enfoca únicamente en curvas del tipo C.

4.1.1 Distribución Fotométrica C / Gamma.

Figura 4.2: Detalle de la opción de fotometría tipo C

Una vez elegida la opción, se debe ingresar los detalles de la luminaria. Se mostrará una ventana que solicita esta información (ver Figura 4.2). Introduzca una descripción de la luminaria, incluyendo reflectante o superficies refractivas, rejillas, número de catálogo, etc. Esta descripción debe ser lo suficientemente específica para identificar de forma única esta luminaria. Las entradas de longitud, anchura y altura son para las dimensiones luminosas de la luminaria, es decir: las áreas de la luminaria que emiten luz. (cabe destacar que para una fuente que se aproxime como fuente puntual se debe especificar sus dimensiones como 0 m.) La potencia nominal es la potencia de toda la luminaria. El equipo permite la selección de los intervalos de ángulo de prueba que se utilizarán. Se puede elegir una propia combinación de ángulos, o puede optar por utilizar el CIE o IES especializado. También hay diferentes tipos de simetría disponibles:

- Simétrico. Si una luminaria es simétrica.
- Cuadrantal. La simetría cuadrantal se usa cuando la distribución de intensidad en un cuadrante es la misma, o se refleja, en todos los demás cuadrantes.
- Bilateral. La simetría bilateral se usa cuando la mitad de distribución de intensidad luminosa es la misma que la otra mitad.

Una vez elegida la configuración de ángulos se procede a la adquisición de datos y a la medición de la luz extraviada.

4.2 Adquisición de datos

Para las pruebas de tipo C, la luminaria se gira a una posición determinada del plano C, entonces el eje de elevación recorre el rango del ángulo de elevación ($0^\circ - 90^\circ$ o $0^\circ - 180^\circ$). El eje de elevación se detiene en cada punto de prueba y la fotocelda toma una medición rápida, entonces el gonio comienza de nuevo. Mientras el goniómetro está estacionario en cada punto de prueba múltiple, se pueden hacer mediciones para aumentar la fiabilidad de la lectura. El número de mediciones adquiridas en cada punto se puede establecer en Config. Cuando finaliza la exploración del plano C, la luminaria gira por intervalo de azimut seleccionado para el siguiente plano C que se va a escanear. En planos C alternativos, el eje de elevación se mueve en direcciones opuestas para ganar tiempo. La duración de la prueba variará dependiendo del azimut e intervalos de elevación. Mientras se adquieren los datos, aparecerá una ventana mostrar información relevante, como la que se muestran en la figura 4.3.

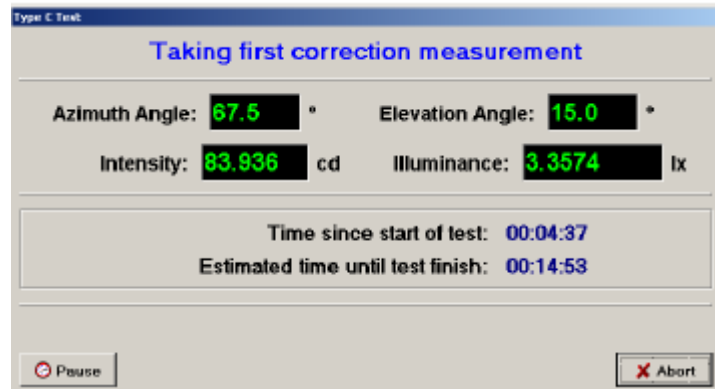


Figura 4.3: Ventana de adquisición de datos

El proceso de medición incorpora 2 rondas de medición, una con la máscara para tomar medida de la luz extraviada y otra sin ella para los datos de la luminaria, como se mencionó anteriormente, el equipo se encarga de restar la luz extraviada.

Para este trabajo en específico se utilizaron pasos en el azimut de 22,5 grados y cambios en la elevación de 5 grados en tipo de luminaria simétrica. Esto debido a que el tiempo de adquisición de datos se acoplaba a las condiciones de tiempo disponible para el trabajo en el laboratorio (cada prueba alrededor de 120 min).

Cuando finaliza la prueba se obtiene el flujo luminoso emitido por la luminaria, junto a ella aparecerá un cuadro de diálogo de parámetros eléctricos. Ahora los datos están registrados en un archivo que puede ser leído por el PhotometricCentre.exe.

4.3 Joystick Control

El modo de operación Joystick se utiliza para movimientos arbitrarios de goniómetro. Puede acceder al joystick desde el menú principal de LGControl ventana, que es la primera ventana que se muestra después de la inicialización cuando LGControl es iniciado. La ventana Joystick también se muestra en varias partes del proceso. La ventana de control de Joystick se muestra en la Figura 4.4.

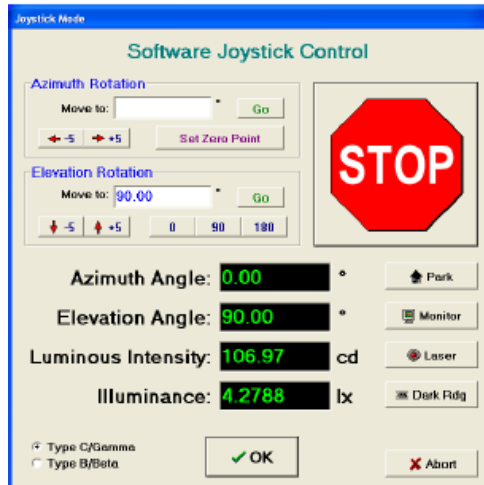


Figura 4.4: La ventana de control de Joystick

Para rotar la luminaria mediante rotaciones de ángulo de azimut. Haga clic en el botón Establecer punto cero para hacer el azimut actual posicionar la posición de inicio de azimut (0°). Para estacionar el gonio, es decir: mueva la luminaria a 0° y mueva la elevación eje a la posición horizontal (90 grados), haga clic en el botón "Aparcar". En la opción de Joystick también se encuentra (medición del color) con el cual se utiliza para tomar medidas del espectro de la luminaria.

4.3.1 Medición del color

- Determinación del tiempo de integración óptimo.
- Toma 10 muestras para determinar si el tiempo de integración es el óptimo
- Muestrea el espectro de la luminaria.
- Utiliza el filtro de bloqueo para medir la corriente de oscuridad.
- Mide la corriente de oscuridad para eliminarla de la medición.
- Muestra los resultados y los guarda, los datos son leídos con el software SPreport.exe.

