

Centro de Enseñanza Técnica y Superior

Con reconocimiento de validez oficial de estudios del Gobierno del Estado de Baja California
según Acuerdo de fecha 10 de octubre de 1983



Maestría en ingeniería e innovación

Desarrollo de un fotogoniómetro para la realización de prueba
fotométrica a los reflectores de las luminarias de Obstrucción
como innovación al proceso de evaluación de calidad en la
empresa Dialight

Tesis para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería

Presenta:

Erick André Rodríguez Maldonado

Ensenada Baja California, a 9 de marzo del año 2020

Tesis defendida por
Erick André Rodríguez Maldonado

y aprobada por el siguiente comité:

Dr. Josué Aarón López Leyva
Director de tesis

Dr. Gerardo Hirata Salazar
Sinodal de tesis

Dr. Abimael Eliaquim Salcedo García
Sinodal de tesis

M.C. Amanda Georgina Nieto Sánchez
Coordinadora del Posgrado

Dr. Dalia Holanda Chavez Garcia
Directora de Escuela de Ingeniería

Erick André Rodríguez Maldonado © 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Erick André Rodríguez Maldonado** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ingeniería e Innovación.

Desarrollo de un fotogoniómetro para la realización de prueba fotométrica a los reflectores de las luminarias de Obstrucción como innovación al proceso de evaluación de calidad en la empresa Dialight

Resumen aprobado por:

Dr. Josué Aarón López Leyva
Director de tesis

Los reflectores son una parte crítica de una luminaria, en ellos recae que la distribución de la luz para la cual fue diseñada la luminaria cumpla con la especificación descrita en los catálogos de cliente, y por consecuente que el proyecto de aplicación del cliente sea satisfactorio. Para poder asegurar que el desempeño óptico de los reflectores sea el esperado y las pruebas funcionales de las luminarias sean satisfactorias, es necesario asegurar que el material utilizado cumpla con los requerimientos de diseño, para esto se emplea una herramienta que permite visualizar el desempeño óptico del material llamada curva fotométrica, la cual se obtiene mediante la medición de la distribución de la luz (también llamada prueba fotométrica). El propósito de este proyecto de tesis es el desarrollo de una herramienta llamada fotogoniómetro que permite realizar pruebas fotométricas a los reflectores de las luminarias de obstrucción, dicho proceso de prueba es efectuado previo al ensamble de la luminaria por lo que se minimizan las fallas durante la prueba óptica funcional del producto terminado, resultando en un aumento de la eficiencia del proceso de fabricación y por consecuente un ahorro monetario por la reducción del tiempo de proceso.

Palabras clave: Fotogoniómetro, prueba fotométrica, reflectores

Abstract of the thesis presented by **Erick André Rodríguez Maldonado** as a partial requirement to obtain the Master in Engineering and Innovation.

Desarrollo de un fotogoniómetro para la realización de prueba fotométrica a los reflectores de las luminarias de Obstrucción como innovación al proceso de evaluación de calidad en la empresa Dialight

Abstract approved by:

Dr. Josué Aarón López Leyva
Thesis director

Reflectors play a critical role within the optical performance of a luminaire; they are the key to meet the design specifications of the light distribution as it is described in the advertisement for the customers, which implies that the customer get positive results in any illumination projects. In order to ensure the correct optical performance of the reflectors and guarantee positive results during the functional optical tests of the finished goods, it is needed to make sure that the material used within the assembly of the luminaire complies with the design requirements, for this purpose it is used a diagram that allows to visualize the optical performance of the reflectors named photometric curve, this curve is obtained by measuring the intensity of the light distribution at different angles (also known as photometric test). The purpose of this project is to develop an specific tool used to perform photometric tests named photogoniometer, this tool will allow to evaluate the performance of the reflectors prior to the assembly process which will minimize the failed tests during the functional optical test of the luminaire. As final result the efficiency of the process will be raised along with a monetary saving due to the process time reduction.

Keywords: Photogoniometer, photometric test, reflectors

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación está dedicado a mis padres Ismael y Margarita, quienes con su infinito cariño y amor incondicional acompañados de su gran esfuerzo y dedicación, me han permitido alcanzar una meta más en mi vida profesional y académica. Gracias por inculcar en mí los valores de perseverancia, responsabilidad y respeto, los cuales me han permitido hacer frente a todos los desafíos que se me presentan y sobre todo, gracias por estar ahí siempre que lo necesito, quiero que sepan que son mi ejemplo de vida y estoy orgulloso de ser su hijo.

A mi hermana Ariana, quien con su ejemplo me ha demostrado que la adversidad es solo un reto más en la vida que te guía hacia un mejor futuro y sobre todo por su enorme cariño y gran apoyo.

A mi novia Karla, quien por los últimos 5 años ha recorrido conmigo diversos trayectos para cumplir cada objetivo que me propongo, su amor y apoyo incondicional han sido la fuerza que impulsa a seguir adelante.

Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por sus contribuciones mediante el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) en la modalidad Posgrados con la Industria bajo el número de beca 496510. De la misma forma agradezco a la Cámara Nacional de la Industria de Transformación (CANACINTRA), al Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS) y a la empresa Dialight de México, instituciones cuyas aportaciones fueron clave para el desarrollo satisfactorio de este proyecto de tesis.

Agradezco extensamente a mi director de tesis el Dr. Josué López cuyas observaciones y comentarios fueron siempre con el mejor criterio, siendo así un excelente guía para obtener un trabajo de calidad, y a la maestra y coordinadora de posgrado M.C. Amanda Nieto cuyas valiosas enseñanzas fueron fundamentales durante el trayecto de este proyecto.

De igual manera agradezco a mis colegas en la empresa Dialight quienes me brindaron su gran apoyo durante la realización de este trabajo.

Tabla de Contenido

	Página
Capítulo 1. Introducción.....	5
1.1 Planteamiento del Problema	7
1.2 Antecedentes Bibliográficos	9
1.3 Justificación.....	14
1.4 Hipótesis.....	15
1.5 Objetivos de investigación	15
1.5.1 Objetivo general	15
1.5.2 Objetivos específicos	15
Capítulo 2. Marco teórico.....	16
2.1 Óptica	16
2.2 Reflexión	16
2.3 Refracción	17
2.4 Magnitudes fotométricas, unidades y estándares	17
2.5 Fotodetector	18
2.6 Fotómetro	18
2.7 Curvas fotométricas o curvas de distribución de intensidad	18
2.8 Tarjeta de circuito impreso.....	20
2.9 Diodo emisor de luz	21
2.10 Luminaria LED y sus elementos	22
2.11 Categorías de luminarias de obstrucción y su aplicación	25
2.12 Requerimientos de intensidad en luces de obstrucción	27
2.13 Prueba óptica funcional en luminarias Dialight.....	28
2.15 Interfaz gráfica de usuario	30

Tabla de Contenido (continuación)

	Página
Capítulo 3. Metodología.....	31
3.1 Especificaciones del diseño.....	31
3.2 Selección de Tecnologías	32
3.3 Diseño	34
3.4 Construcción de prototipo y pruebas preliminares.....	38
3.5 Pruebas de campo	38
Capítulo 4. Resultados y discusión	40
4.1 Pruebas preliminares	40
4.2 Pruebas de campo	42
4.3 Desempeño del proceso	45
4.4 Discusión	47
Capítulo 5. Conclusiones.....	48
Anexos.....	49
Literatura citada	611