CAPÍTULO 5: Resultados primeras mediciones

Gracias al estudio del equipo realizado en los dos capítulos anteriores, se pudieron realizar las primeras 2 pruebas goniofotométricas para dos lámparas de muestra. Una de ellas es una bombilla incandescente de 100 W y la otra es una bombilla LED de 2 W. Estas primeras pruebas se realizaron con el fin de obtener las curvas polares de ambas luminarias, así como su isométrico formado por la intensidad de luz en todas las direcciones. Además, se tomó muestra de su espectro, ya que al ser una bombilla LED y una bombilla incandescente, sus espectros son conocidos. Con ello se busca comprobar de manera visual el buen funcionamiento del espectroradiómetro. Las condiciones de paso de ángulo se establecieron como 90 grados en azimut y 5 grados en elevación, luminaria simétrica.



Figura 5.1: Fuentes de luz utilizadas como muestra para estudiar las funciones del equipo
(a) bombilla incandescente de 100 W (b) bombilla LED de 2 W.

En la figura 5.1.a se muestra una fotografía de la bombilla incandescente y en la figura 5.1.b se muestra una fotografía de la bombilla LED perteneciente al LAFTLA.

Una vez realizadas las pruebas se obtuvieron sus 2 curvas polares con el equipo en funcionamiento. Estas curvas fueron obtenidas mediante las consideraciones de paso de án-

gulo establecidas anteriormente. Cabe destacar que se probaron varias de las opciones del equipo para medir entre ellos distintos pasos de ángulos, y se determinó que el equipo funciona correctamente en pasos de 5 grados en el giro de elevación y cualquier paso en el azimut. Para otros pasos en el giro de elevación el programa crea curvas no reales de la luminaria. Los resultados óptimos de ambas curvas polares y su isométrico se observan en la figura 5.2 para la bombilla incandescente y 5.3 para la bombilla LED.

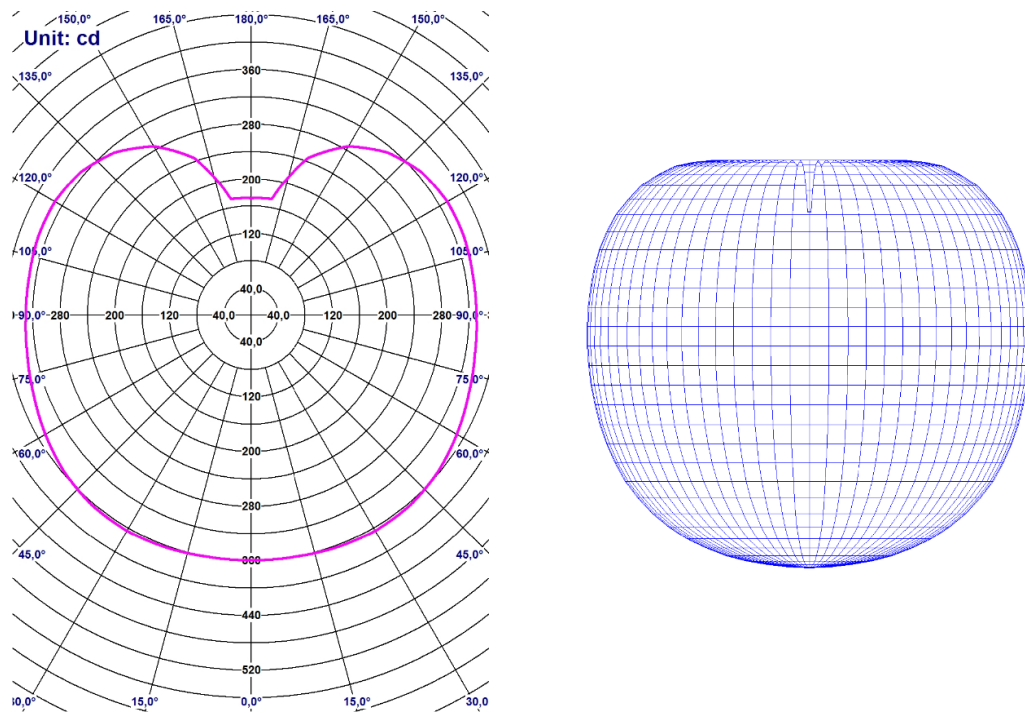


Figura 5.2: Curvas polares de la bombilla incandescente 100 W.

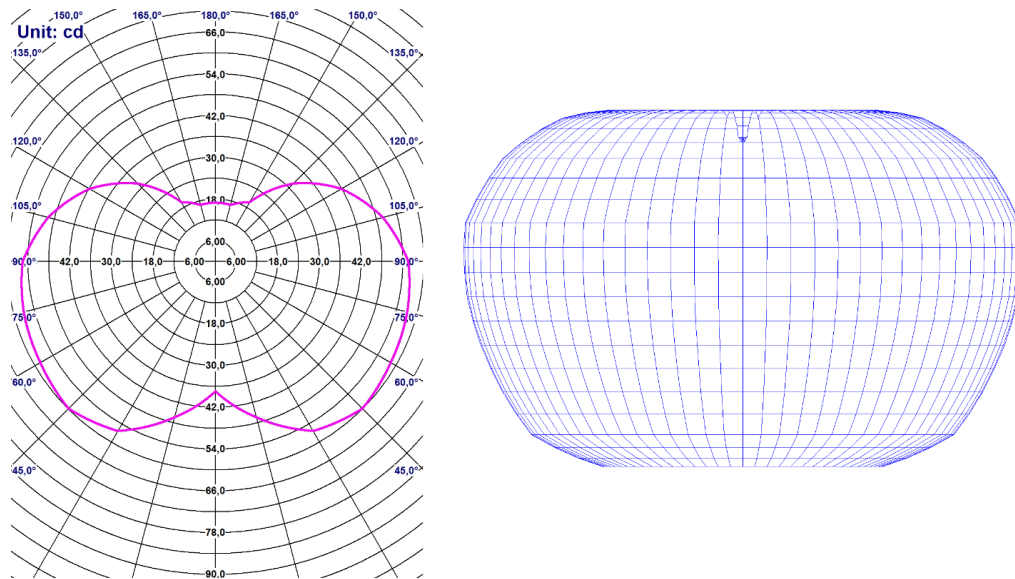


Figura 5.3: Curvas polares de la bombilla LED 2 W.

Finalmente se observan las curvas espectrales obtenidos con el SP-3C de cada una de las fuentes de luz mencionadas en este capítulo donde se observa en la figura 5.4 el espectro de la bombilla incandescente el cual se familiariza con el espectro de emisión de un cuerpo negro, donde el color negro del gráfico representa el infrarrojo. Por otro lado, en la figura 5.5 se puede observar la curva espectral de la bombilla LED la cual como se esperaba presenta un pico en el rango del azul dada la construcción de los LED blancos a base de un diodo azul y una gran parte de su espectro generado por la capa de fósforo con la que se hacen los LEDs blancos. En estas figuras se incluye también su diagrama de cromaticidad obtenido con el programa. Cabe destacar que la temperatura de color para la bombilla incandescente obtenida fue de 2710 K con coordenadas $x = 0,4598$ y $y = 0,4107$. Mientras que para el LED blanco se obtuvo una temperatura de color 4069 K con coordenadas $x = 0,3766$ y $y = 0,3716$. Los datos fueron visualizados a través del programa SPReport.exe el cual es el encargado de desplegar los gráficos y generar un reporte. El LAFTLA cuenta con la licencia para utilizar libremente este programa y generar sus propios reportes personalizados.

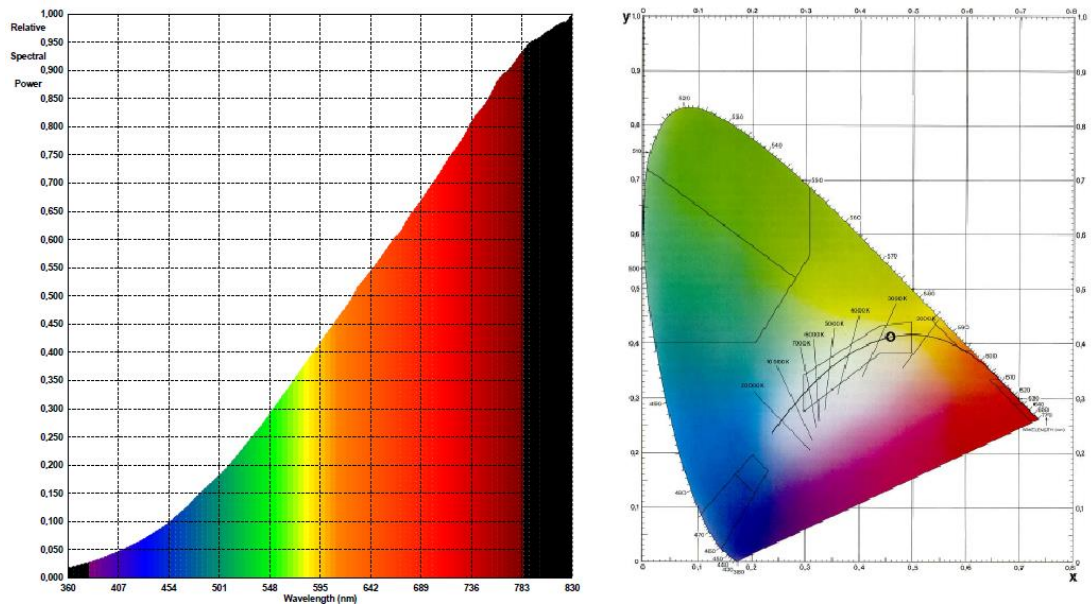


Figura 5.4: Bombilla incandescente 100 W. (a) espectro de emisión (b) diagrama de cromaticidad

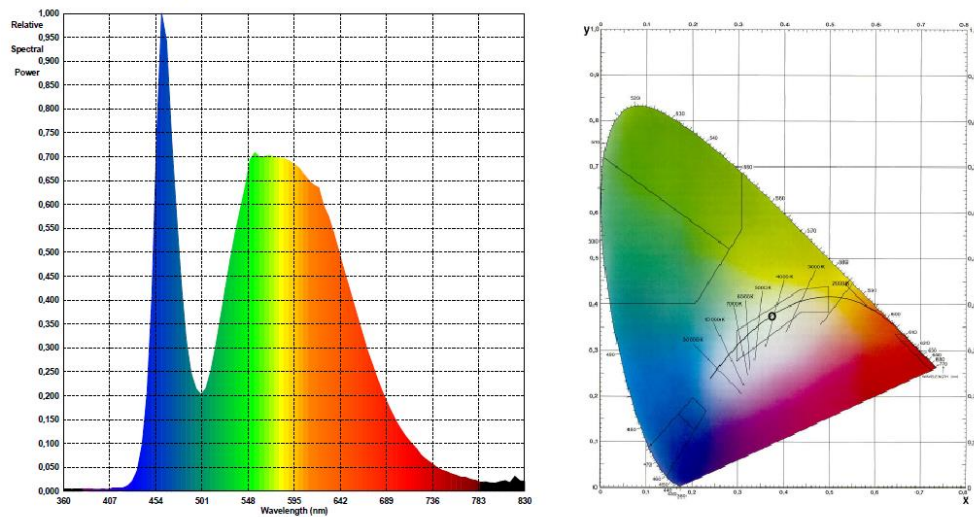


Figura 5.5: bombilla LED 2 W. (a) espectro de emisión (b) diagrama de cromaticidad

CAPÍTULO 6: Medición de luminaria LED del LEE del ICE

En esta Sección se trabajó la comparación de mediciones realizadas en el goniofotómetro del LAFTLA de la Universidad de Costa Rica y el goniofotómetro del LEE del ICE que se observa en la figura 6.1. Las comparaciones, como se menciona en la metodología, se validan bajo el método del Z-Score. El método utiliza tanto los valores promedio de la medición, así como las incertidumbres combinadas de cada laboratorio para el equipo de medición.

El goniofotómetro del ICE es un goniofotómetro tipo C ya que posee un espejo que gira alrededor de la luminaria y genera curvas fotométricas en Coordenadas C/Y. En la figura 33.a se observa este goniofotómetro con la luminaria apagada en posición cero y en la figura 33.b se observa en plena medición cuando el espejo cruzaba los 180 grados en el plano de elevación.



Figura 6.1: Goniofotómetro del LEE, ICE. (a) Posición cero (b) Medición en elevación a 180 grados

Como muestra para la medición se eligió una bombilla LED marca Phillips de 8 W con el número de serie 106-18, la cual se muestra en la figura 6.2. La intensidad luminosa por ángulo de esta bombilla fue medida en ambos laboratorios.