Lista de figuras

Figura 1	Requerimientos impuestos sobre las torres de comunicación por la FAA	6
Figura 2	Funcionamiento de un fotogoniómetro tipo A	9
Figura 3	Funcionamiento de un fotogoniómetro tipo B	10
Figura 4	Funcionamiento de un fotogoniómetro tipo C	10
Figura 5	Esquema general del fotogoniómetro tipo C.....	11
Figura 6	Fotogoniómetro Automatizado	12
Figura 7	Representación gráfica de la reflexión de la luz	16
Figura 8	Representación gráfica de la refracción de la luz	17
Figura 9.	Ejemplo de curva fotométrica.....	19
Figura 10.	Ejemplo de un PCB	20
Figura 11.	Ejemplos de LEDs	22
Figura 12.	Fuente de alimentación para luminarias LED	23
Figura 13.	Visualización de la unión entre el ensamble PCB del LED y el elemento disipador.....	24
Figura 14.	Reflector utilizado en las luminarias L-856 de Dialight.....	25
Figura 15.	Luz L-856 de Dialight	25
Figura 16.	Luz L-865 de Dialight	26
Figura 17.	Luz L-864 de Dialight	26
Figura 18.	Luz L-810 de Dialight	27
Figura 19.	Alineación entre luminaria y sensor óptico para una medición a 0°	28
Figura 20.	Luminaria L-856 vista desde arriba, la flecha indica la dirección del haz de luz.....	29
Figura 21	Instalaciones de prueba óptica para producto terminado en la empresa Dialight	30
Figura 22.	Ensamble PCB de LEDs	32
Figura 23.	Interfaz de usuario del equipo LC100 de THORLABS	33
Figura 24.	Plano de construcción de la base principal de la estructura de montaje	34
Figura 25.	Plano de construcción de la base para cámara.....	35
Figura 26.	Plano de construcción de la base para reflector y Fuente de luz	35
Figura 27.	Micrómetro utilizado como dispositivo de ajuste	36
Figura 28.	Bosquejo para el ensamble de herramienta de prueba	36
Figura 29.	Diseño de la interfaz gráfica de usuario.....	37
Figura 30.	Prototipo de fotogoniómetro ensamblado.....	38
Figura 31.	Ensamble de un módulo de luminaria L-856 de Dialight	39
Figura 32.	Histograma para caracterización de fotogoniómetro.....	41
Figura 33.	Ejemplo del resultado de reflector con defecto de moldeo	42
Figura 34.	Ejemplo del resultado de reflector con defecto de metalizado.....	43
Figura 35.	Ejemplo del resultado de reflector que cumple los criterios de prueba	44
Figura 36.	Comparación entre resultados de tabla 3 y tabla 7	45

Lista de tablas

Tabla 1 Magnitudes fotométricas	18
Tabla 2. Requerimientos típicos de intensidad por tipo de luminaria.....	27
Tabla 3. Resultados de prueba de reflectores ensamblados sin evaluación fotométrica previa	40
Tabla 4. Datos para caracterización de fotogoniómetro	41
Tabla 5. Condiciones de prueba.....	42
Tabla 6. Resultado general de las pruebas a distintos lotes de reflectores.....	44
Tabla 7. Resultados de prueba óptica funcional en product terminado utilizando reflectores previamente evaluados en el fotogoniómetro	45
Tabla 8. Tiempo añadido en proceso de retrabajo por unidad con falla.....	46
Tabla 9. Impacto financiero por material no conformante	46

Capítulo 1. Introducción

Desde hace miles de años, el hombre ha necesitado la iluminación artificial para realizar diversas actividades, principalmente trabajos nocturnos y en lugares poco iluminados (Carreón, 2004). Por consiguiente, es posible generalizar dos aplicaciones principales para la iluminación artificial:

1. Iluminación de zonas donde se pretende realizar una actividad o trabajo y donde el nivel de iluminación requerido depende de la actividad a realizar
2. Identificación o señalización de estructuras u objetos, los cuales se desean poder visualizar incluso en ocasiones donde la iluminación de la zona que lo rodea no es la adecuada

Este texto propone puntualizar las características de la iluminación artificial utilizada como señalización para la identificación de estructuras, debido a su vital importancia especialmente en el espacio aéreo, donde poder visualizar obstáculos en la oscuridad ayuda a evitar colisiones. Así como la iluminación en general, la señalización de estructuras esta estandarizada y regulada, es decir, toda luminaria utilizada para dicha aplicación, debe cumplir normas establecidas por agencias regulatorias.

De acuerdo con los requerimientos de identificación de estructuras de la Administración Federal de Aviación (FAA por sus siglas en inglés) y a la Organización Internacional de Aviación Civil (ICAO por sus siglas en inglés), todas las estructuras con una altura mayor a 150 pies (ft) o 45 metros (m) sobre el nivel del mar deben ser marcadas o identificadas propiamente con luminarias de Obstrucción. Adicionalmente, la Comisión Federal de Comunicación rige los requisitos de monitoreo (Flash Technology, 2018).

Cabe observar que una luminaria de obstrucción es un dispositivo de iluminación utilizado para indicar la presencia de obstáculos en el espacio aéreo, estas luminarias son colocadas en estructuras que puedan representar un peligro para la aeronavegación especialmente de noche o en condiciones de poca visibilidad. Dichos dispositivos deben tener la suficiente intensidad luminosa para poder ser visibles a kilómetros de distancia alrededor de las estructuras y así evitar colisiones; dependiendo de la aplicación (ejemplos: chimeneas industriales, rascacielos o torres de comunicación) y de la altura de la estructura hay diferentes luminarias que se caracterizan por: color de luz, funcionamiento (luz constante o intermitente) y la intensidad luminosa.

Como ejemplo se muestran los requerimientos impuestos sobre las torres de comunicación por parte de la FAA en la figura 1, donde es importante apreciar como los requerimientos cambian dependiendo de la altura de la estructura. En letras azules se muestra la condición de la altura de cada torre, es decir, la altura máxima y mínima que conlleva pertenecer a cada clasificación, y debajo de la condición, el requerimiento

impuesto por la regulación, esto incluye el tipo de luminaria, la cantidad y la condición de funcionamiento. Así mismo, debajo de cada torre, se aprecia el nombre de cada clasificación. Como ejemplo se visualiza la torre de la extrema izquierda, la cual es una torre de tipo A-6 con una altura entre el rango de 533 – 670m (1751 – 2200 pies), sus requerimientos son 11 luminarias tipo L-864 (vea la sección 2.11 para las categorías de la luminarias de obstrucción) ajustadas a 30 destellos por minuto (fpm por sus siglas en inglés “flashes per minute”).

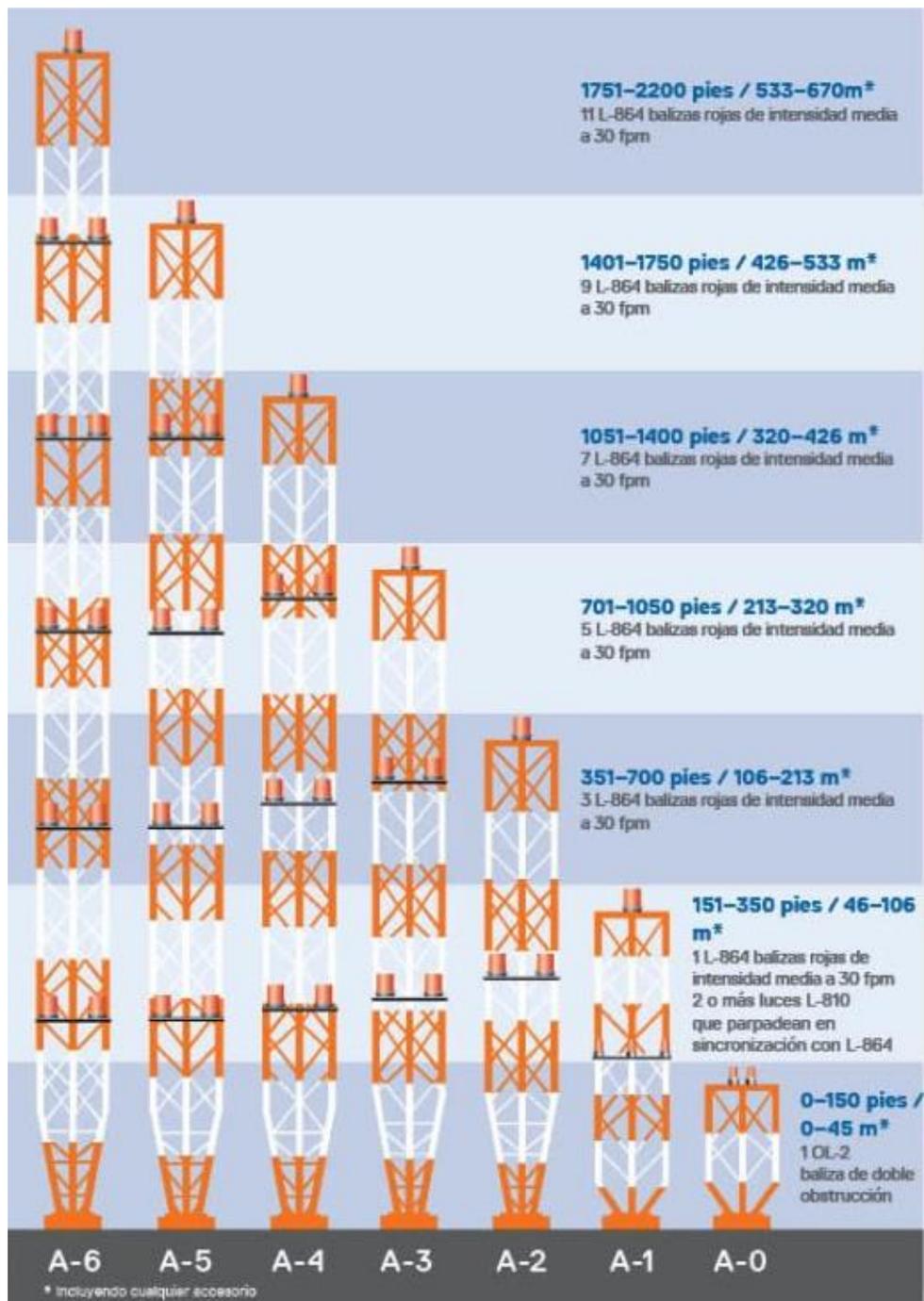


Figura 1. Requerimientos impuestos sobre las torres de comunicación por la FAA (*Flash Technology, 2018*)