Figura 6.2: Lámpara de muestra, bombilla LED marca Phillips 8 W

6.1. Condiciones ambientales del laboratorio

Las mediciones en el LAFTLA se realizaron utilizando todos los recursos que posee el laboratorio con el fin de evaluar la situación actual del laboratorio para realizar mediciones goniométricas. La temperatura del laboratorio se controló a través del sistema de aire acondicionado del laboratorio. Las temperaturas durante las pruebas se tomaron a través del termostato marca RadioShack existente en el laboratorio donde se realizó la medición con valores de temperatura entre 24,5 °C y 25,5 °C. En la figura 6.3 se tiene un par de fotografías del medidor de temperatura utilizado, estas fotografías muestran los puntos máximos y mínimos del sensor utilizado durante la medición. EL medidor posee dos sensores uno interno y otro externo extendido, se utilizó el externo cerca de la lámpara para seguir la norma CIE 121 donde establece que la temperatura alrededor de la fuente de luz debe ser

$25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cabe mencionar que la humedad del ambiente fue de 51% a la hora de la medición lo cual cumple con la norma que solicita menos del 75%.

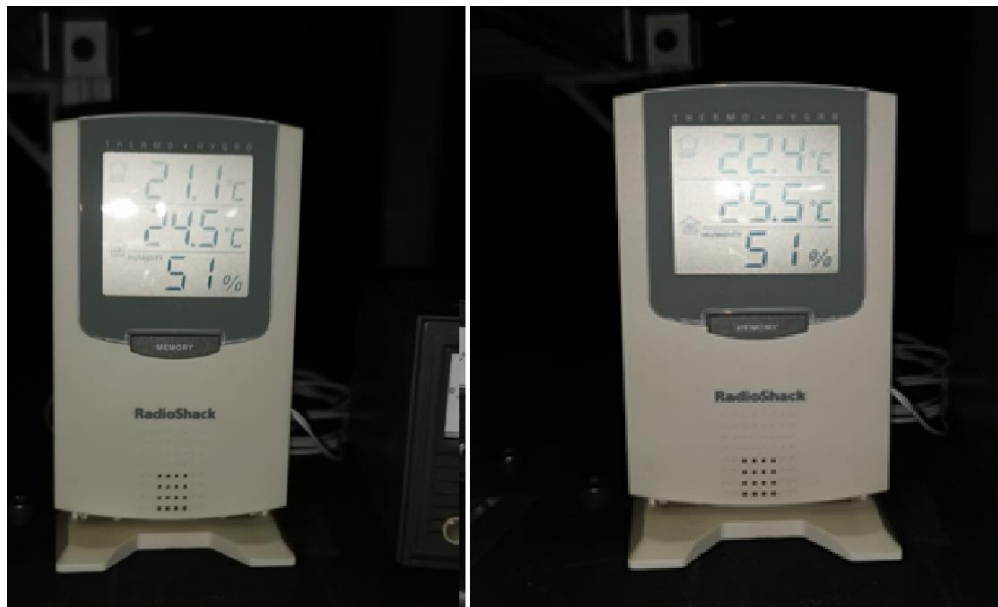


Figura 6.3: Valor máximo y mínimo de la temperatura del laboratorio alrededor de la lámpara durante la medición.

Con lo que respecta a la alimentación eléctrica, en el laboratorio no se cuenta con una fuente programable estable con la cual se pueda ajustar un valor de tensión AC que alcance los $120,00\text{ V} \pm 0,2\%$. Sin embargo, se utilizó para alimentar la bombilla una de las salidas de la UPS del laboratorio, la cual es una UPS con fuente regulada, mantiene la tensión de salida aproximadamente en $120,00\text{ V}$ según su indicador. Este valor fue medido con el multímetro del laboratorio marca Keyshight modelo U1272A con el que se observó que la salida a la UPS es de $120,47\text{ V}$ (ver figura 6.4) para las 10 mediciones realizadas, por lo que el medidor no aporta ninguna incertidumbre de tipo A sobre la medición de la tensión eléctrica ya que su desviación estándar es cero. La UPS es una fuente regulada lo cual nos asegura que la lámpara ha sido alimentada en el valor deseado. Cabe destacar que la salida de un tomacorriente de pared del laboratorio ronda los 126 V por lo que no es buena opción utili-

zar esta salida. Además, dentro de la norma CIE 121 se solicita utilizar una UPS para mantener en todo momento protegida la luminaria de cualquier caída en el fluido eléctrico.



Figura 6.4: Ejemplo del valor de la tensión eléctrica utilizada para alimentar la lámpara.

6.2 Medición de la bombilla LED marca Phillips

Una vez preparado el sistema y las condiciones del laboratorio, se procedió a la medición de la muestra a medir la cual previamente se había utilizado en la medición del LEE. Antes de tomar las medidas, se debe esperar que la luminaria se estabilice (por sugerencia del fabricante del goniofotómetro, para luminarias LED había que esperar al menos 1 hora). En la figura 6.5 se muestra los datos tomados durante una hora, lo que muestran la tendencia de que la iluminancia medida por la fotocelda llega a un punto de estabilización. El programa de LGControl es capaz de desplegar en pantalla el porcentaje de desviación de los valores en los últimos 30 s, por lo que una vez pasada la hora se esperaron 30 segundos más

y se obtuvo un porcentaje de 0,46%. La norma CIE 121 indica que la luminaria está estabilizada cuando el valor de la variable a medir no varíe más del 0,5%.

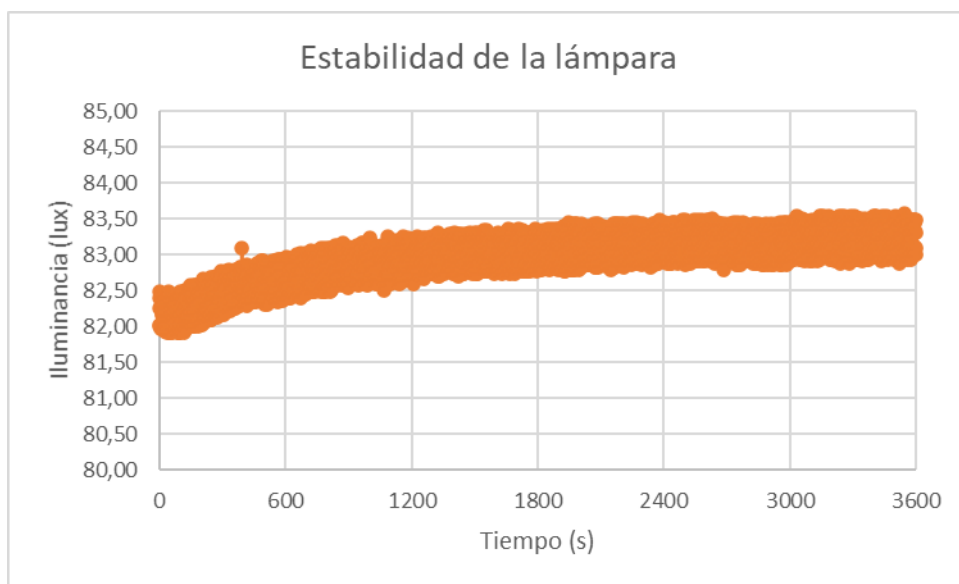


Figura 6.5: Ejemplo de iluminancia medida por la fotocelda durante la hora de estabilización de la bombilla LED marca Phillips 8 W.

Una vez estabilizada la fuente de luz, se procedió a tomar medidas de la luz extraviada. Como se indicó en el capítulo 3, el programa tiene una opción donde mide la luz extraviada a partir de colocar una máscara frente al sensor para bloquear únicamente la luz directa y así captar ángulo a ángulo la luz que incide sobre el sensor indirectamente, sin embargo para este caso se decidió realizarlo por separado ya que en el modo automático del programa uno no puede extraer estos datos y se desea visualizarlos con el fin de tener una idea de la eficacia del cuarto que encierra el sistema. Graficando estos datos contra la posición de elevación se tiene la gráfica de la figura 6.6 donde se observa que para los mayores ángulos en el sistema hay una mayor cantidad de luz extraviada. Esto se debe a que la columna que está de espaldas al equipo no está pintada de negro por lo que la reflexión es mayor. Cabe destacar que, en los ángulos más cercanos a 180 grados, el valor de la luz extraviada era mucho mayor que en los demás ángulos. Se tomaron en total 5 mediciones

diferentes a la misma luminaria. A través del programa de generar reportes, se extrajo los valores de la intensidad luminosa para el ángulo para el plano Υ/C con $C = 0$, esto significa utilizar el plano de medición de azimut 0 grados y elevación de 0 a 180 grados.

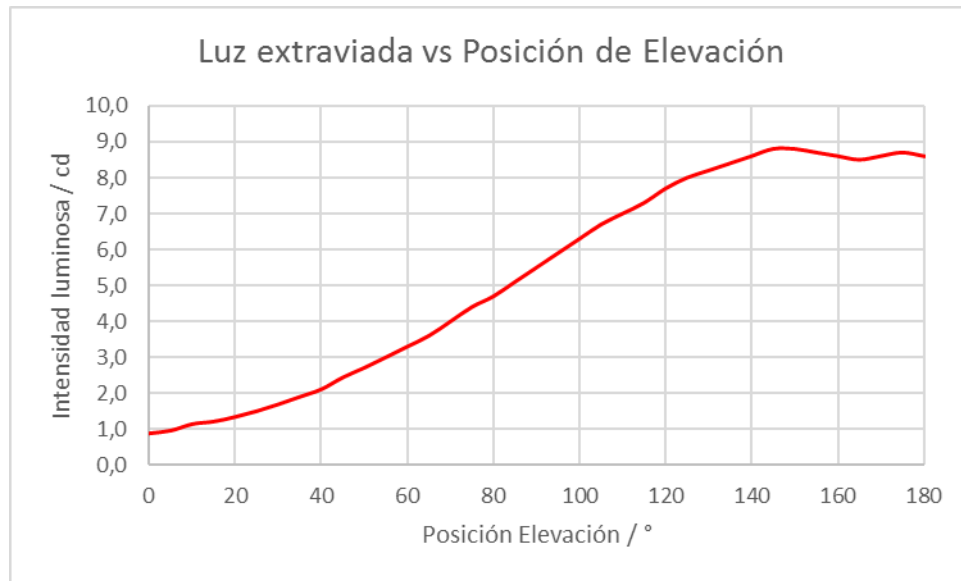


Figura 6.6: Luz extraviada para cada posición de elevación en pasos de 5 grados

Los datos obtenidos de intensidad luminosa por ángulo por el LAFTLA se observan en la tabla 4 junto con su valor promedio y su desviación estándar, con pasos de 5 grados desde 0 grados hasta 180 grados, además se incluyó los valores promedio de la luz extraviada y el resultado final de los datos obtenidos al restar la luz extraviada a las mediciones. Estos datos serán se van a comparar con las mediciones realizadas por LEE del ICE. Los datos obtenidos con el equipo goniofotómetro del LAFTLA se encuentran en la tabla 6.1.

6.3 Incertidumbre asociada al equipo

Una vez obtenidos los valores en todas las mediciones, se procedió a calcular la incertidumbre de cada medición por ángulo. Un ejemplo de cómo se calculó la incertidumbre se muestra en la tabla 6.2, donde esta tabla incorpora las incertidumbres obtenidas por las distintas fuentes de error, su tipo de incertidumbre (si es tipo A para la incertidumbre asociada a la repetibilidad del experimento o tipo B a las incertidumbres propias del equipo de medición u obtenidas por certificados de calibración). Las incertidumbres tipo A obtiene propiamente de la medición a partir de la ecuación (2.7-3) donde el número de mediciones fueron 5. Para las incertidumbres tipo B se calcularon mediante las ecuaciones (2.7-4) y (2.7-5) según corresponda a su tipo de fuente de error. La incertidumbre combinada se obtiene a través los aportes de incertidumbre de cada fuente de error y se obtiene mediante la ecuación (2.7-6). Dentro de la lista de fuentes de error consideradas durante estas mediciones se tienen las siguientes:

- Incertidumbre de tipo A:
- Repetibilidad de la medición, obtenida a través de la desviación estándar de las mediciones.
- Incertidumbres de tipo B:
- La linealidad del sensor (0,1%) obtenida de las características del fabricante.
- Resolución del sensor (0,1 cd) obtenida de la resolución de la consola.
- Fluctuación del sensor (0,5%) obtenida de las características del fabricante.
- Paso del ángulo (0,1 °) resolución del paso en ángulos del controlador de los motores.
- Cinta métrica ($\pm 0,5$ mm) incertidumbre asociada al elemento de medición utilizado para establecer los 3 metros.
- La responsividad de la fotocelda (14,00 lux/nA $\pm 0,07$) obtenida de un certificado de calibración de la fotocelda realizado por el fabricante.
- Filtro $V(\lambda)$ (1,21%) obtenida de un certificado de calibración de la fotocelda realizado por el fabricante.