El señalamiento lumínico tiene por objeto brindar a los pilotos un medio de distinguir objetos que pudieran interferir las trayectorias de vuelo; esto se logra cuando dichos objetos son claramente percibidos en su forma y dimensiones, así como distancia y ubicación. Sin embargo, debe evitarse la colocación de luces o equipos que provoquen confusión o deslumbramiento al personal de vuelo, ya que esto podría ocasionar un percance de graves consecuencias. Lo anterior ha llevado al uso de colores e intensidades usadas a manera de código, paralelamente con la distribución y configuración (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1995).

1.1 Planteamiento del Problema

La empresa Dialight se caracteriza por su diversa variedad de productos, que permiten ofrecer a sus clientes distintas aplicaciones de la iluminación artificial basada en diodos emisores de luz (LED por sus siglas en inglés “Light Emitting Diode”), desde luz blanca para la iluminación de zonas de trabajo en el sector industrial, hasta luminarias de obstrucción para la identificación y señalización de estructuras. Cabe añadir, que todos los sistemas de iluminación de Dialight están ligados a diversas certificaciones para su uso en aplicaciones específicas, entre ellas, los sistemas de obstrucción están certificadas por las agencias regulatorias ICAO y FAA.

Como se comentó anteriormente, los distintos tipos de certificaciones tienen la implicación de que el producto certificado cumpla con los requerimientos de diseño y funcionamiento, para esto es necesario someter al producto a una serie de pruebas durante el proceso de fabricación que ayuden a asegurar el cumplimiento de los estándares. En el caso de las luminarias de obstrucción, además de la clasificación del funcionamiento (continuo o intermitente) y color de luz, es indispensable la medición de la intensidad lumínica mediante una prueba óptica (vea la sección 2.13 para la definición del proceso de prueba óptica), donde sus resultados dictan si la luminaria puede continuar su proceso o es rechazada y enviada al área de análisis y reparación.

Actualmente la mayor incidencia de fallas registradas durante el proceso de prueba óptica es debido a que las unidades no alcanzan el límite menor de intensidad luminosa, es decir, la intensidad de luz que dichas luminarias están suministrando no es la adecuada para cumplir con los requerimientos del estándar. Esta problemática está directamente relacionada a la calidad de los reflectores utilizados en el ensamble del producto (vea la sección 2.10 para conocer los elementos que componen una luminaria), ya que los reflectores juegan un papel muy importante en cuanto a la eficiencia en la utilización de la luz, esto es

debido a que ellos se encargan de la distribución de la luz, es decir, aseguran que la luz incida en la dirección en la que fue diseñada la luminaria.

En lo que se refiere a la calidad de los reflectores, las variables y/o alteraciones en sus procesos de fabricación como lo son los procesos de metalizado y de moldeo, son las causas que impiden asegurar que el desempeño óptico del producto sea el adecuado, provocando alteraciones en la distribución de la luz y su nivel de refracción, lo que a su vez se identifica como fallas en el proceso de prueba óptica de la luminaria. Por otra parte las fallas de prueba óptica tienen un impacto sobre el tiempo de proceso y a su vez un impacto financiero, esto es debido a que una falla implica desensamblar la unidad para cambiar los reflectores no conformantes, los cuales son desechados.

Este proyecto¹ es enfocado a la industria que fabrica sistemas de iluminación de obstrucción, y a la necesidad que existe de hacer mediciones de intensidad luminosa (pruebas ópticas) como parte del proceso de fabricación para asegurar el cumplimiento de las regulaciones. Actualmente no existe ningún método de inspección implementado en la empresa Dialight que permita asegurar que los reflectores utilizados durante el proceso de ensamble, cumplirán con sus especificaciones de diseño, lo que da lugar a las fallas de prueba óptica y por consiguiente a las ineficiencias del proceso.

La herramienta resultante de este trabajo de investigación permitirá realizar una inspección de la calidad de los reflectores previo a su proceso de ensamble, para así, mitigar las fallas encontradas en una etapa del proceso donde una falla tiene altas implicaciones económicas y en la duración del proceso.

¹Las bases de este proyecto fueron tomadas de los procesos actuales implementados en la planta de manufactura de la empresa Dialight y su desempeño durante las pruebas de producción.

1.2 Antecedentes Bibliográficos

La fotometría es la técnica que se encarga de medir la intensidad de la luz, como el brillo percibido por el ojo humano. Es decir, estudia la capacidad que tiene la radiación electromagnética de estimular el sistema visual. Unos de los instrumentos para estudiar la Fotometría es el Goniómetro, que se utiliza para el montaje de las luminarias. Otro instrumento que se usa es el fotómetro, para medir la iluminancia real y no la subjetiva de un ambiente (Silva, 2018).

De esta forma, un fotogoniómetro es la adaptación de un goniómetro con un fotodetector o detector de luz, el diseño, las dimensiones y el tipo de parámetros a medir con este instrumento depende directamente de la aplicación, es decir, hay distintos tipos de fotogoniómetros y en su mayoría son montajes de laboratorio que cumplen un propósito en específico y para el cual fueron diseñados, como realizar pruebas normalizadas a todo tipo de luminarias como las utilizadas en el alumbrado público, interiores o luces de obstrucción (Mayeya, 2013).

De acuerdo con la aplicación deseada, existen tres tipos de fotogoniómetros basados en tres sistemas de referencia. En primer lugar se tiene el fotogoniómetro tipo A, el cual es un sistema de eje horizontal fijo, como se observa en la figura 2 tiene una rotación de la luminaria alrededor del eje horizontal fijo Y. La luminaria también tiene la posibilidad de girar alrededor del eje vertical X de modo que se completa la esfera sobre la cual se obtienen los datos de la intensidad. En este sistema de coordenadas, los ángulos entre los planos son los llamados X y los ángulos medios en un plano se denominan Y (TINOCO, 2013).

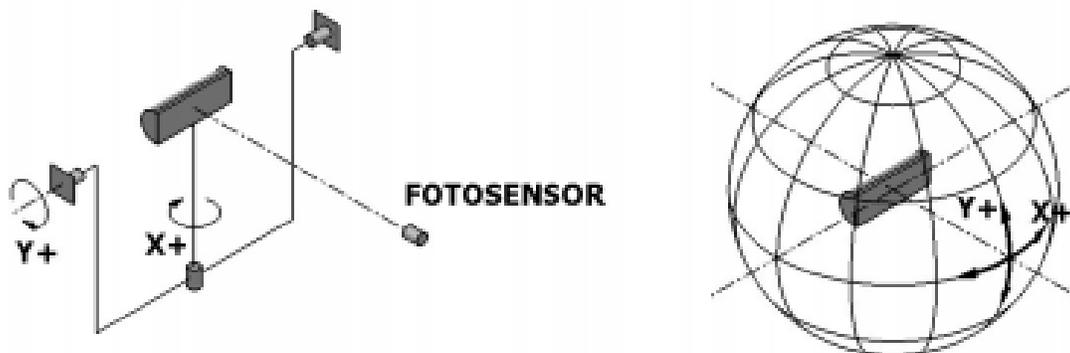


Figura 2 Funcionamiento de un fotogoniómetro tipo A
(Recuperado de: <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fotometria.php>)

Un fotogoniómetro tipo B calcula los valores del mismo modo que el anterior pero en este caso el sistema fijo es el vertical. En el sistema de coordenadas, los ángulos entre planos se denominan V y los ángulos intermedios H tal como se muestra en la figura 3. Este tipo de fotometría es el utilizado principalmente en el cálculo de las medidas de los proyectores (TINOCO, 2013).