- Resolución del multímetro (0,01 V) resolución del equipo de medición de la tensión eléctrica con la que fue alimentada la lámpara.

Otras fuentes de error que se deben considerar en fotometría:

- Luz extraviada la cual corresponde a la luz que llega indirectamente a la fotocelda a través de reflexiones. (se obtuvo utilizando el método de la máscara)
- Luz de oscuridad (el equipo la corrige mediante una opción previa a la medición)
-

De esta manera se tiene la contribución total de las incertidumbres de cada fuente de error.

Tabla 6.2: Ejemplo del cálculo de incertidumbre para un ángulo de 0 grados en el azimut y 0 grados en la elevación.

Incertidumbre de la intensidad luminosa, considerando factores de repetibilidad y fluctuación

Nº	Fuente de incertidumbre	Valor estimado	Incer. original	Tipo Distribución	Incertidumbre Estandar $u(x_i)$	Coficiente Sensibilidad	Contribución $u_i(y)$	$(u_i(y))^2$
1	Repetibilidad flujo	9,2	0,000	A	0,0000	1	0,0000	0,000000
2	sensor linealidad	xxxx	0,10%	B, rect	0,0053	1	0,0053	0,000028
3	Resolución cd	xxxx	0,1	B, rect	0,0289	1	0,0289	0,000833
4	Fluctuación sensor	xxxx	0,50%	B, rect	0,0266	1	0,0266	0,000705
5	resolucion paso ángulo	xxxx	0,1	B, rect	0,0289	1	0,0289	0,000833
6	distancia	xxxx	±0,5 mm	B, rect	0,0029	1	0,0029	0,000008
7	Responsividad del detector	xxxx	0,50%	B, rect	0,0266	1	0,0266	0,000705
8	Filtro $V(\lambda)$	xxxx	1,21%	B, rect	0,0643	1	0,0643	0,004131
9	Resolución multímetro	xxxx	0,01	B, rect	0,0029	1	0,0029	0,000008
								0,007
Incertidumbre estándar combinada $u_F/m W$								0,085

6.4 Obtención de las curvas polares y diagramas espectrales de la lámpara LED Phillips de 8 Watts.

Con el programa de PhotometricCenter.exe se extrajo la curva fotométrica y el isométrico de la luminaria de prueba, estas se observan en la figura 6.7 y 6.8 respectivamente. El software PhotometricCenter.exe lee un archivo generado por LGcontrol.exe y genera un pdf con los resultados de la prueba.

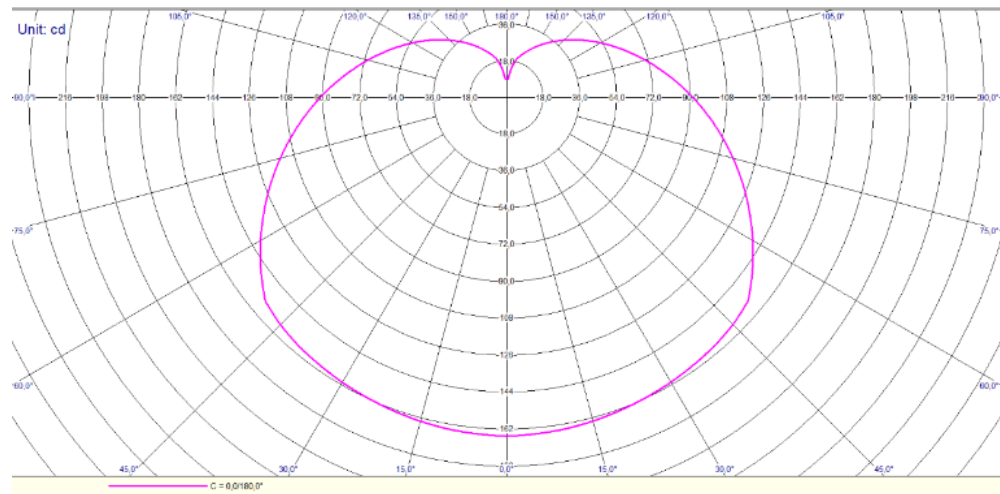


Figura 6.7: Curva polar de la bombilla LED Phillips 106-18 de 8 W.

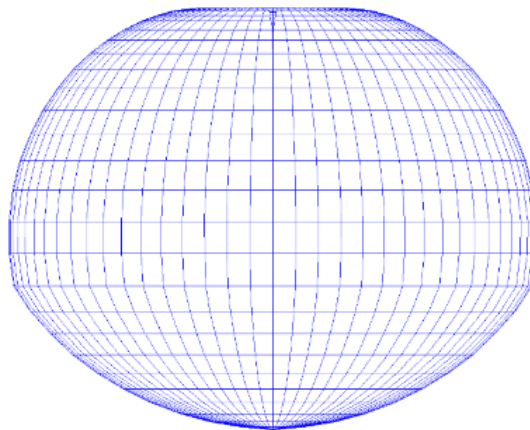


Figura 6.8: Isométrico generado por la emisión de la bombilla LED Phillips 106-18 de 8 W.

Por último, se tomó una muestra espectral de la luminaria LED Phillips 106-18 la cual se observa en la figura 6.9, donde se observa la gráfica que contienen su espectro electromagnético obtenido con el espectroradiómetro y su diagrama de cromaticidad respectivamente. Se obtuvo que las coordenadas cromáticas del diagrama de cromaticidad son 0,4415 y 0,3990 respectivamente, lo que genera un color blanco con una temperatura asociada al color de 2880 K. Esta temperatura del color es de un blanco cálido por lo que es de esperarse que el espectro posea más contenido de los rojos y verdes que del azul que lo genera, esto se observa en la figura 6.9.a, donde el pico dominante se encuentra en el rango espectral del verde mientras que los datos de cromaticidad fueron obtenidos de la figura 6.9.b.

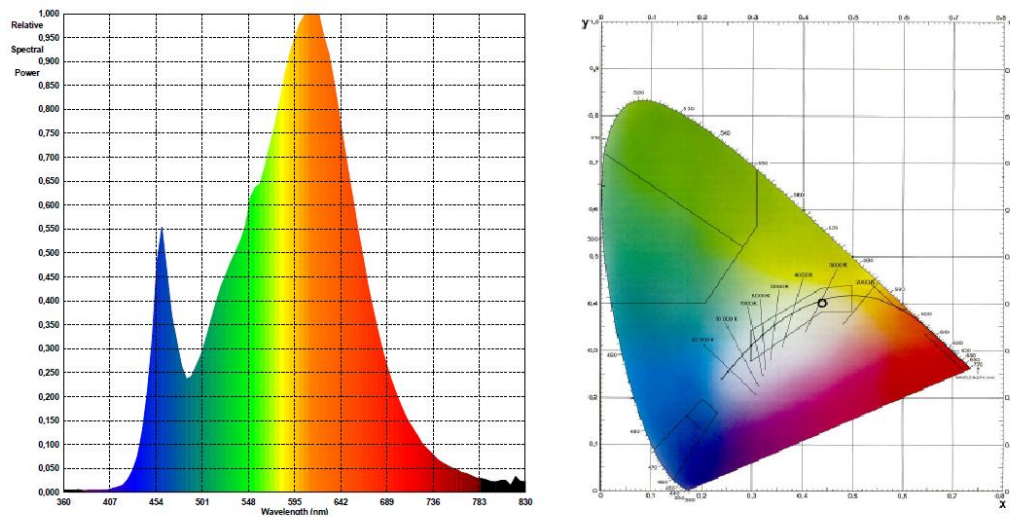


Figura 6.9: bombilla LED marca Phillips 8 W. (a) espectro de emisión (b) diagrama de cromaticidad

CAPÍTULO 7: Comparación de resultados

Una vez obtenidos los datos de medición con el goniofotómetro del LAFTLA se procede a comparar los resultados mediante el Z-score. Donde elegimos el valor del goniofotómetro en el LEE del ICE como la referencia y nuestro valor como el valor a comparar. En la tabla 7.1 se observan los datos otorgados por el ICE de la bombilla LED marca Phillips 106-18 así como los datos obtenidos con el goniofotómetro del LAFTLA y sus respectivas incertidumbres para cada ángulo junto con los datos brindados por el LEE del ICE. De igual manera se calcula estos Z-scores para cada ángulo con un paso de 5 grados y el error entre las mediciones. Para analizar los resultados obtenidos, se dividieron los datos 2 grupos. El primer grupo corresponde a aquellas posiciones en elevación entre los 0 grados y los 90 grados y el segundo grupo aquellas posiciones en que los ángulos de elevación se ubiquen entre los 90 grados y los 180 grados. Con respecto al error calculado para el primer grupo, el 95% de las mediciones realizadas se obtuvo un error menor al 5% y el 5% restante el error estuvo entre 5% y 10% tomando un EMP como 5% se puede decir que para el primer grupo los resultados son aceptables. En cuanto al segundo grupo, hubo una variedad mayor en la comparación, ya que solo el 26% de las mediciones obtuvo un error menor al 5%, el 53% de las mediciones obtuvo un error entre el 5% y el 10% y un 21% de las mediciones superaron el 10% del error, las cuales se dieron en los ángulos más grandes. En la figura 7.1 se observa este resultado en un gráfico de barras que permite visualizar mejor la razón entre los resultados.

Tabla 7.1: Comparación de resultados por el método de Z-Score entre el LAFTLA el LEE

Estudio del error normalizado y Z score						
Intensidad Luminos en cd contra la posición de elevación						
Comparacion LEE - LAFTLA Lámpara 106-18						
Angulo Y (°)	Medicion LEE	incertidumbre C. LEE	Medición LAFTLA	incertidumbre C. LAFTLA	Z score (%)	error %
0	175,74	1,99	179,0	1,48	1,33	1,9
5	175,76	1,99	178,6	1,46	1,14	1,6
10	173,74	1,96	177,5	1,44	1,56	2,2
15	169,78	1,92	175,7	1,42	2,48	3,5
20	168,08	1,90	173,1	1,41	2,13	3,0
25	166,58	1,88	169,6	1,41	1,28	1,8
30	162,36	1,83	165,8	1,37	1,50	2,1
35	157,18	1,78	161,0	1,33	1,71	2,4
40	150,52	1,70	155,8	1,28	2,46	3,5
45	146,84	1,66	149,4	1,24	1,26	1,8
50	139,22	1,57	142,7	1,18	1,78	2,5
55	132,74	1,50	135,6	1,13	1,52	2,2
60	124,38	1,41	127,9	1,07	2,02	2,9
65	114,78	1,30	120,1	1,01	3,24	4,6
70	105,92	1,20	112,0	0,94	4,00	5,8
75	98,90	1,12	103,8	0,88	3,46	5,0
80	92,24	1,04	95,7	0,82	2,61	3,8
85	84,00	0,95	87,9	0,76	3,18	4,6
90	76,38	0,86	80,2	0,70	3,46	5,0
95	69,10	0,78	73,0	0,64	3,82	5,6
100	62,28	0,70	66,2	0,59	4,24	6,3
105	57,18	0,65	59,6	0,54	2,85	4,2
110	50,82	0,57	53,6	0,49	3,72	5,5
115	44,80	0,51	48,0	0,45	4,72	7,1
120	40,80	0,46	42,8	0,41	3,20	4,9
125	35,94	0,41	37,8	0,37	3,42	5,2
130	31,22	0,35	33,4	0,34	4,44	7,0
135	26,70	0,30	29,1	0,34	5,39	9,1
140	23,46	0,27	25,4	0,28	5,04	8,3
145	20,06	0,23	21,9	0,26	5,29	9,1
150	17,10	0,19	18,7	0,23	5,29	9,2
155	14,32	0,16	15,9	0,20	6,07	11,0
160	10,82	0,12	13,2	0,18	10,85	22,0
165	10,60	0,12	10,8	0,16	0,99	1,9
170	6,64	0,08	6,6	0,13	0,27	-0,6
175	3,46	0,04	0,7	0,09	28,94	-79,8
180	1,78	0,02	0,6	0,09	13,51	-66,3



Figura 7.1: Resultado porcentual del error de medición entre el LAFTLA y el LEE.