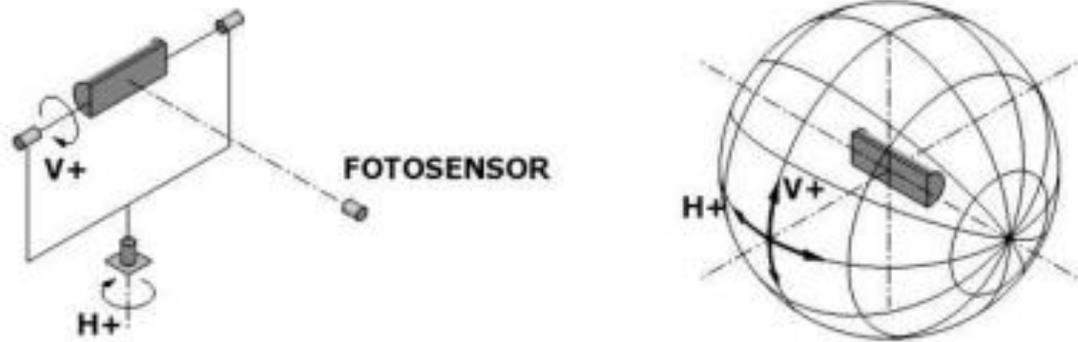


Figura 3 Funcionamiento de un fotogoniómetro tipo B
(Recuperado de: <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemaslluminacion-fotometria.php>)

El fotogoniómetro de tipo C es el sistema de coordenadas más utilizado y recomendado por la Comisión Internacional de la Iluminación (conocida por las siglas CIE, de su nombre en francés Commission internationale de l'éclairage). Este tipo de fotogoniómetro, consta de un fotosensor responsable de la toma de datos o un espejo móvil alrededor del eje horizontal. La luminaria está suspendida y solo puede moverse alrededor de un eje vertical como se muestra en la figura 4. Este tipo de medidas se realizan para luminarias de alumbrado público y de interior (TINOCO, 2013).

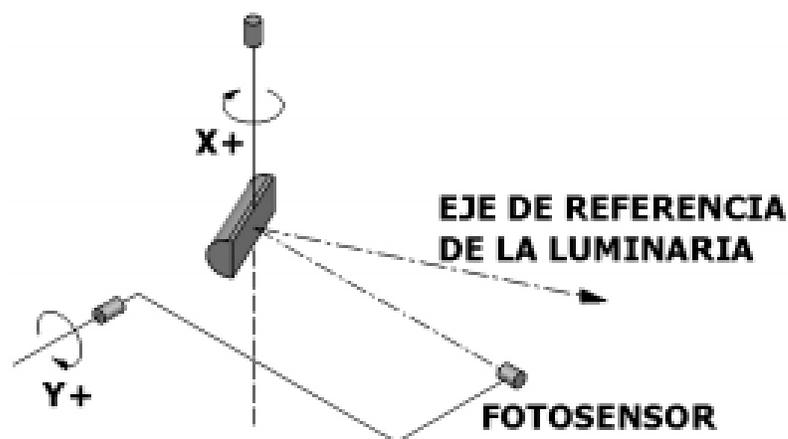


Figura 4 Funcionamiento de un fotogoniómetro tipo C
(Recuperado de: <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemaslluminacion-fotometria.php>)

El uso de un fotogoniómetro conlleva más implicaciones además de la obtención de la herramienta misma, esto es, las condiciones del ambiente durante una evaluación fotométrica deben ser lo suficientemente robustas para mitigar o eliminar la luz externa a la prueba, dicho de otra manera, deben evitar el ruido que pueda ser introducido a la medición por factores ajenos a la prueba. No hay duda de que controlar los niveles de luz ambiental durante una evaluación fotométrica es algo imposible si no se cuenta con las instalaciones adecuadas, por lo que en su mayoría, los fotogoniómetros son utilizados en laboratorios especializados. Esto representa un problema ya que no solo sería cuantificar el costo de la herramienta si no también el de las instalaciones, sin embargo, el desarrollo de un fotogoniómetro propio en lugar de comprar uno comercial, ha demostrado grandes beneficios económicos y de implementación.

A manera de ejemplo, se hace mención el caso de la empresa de luminarias Roy Alpha S.A. que en el año 2007 llevo a cabo un proyecto de investigación que incluyó el desarrollo de un fotogoniómetro para su laboratorio de fotometrías. El sistema resultante es descrito como un fotogoniómetro del tipo C y cuyos resultados fueron comparados con los realizados en un laboratorio de mayor infraestructura tecnológica, mostrando diferencias no mayores al 3%, esto demostró que un desarrollo de bajo costo (~25% menos de lo que implicaría adquirir tecnología importada) puede alcanzar la exactitud y eficiencia necesarias para efectuar mediciones que cumplan con la calidad requerida en laboratorios certificados (Arias-Cuellar, Ealo-Cuello, & Caicedo, 2007). La figura 5 ilustra un esquema general del sistema desarrollado, del lado derecho se muestra una estructura fija con un fotodetector para la medición de la intensidad y del lado izquierdo se tiene la estructura donde es colocada la luminaria.

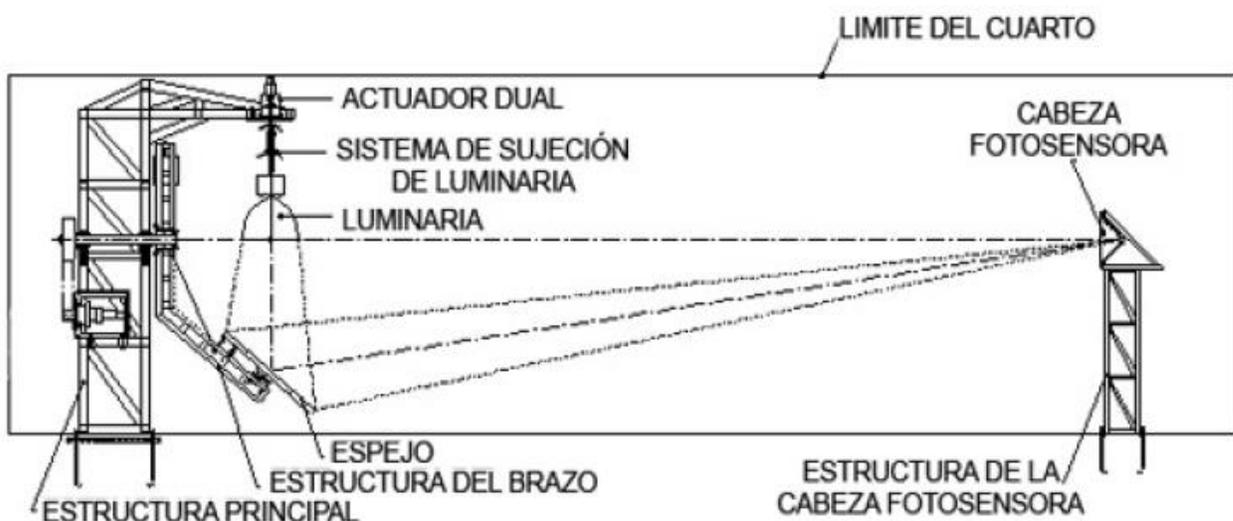


Figura 5 Esquema general del fotogoniómetro tipo C (Arias-Cuellar, Ealo-Cuello, & Caicedo, 2007)

Del mismo modo, en 2014 mediante un trabajo de investigación, se logró obtener resultados satisfactorios al desarrollar con éxito un dispositivo capaz de caracterizar luminarias de alumbrado público. Dicho desarrollo fue basado en la implementación de una tecnología novedosa y muy flexible en el control del fotogoniómetro y la cabeza fotométrica, permitiendo así darle un instrumento al laboratorio de Iluminación de la Facultad Tecnológica, que permita construir curvas fotométricas y efectuar prácticas de laboratorio referentes a la luminotecnia (Torres, Rodríguez, & Franco, Diseño y Construcción de un Fotogoniómetro para el Laboratorio de Iluminación de la Universidad Distrital, Sede Tecnológica, 2014).

Tal como se muestra en la figura 6, el arreglo automatizado resultante del estudio antes mencionado, cuenta con la instrumentación y mecánica necesarias para efectuar fotometrías del tipo C mediante el control de movimiento en los diferentes ejes coordenados de la base porta luminarias.

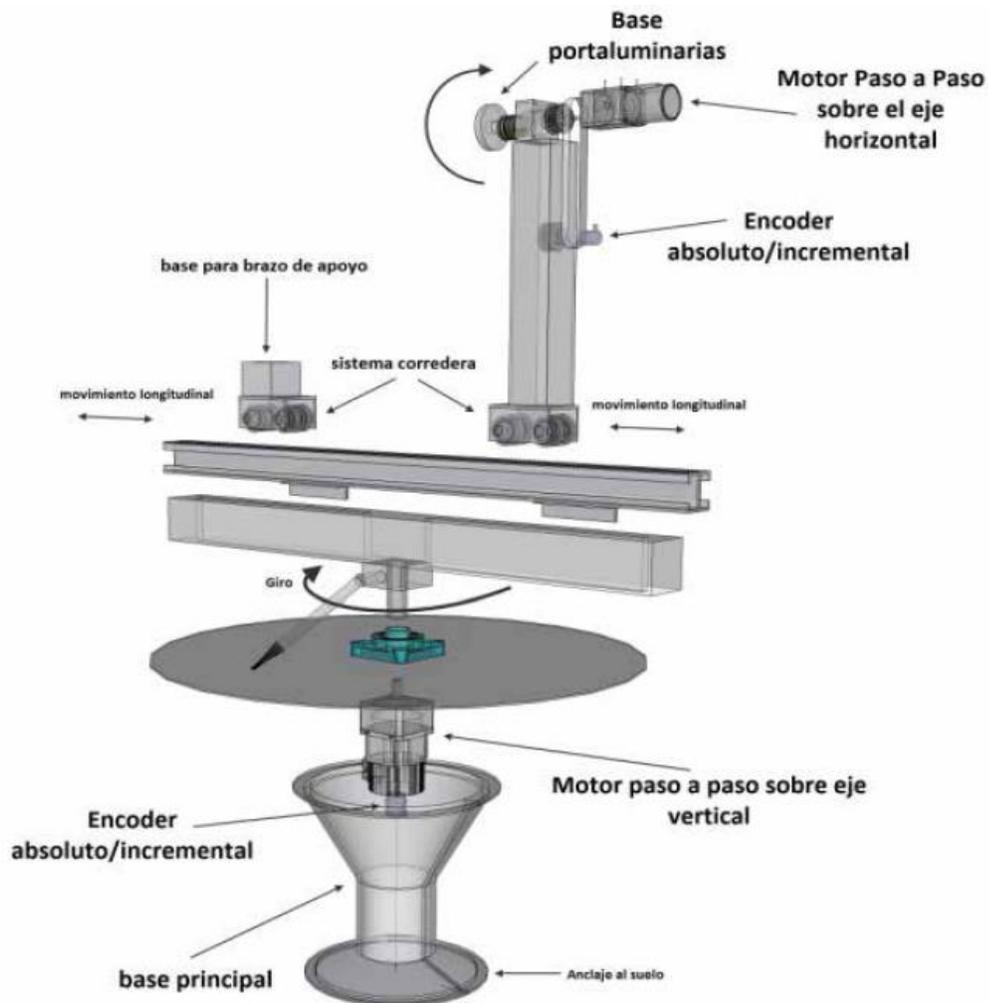


Figura 6. Fotogoniómetro Automatizado (Torres, Rodríguez, & Franco, Diseño y Construcción de un Fotogoniómetro para el Laboratorio de Iluminación de la Universidad Distrital, Sede Tecnológica, 2014)

En relación al marco contextual de México, solo existen siete laboratorios donde se realizan pruebas de calidad y eficiencia, uno de ellos está en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y destaca porque su equipo y tecnología están desarrollados por experimentados científicos e ingenieros mexicanos. Es conocido como el Laboratorio de Iluminación y Eficiencia Energética del INAOE y busca ofrecer directamente un servicio a la sociedad mexicana a través de la asesoría, acompañamiento, evaluación y certificación de la calidad, suficiencia y eficiencia en la iluminación de productos creados por diseñadores y fabricantes que requieren de certificaciones de calidad apegadas a la normatividad que se exige para su comercialización (Flores, 2019).

Dicho laboratorio cuenta con cinco módulos de prueba; el primero consiste en una esfera integradora para medición de flujo luminoso; el segundo es un fotogoniómetro para medición de distribución luminosa; el tercer banco es un gabinete para pruebas de choque térmico; el cuarto es un banco de conmutación para envejecimiento acelerado; y por último, un banco para aplicar sobretensiones transitorias y descargas de rayo. Fue gracias a que el desarrollo de los módulos de prueba fue realizado por personal directo del INAOE, se pudo lograr reducir los costos a una cantidad aproximada de 3.75 millones de pesos, monto que con tecnología importada hubiera estado arriba de los 15 o 20 millones de pesos. Esto gracias a que se cuenta con el conocimiento no solo para crear lo que se necesita sino para darle mantenimiento, lo que representa una ventaja adicional (Flores, 2019).

Recapitulando la información presentada en esta sección, se puede comprobar que el desarrollo de un fotogoniómetro presenta grandes ventajas en su aplicación y en el presupuesto requerido, en comparación con la obtención de un sistema del mercado extranjero. Asimismo, los resultados presentados en los estudios anteriores demuestran que la exactitud de las mediciones obtenidas es comparable con equipo e instalaciones de laboratorios acreditados. Por lo tanto, en este trabajo se pretende desarrollar y aplicar un fotogoniómetro para la mejora de los procesos de producción de la empresa Dialight, mediante la evaluación fotométrica de los materiales ópticos (reflectores) previa al proceso de ensamble.

1.3 Justificación

Cada luminaria de obstrucción que sea fabricada debe cumplir con las regulaciones impuestas sobre el espacio aéreo, para asegurar con dicho cumplimiento y la calidad del producto es necesario seguir un estándar y cumplir con sus restricciones y lineamientos. Por lo tanto, el desempeño y la confiabilidad de la prueba óptica es crucial para asegurar que todo producto que pase por dicho proceso cumpla con los requerimientos, además, es innegable que la calidad de los componentes utilizados en el ensamble impacta directamente a la calidad del producto terminado, dicho esto, la calidad y desempeño óptico de los reflectores son base fundamental para un eficiente proceso de prueba óptica y un resultado positivo durante la ejecución de la misma.

Cabe señalar que el desgaste de herramientas, las modificaciones al proceso y los movimientos de “Layout”, son solo algunos ejemplos de factores que afectan al proceso de fabricación de los reflectores y a su vez influyen en la calidad y desempeño de los mismos. Aunado a esto, si se tienen deficiencias en los procesos y pobres controles de calidad, no es posible identificar los defectos en el momento adecuado, resultando en el impacto directo a la línea de producción de la luminaria.

Convencionalmente, la forma de identificar reflectores que no cumplan con los requerimientos de diseño en cuanto a su forma o nivel de metalizado, es durante la ejecución de la prueba óptica en una luminaria completamente ensamblada. Esto implica que para poder reemplazar uno o más reflectores en una unidad es necesario desensamblarla, y aun así no es seguro que el nuevo reflector a utilizar cumpla con las especificaciones, por lo que detectar fallas en este nivel del ensamble es costoso por el tiempo invertido y puede ocasionar problemas como flujos lentos en el proceso de manufactura o retrasos de entrega a clientes.

1.4 Hipótesis

El uso de un fotogoniómetro permite la realización de una prueba fotométrica a los reflectores de las luminarias de obstrucción, con lo que se logra reducir las fallas en la prueba óptica del producto terminado relacionadas a la calidad de los reflectores por debajo de un 10%.

1.5 Objetivos de investigación

1.5.1 Objetivo general

Desarrollar fotogoniómetro que permita la realización de una prueba fotométrica a los reflectores de las luminarias de Obstrucción en la empresa Dialight

1.5.2 Objetivos específicos

1. Identificar tecnologías relevantes que puedan ser utilizadas en la aplicación del sistema
2. Diseñar un sistema donde se logre realizar la prueba fotométrica
3. Probar un prototipo del diseño donde se logre el trabajo de manera conjunta de las partes del sistema
4. Desarrollar la interfaz del sistema
5. Validar el desempeño de la prueba fotométrica de los reflectores

Capítulo 2. Marco teórico

En este apartado se presentan conceptos utilizados como referencia para fundamentar el presente estudio, estos conceptos son ideas basadas en trabajos anteriores de autores cuyos resultados y conclusiones dieron lugar al trabajo que aquí se plantea.