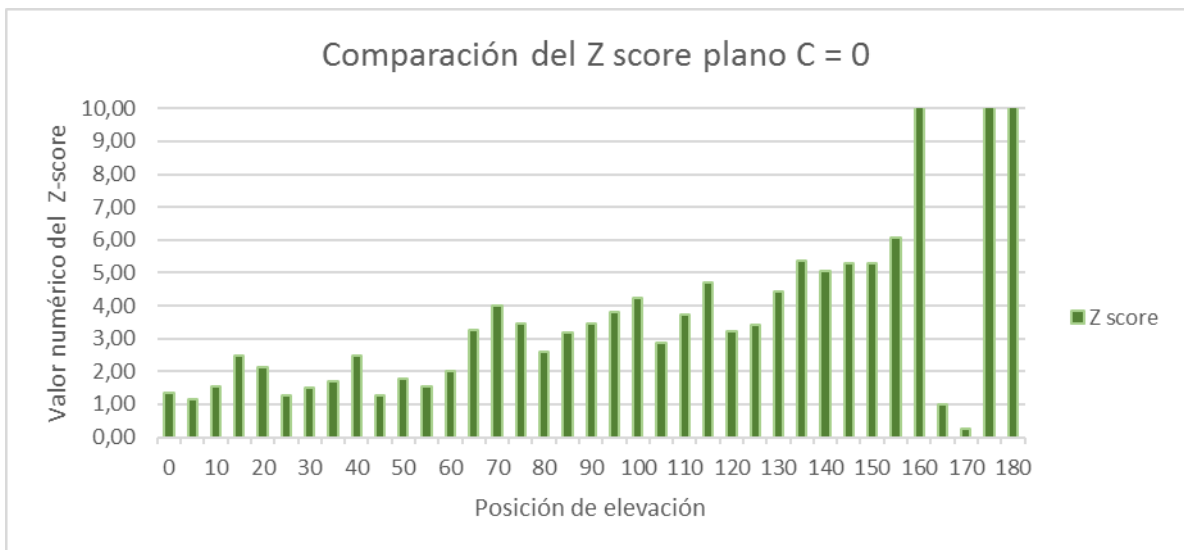


Figura 7.2: Resultado porcentual de la comparación por el método de Z-Score entre el LAFTLA y el LEE.

Con respecto a la comparación del Z-score calculado a partir de la ecuación (2.8-1), se realizó un gráfico de barras en la figura 7.2 para los resultados del primer grupo. Como

resultado de este análisis se muestra que el 47 % de los resultados son comparables. Esto debido a que conforme aumenta los ángulos, a pesar de que el error es relativamente pequeño, la resolución del sistema de medición provoca que los valores más pequeños posean errores más grandes y esto genera un aumento en el Z-Score. En la figura 7.2 se muestra para el segundo grupo que solo el 11% de los datos medidos en ángulos de 90 a 180 son comparables.

Como conclusión a estos resultados podemos determinar que el goniómetro del LAFTLA no está preparado para mediciones comerciales ya que menos de la mitad de los resultados analizados han resultado comparables con el goniómetro del LEE. El desarrollo y acondicionamiento de la sección del laboratorio para el equipo, así como la curva de aprendizaje que llevaron el proyecto a este punto es un claro ejemplo de las capacidades didácticas del equipo. El funcionamiento del sistema, así como sus diferentes cualidades para la medición fotométrica hace del equipo una herramienta al curso de radiometría y fotometría para introducir los conceptos de la goniometría. Cabe destacar que la capacidad actualmente no está maximizada ya que hay una serie de detalles que podrían mejorar drásticamente los resultados, principalmente se tiene que la fotocelda nunca se ha utilizado hasta el momento y no posee ninguna trazabilidad con otro equipo. Si a este equipo se le da trazabilidad se puede obtener un factor de corrección que disminuya el error con la referencia lo que generaría un Z-Score más pequeño. Además, al darle trazabilidad podríamos aumentar la incertidumbre lo que generaría un Z-Score más bajo. En este trabajo se tiene una última sección de recomendaciones que podrían mejorar los resultados basado en los requerimientos de la CIE 121, en la experiencia y problemas encontrados durante el proceso de este proyecto que podría tener resultados mucho más favorables.

CAPÍTULO 8: Conclusiones

- Los equipos permiten las mediciones de tipo goniofotométricas y mediciones espectrales de luminarias siempre y cuando estas estén sujetas a sus características mecánicas.
- Las condiciones del equipo se ajustan a la norma CIE 121.
- Se fue capaz de generar curvas fotométricas bajo la norma CIE 121.
- Se determinó que el equipo no está listo para mediciones comerciales o al menos no para todos los ángulos, pero puede ser una herramienta académica para mejorar el curso de radiometría y fotometría de la Escuela de Ingeniería Eléctrica.
- Se deben incorporar más fuentes de error como lo puede ser la trazabilidad al Sistema internacional de Unidades lo que permitiría tener un factor de corrección sobre la totalidad del equipo, así como una mayor incertidumbre que ayudaría a mejorar el Z-Score.

CAPÍTULO 9: Recomendaciones

- Pintar de negro mate la columna trasera, así como el cielo raso y la mesa que soporta el goniómetro.
- Instalar rieles en el piso para que la mesa móvil solo se mueva en un solo eje y facilite la alineación del equipo.
- Ensamblar una pieza a la punta del goniómetro que posea un espejo que permita utilizar el mismo láser para alinear ambos ejes ópticos.
- Se requiere dar trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades al detector fotométrico para conocer la deriva del equipo de medición y tomar en cuenta este factor en el cálculo de incertidumbre
- Conseguir una fuente regulada variable con alcance a los 120 Vrms.

BIBLIOGRAFÍA

Bergen A.S.J. y Jenkins S.E. (2016). Fundamental Concepts in Goniophotometry v3.1. Photometric Solutions International.

ICONTEC (2000). Vocabulario de Términos Básicos y Generales en Metrología. NTC 2194. Bogota.

International Commission on illumination (1996). CIE-121. The Photometry and Goniophotometry of luminaires.

International Organization for Standardization. (2010). ISO/IEC 17043:2010(es) Evaluación de la conformidad, Requisitos generales para los ensayos de aptitud.

Marín L.D (2019). Manual de Radiometría y fotometría. LAFTLA. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

Photometric Solutions International Pty Ltd (2018). Photometric Solutions International the new generation in photometric technology. Recuperado de <http://www.photometricsolutions.com>

Sanclemente J. (2011) Estudio lumínico de proyecto de mejora de alumbrado público de Anzañigo. ETM. España.

Schwanengel, Christian (2010). Comparison of techniques for measuring luminous intensity distribution overall and across segments. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH. Germany: Recuperado de: <https://www.technoteam.de>