2.1 Óptica

El presente proyecto está enfocado a la resolución de una problemática en una empresa de luminarias, por lo que el concepto de óptica es una de las bases fundamentales para la correcta comprensión de las ideas y procesos que aquí se describen. Dicho concepto puede ser definido de forma general como el estudio de la luz, la manera como es emitida por los cuerpos luminosos, la forma en que se propaga y se absorbe por distintos medios (Reeves, 1978).

2.2 Reflexión

Como parte del estudio de la óptica se encuentran las propiedades de propagación de la luz, una de ellas y la más importante en el contexto del presente estudio es la reflexión, lo cual se define como el cambio de dirección que sufre un rayo luminoso cuando choca contra la superficie de un objeto de superficie reflectora, la figura 7 muestra la representación visual de la definición de reflexión donde se aprecian los elementos involucrados durante este proceso. (TINOCO, 2013).

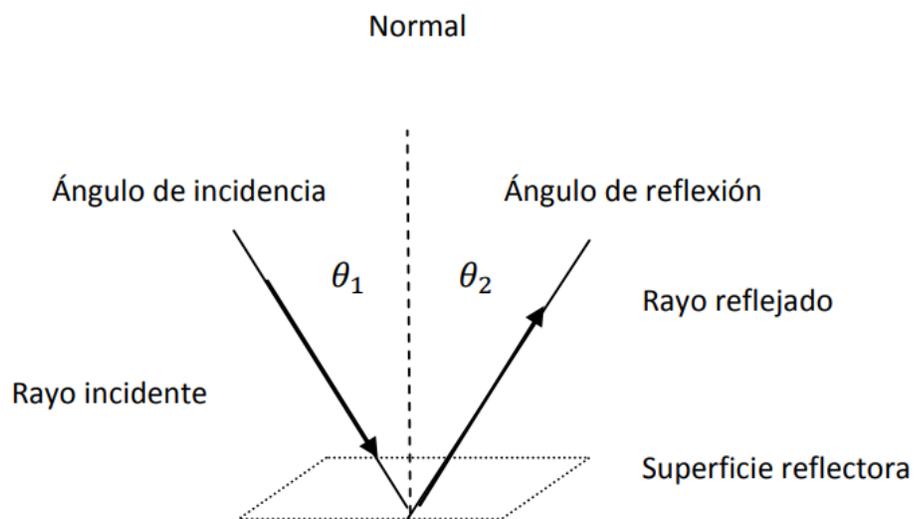


Figura 7 Representación gráfica de la reflexión de la luz (TINOCO, 2013)

2.3 Refracción

Otro concepto relacionado con la propagación de la luz es la propiedad de refracción, esta se refiere al cambio de dirección que soporta una onda de luz al pasar de un medio a otro con una consistencia óptica diferente (TINOCO, 2013). La figura 8 muestra la representación gráfica del concepto de refracción de la luz y los elementos necesarios para que dicho proceso pueda suceder, donde:

1. Rayo Incidente, es aquel que llega a la superficie de separación de dos medios.
2. Rayo Refractado, el rayo que pasa al otro medio.
3. Ángulo de Incidencia, el ángulo que se forma entre el incidente y la normal
4. Ángulo de Refracción, el ángulo formado por la normal y el rayo refractado
5. Normal, es la perpendicular a la superficie de separación de los medios trazados.

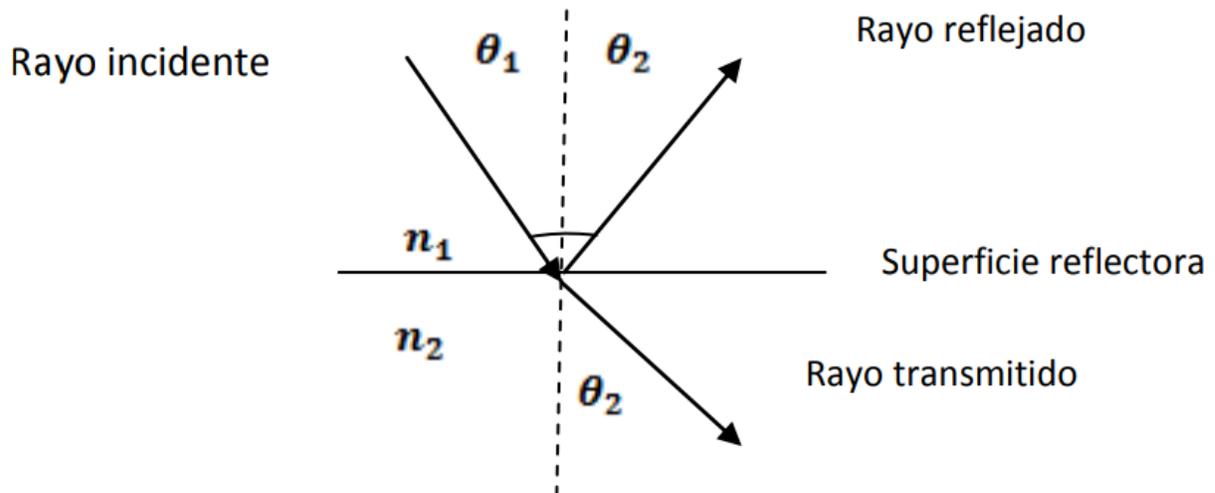


Figura 8 Representación gráfica de la refracción de la luz (TINOCO, 2013)

2.4 Magnitudes fotométricas, unidades y estándares

Una vez explicado el concepto de óptica y algunas de las propiedades de la propagación de la luz, es necesario añadir la forma en la que la luz es percibida por las personas, para esto se incluye el concepto de fotometría, la cual es la ciencia encargada del estudio de la luz visible de acuerdo a la sensibilidad del ojo humano. Dicha ciencia está basada en el modelo estadístico de la respuesta visual del ojo humano a la luz, es decir nuestra percepción de la luz (TINOCO, 2013). Para una mejor comprensión de este concepto es importante entender las diferentes magnitudes que intervienen en la percepción de la luz y qué significado tiene cada una de ellas, esto es mostrado en la tabla 1 junto con sus unidades de medición.

Tabla 1 Magnitudes fotométricas (TINOCO, 2013)

Nombre	Unidad	Descripción
Flujo luminoso	[lm]	Cantidad de luz total emitida por una fuente luminosa en todas direcciones
Intensidad	[cd]	Flujo luminoso emitido en una sola dirección, flujo emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección específica
Iluminancia	[lx]	Flujo luminoso que incide por unidad de área en una superficie dada
Luminancia	$\left[\frac{cd}{m^2}\right]$	Flujo luminoso que incide por unidad de área en una superficie dada

2.5 Fotodetector

En referencia al contexto de la presente investigación, es necesario identificar los equipos utilizados para realizar las distintas mediciones que aquí se plantean, tal como se mencionó en apartados anteriores, los estándares que rigen los sistemas de obstrucción requieren la evaluación de la intensidad luminosa de las luminarias, una de las herramientas para llevar a cabo esta evaluación es un fotodetector el cual es un dispositivo que convierte una señal de luz a una señal eléctrica de voltaje o corriente. En muchos fotodetectores tales como fotodiodos y fotoconductores esta conversión es típicamente lograda por la creación de pares electrón-huecos al existir absorción de fotones, esto es, la creación de electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia (Gennes, 1999).

2.6 Fotómetro

Una vez transformada la señal de luz a señal eléctrica, es necesario procesar dicha señal para obtener la magnitud requerida, para lo que es empleado un fotómetro, el cual es un instrumento utilizado en la medición de la luz visible, siendo los más comunes los usados para medir la luminancia e iluminancia, a diferencia de los requeridos para la medición de flujo luminoso e intensidad luminosa no están ampliamente disponibles y por lo general tienen que ser adaptados a la aplicación específica de medición de la luz debido a la geometría de la medición de los involucrados (TINOCO, 2013).

2.7 Curvas fotométricas o curvas de distribución de intensidad

Como parte del objetivo general de investigación se busca realizar una prueba fotométrica, esto se refiere al proceso requerido para la obtención de una curva fotométrica o una curva de distribución de intensidad luminosa, la cual es una representación gráfica de la medición de intensidad luminosa de una luminaria. Esta curva presupone que la luminaria está colgada en el centro de una sala normal y que su flujo luminoso

puede irradiar libremente en todas direcciones. La intensidad luminosa de la luminaria se determina mediante un fotogoniómetro. La figura 9 muestra la representación de una curva fotométrica donde la distancia del contorno de la curva de distribución con respecto al punto central de la luminaria proporciona información sobre la intensidad luminosa en la dirección respectiva. La línea continua muestra la curva de distribución transversalmente con respecto a la luminaria, mientras que la línea discontinua representa la curva en sentido longitudinal. El plano de corte transversal se indica con C0-C180 y el plano de corte longitudinal con C90-C270. La cifra tras la "C" indica el ángulo al que está situado el plano, contemplando la curva de distribución desde arriba.

La curva de distribución de intensidad luminosa permite a los diseñadores de iluminación evaluar la aptitud de una luminaria para un propósito de aplicación específico. En luminarias dotadas de una distribución muy asimétrica de la intensidad luminosa, puede ser necesario colocar planos de corte más adecuados a través del cuerpo distribuidor de la intensidad. Por ejemplo, un plano girado a 45° se indica con C45-C225 (XAL GmbH, 2018).

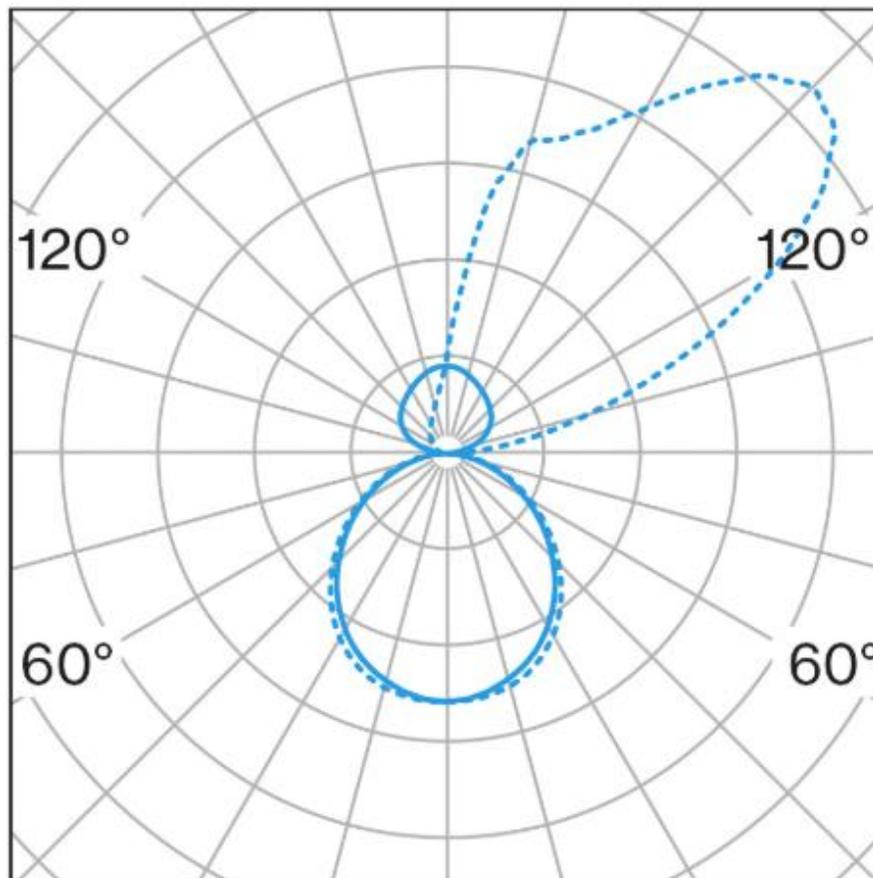


Figura 9. Ejemplo de curva fotométrica

(recuperado de: <https://www.xal.com/es/conocimientos/curva-de-distribucion-de-intensidad-luminosa/>)

2.8 Tarjeta de circuito impreso

La planta de manufactura Dialight Ensenada no solo se dedica al ensamble de la luminaria como producto terminado, sino también a los procesos de fabricación de sus componentes como lo son la fuente de alimentación y la fuente de luz. Para una mejor comprensión define el concepto de tarjeta de circuito impreso (también llamadas PCB por sus siglas en inglés “Printed Circuit Board”), la cual es un soporte de material aislante donde se conectan entre sí puntos de un circuito eléctrico mediante pistas conductoras adheridas a él. El circuito impreso suele servir de soporte físico para la colocación y soldadura de los componentes.

En los últimos años el tamaño de los componentes electrónicos se ha reducido en forma considerable, lo que implica menor separación entre pines para circuitos integrados de alta densidad. Teniendo también en consideración las actuales frecuencias de operación de los dispositivos, donde es necesaria una muy buena precisión en el proceso de impresión de la placa con la finalidad de garantizar tolerancias mínimas.

Los circuitos impresos más sencillos corresponden a los que contienen pistas de cobre solamente por una de las superficies de la placa. A estas placas se las conoce como circuitos impresos de una capa. Sin embargo los más comunes hoy en día son los de 2 capas, pero dependiendo de la complejidad del diseño del físico del circuito, pueden llegar a fabricarse hasta de 8 o más capas si es necesario.

La figura 10 muestra un ejemplo de un PCB, aquí se logran percibir distintos contornos color blanco los cuales son utilizados de referencia para determinar la posición de cada componente, una vez que son colocados los componentes electrónicos y soldados, el producto resultante se conoce como ensamble de PCB (PCBA por sus siglas en inglés, PCB Assembly) (Puertas, 2015).

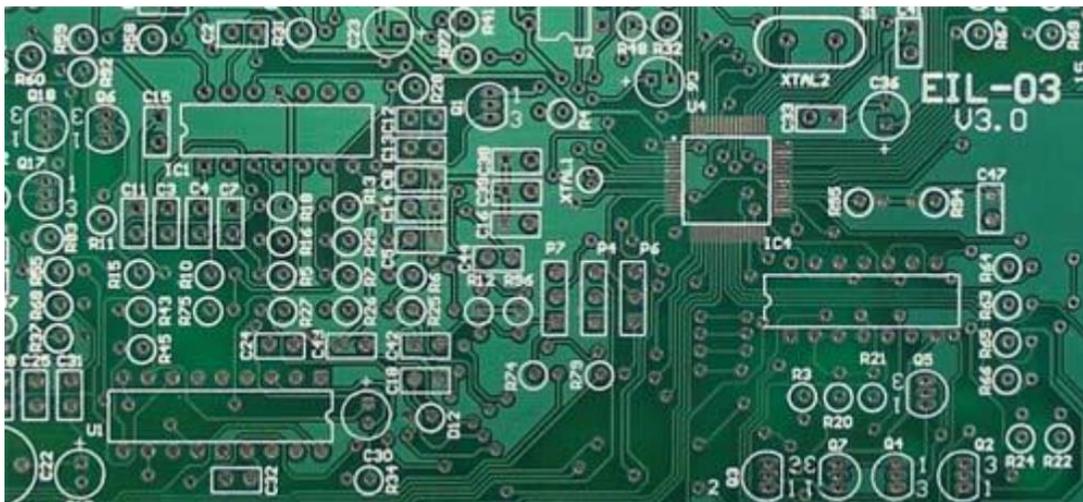


Figura 10. Ejemplo de un PCB (Puertas, 2015)

2.9 Diodo emisor de luz

La característica más importante de las luminarias Dialight es que son fabricadas a base de diodos emisores de luz, para una mejor comprensión de este término se debe conocer en qué consiste dicha tecnología. Sus orígenes se remontan al año 1927. En esa fecha, Oleg Vladimírovich Lósev (1903-1942) publica en una revista rusa de tecnología el nacimiento del diodo emisor de luz (o LED por su acrónimo en inglés de “light-emitting-diode”) a partir de óxido de cinc y carburo de silicio. Años más tarde, alrededor de 1962, el profesor Nick Holonyak desarrolla el dispositivo electrónico que actualmente conocemos como LED moderno, siendo por ello considerado como el “padre” de la tecnología LED.

A partir de aquí comenzó su revolución en la industria, sus inicios fueron con el LED de color rojo cuya función se limitaba a señalar el encendido y el apagado de un aparato con el famoso “Stand By”. Pero en 1971 toman funcionalidad los colores verde, amarillo y naranja. Será en la década de los 90 cuando se complete el conocido RGB con el color azul para finalmente, conseguir formar luz blanca con la ayuda de la luz ultravioleta. Llegados a este punto, los LED se muestran como una buena elección para la iluminación.

En cuanto al término en general un LED es un componente optoelectrónico pasivo fabricado con material semiconductor. Optoelectrónico porque es capaz de transformar la energía eléctrica en luz y viceversa, emitiendo radiación cuando por ellos circula una corriente eléctrica en sentido directo; y pasivo porque es un elemento que ofrece resistencia a la corriente eléctrica. Su funcionamiento, básicamente, está sujeto al efecto de la luminiscencia; de ahí, la unión de dos terminales “p-n” (ánodo y cátodo respectivamente) que caracteriza a un LED. El color de un diodo viene dado por la longitud de onda de luz emitida, que dependerá de los materiales del ánodo y cátodo y el material del semiconductor. Es decir, del material con que esté fabricado el LED, emitiendo en distintos colores de luz visible o en infrarrojos.

En los diodos LED los electrones circulan en un único sentido, el “directo”, es decir, de ánodo (P) a cátodo (N). Éstos sufren el proceso denominado recombinación de electrones que tiene como resultado la emisión de energía en forma de fotones.

Por último, podríamos pensar que la recubierta de un LED influiría en el haz de luz emitida, pero su función es únicamente identificadora. La cápsula que rodea el material semiconductor es de plástico “epoxy”, de mayor resistencia que el vidrio. Además, la cubierta lleva incorporada una lente con la que regular la luz emitida (Ortiz, 2014).

2.10 Luminaria LED y sus elementos

Las luminarias son los elementos encargados de cubrir las lámparas para protegerlas de los agentes externos, dirigir el flujo luminoso hacia la zona deseada y contener los elementos auxiliares para su funcionamiento.

Según la Norma Internacional CIE 598-1, la cual recoge los requisitos generales y particulares de las luminarias, luminaria es definida como: aparato de alumbrado que reparte, filtra o transforma la luz emitida por una o varias lámparas y que comprende todos los dispositivos necesarios para el soporte, la fijación y la protección de lámparas, (excluyendo las propias lámparas) y, en caso necesario, los circuitos auxiliares en combinación con los medios de conexión con la red de alimentación (Curso on-line de iluminación, n.d.). En lo que respecta al diseño básico de una luminaria, este consta de 5 elementos:

1. LED

El chip LED está fabricado con un material semiconductor (carburo de silicio) de unos 5 milímetros, capaz de generar luz cuando se le aplica corriente. El chip es el verdadero corazón de una luminaria LED. Sobre su base se depositan diferentes materiales, cuya mezcla es la que da el color y la calidad de la luz. El chip está protegido mediante una capa de policarbonato.

El chip instalado en la luminaria es vital para un funcionamiento correcto, ya que de él dependerá en gran medida la calidad y duración de nuestra luminaria (Ledbox News, 2019). La figura 11 muestra ejemplos comunes de LEDs de tecnología de montaje superficial (SMT por sus siglas en inglés Surface Mount Tecnología).



Figura 11. Ejemplos de LEDs

(recuperado de: <https://blog.ledbox.es/informacion-led/luminarias-led-de-alta-calidad-elementos-fundamentales>)

2. Fuente de alimentación

Las luminarias basadas en la tecnología LED a diferencia de la tecnología incandescente, no se conectan directamente a la corriente eléctrica, sino que requieren de una fuente de alimentación para poder convertir la tensión eléctrica. Este dato es lo que hace de la tecnología LED mucho más efectiva que el resto ya que aprovechan la energía eléctrica gracias a este convertidor. Una fuente de alimentación es vital para una correcta eficiencia energética y estabilidad en el funcionamiento.

El factor que mide la efectividad de la luminaria led se mide por el factor de potencia (PFC). Si el PFC es igual a 1 significa que el 100% de la energía que llega a la fuente es aprovechada, en caso de ser un valor del 0,5 tan sólo la mitad de la energía se aprovecha (Ledbox News, 2019). La figura 12 muestra un ejemplo de una fuente de alimentación comercial para luminarias LED.



Figura 12. Fuente de alimentación para luminarias LED

(Fuente: <https://blog.ledbox.es/informacion-led/luminarias-led-de-alta-calidad-elementos-fundamentales>)

3. Placa base o ensamble PCB

La placa es la encargada de soportar todas las conexiones de los demás componentes de la luminaria, conexiones como el chip o el sistema de disipación del calor. Dependiendo del tipo de gestión térmica utilizada la placa puede estar fabricada de diferentes componentes conductores (aluminio o cobre) o diferentes capas (Ledbox News, 2019).

4. Carcasa o disipador de calor

La disipación del calor es quizá una de las claves más desconocidas para el funcionamiento y duración de las luminarias LED. Los LED en si no emiten calor (se llama luz fría), pero eso no significa que la luminaria no genere calor y es precisamente la gestión de ese calor es lo que influye en la duración y funcionamiento de la lámpara LED. En el caso de los LED, el calor (al contrario que una bombilla incandescente) sale en la dirección contraria a la luz. Por este motivo es necesario “extraer” ese calor, ya que hasta el 90 % de la energía puede llegar a perderse. La figura 13 muestra el ensamble conjunto del LED, la placa base o PCB y el elemento disipador de calor.

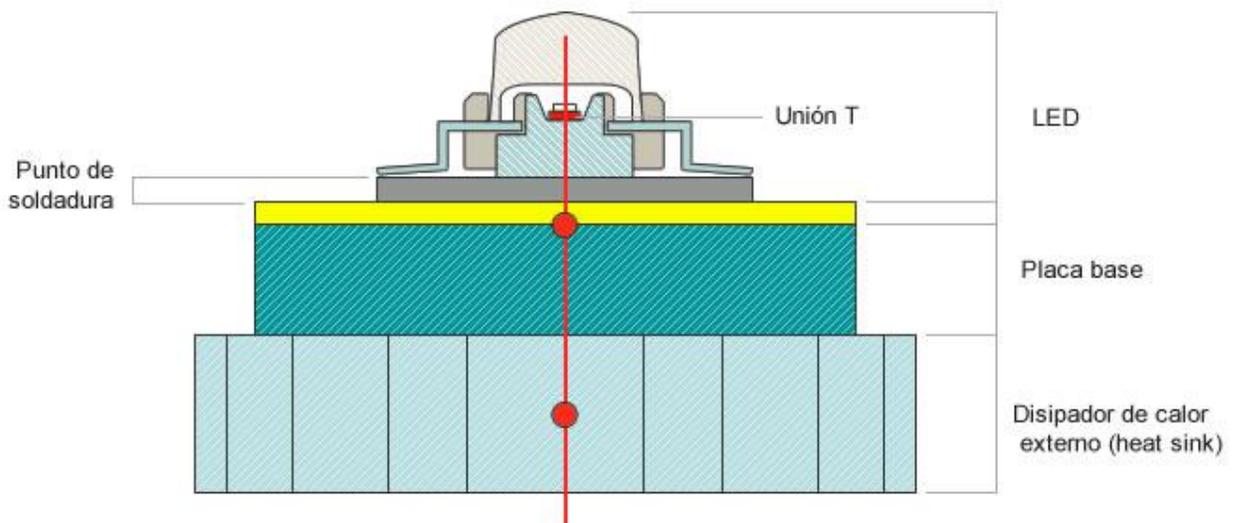


Figura 13. Visualización de la unión entre el ensamblaje PCB del LED y el elemento disipador
(Fuente: <https://blog.ledbox.es/informacion-led/luminarias-led-de-alta-calidad-elementos-fundamentales>)

Una buena disipación del calor alargará la vida del chip. Para ese cometido es clave el uso de materiales acordes a la potencia y uso de la luminaria y un diseño que favorezca a la disipación del calor. El calor también puede afectar al color y a la calidad de la luz. En este sentido también es importante la carcasa exterior. Es importante que sea de un material ligero (aluminio o magnesio), resistente y que su diseño favorezca la disipación del calor (Ledbox News, 2019).

5. Óptica

La óptica de las luminarias LED afecta de manera importante en el tipo de iluminación que dan las luminarias. La óptica de las luminarias está compuestas por un conjunto de lentes y/o reflectores que determinan la distribución de la luz emitida por el LED. Dichos componentes pueden variar en forma y composición en función de las necesidades de distribución de la luz que requiera la luminaria. Según la forma de la lente o reflector el haz de luz puede converger o divergir (Ledbox News, 2019).

La figura 14 muestra un modelo del tipo de reflector utilizado en las luminarias L-856 de Dialight, este es fabricado a base de policarbonato (plástico) y su diseño mecánico permite enfocar toda la luz incidente del ensamblaje de LEDs en una misma dirección, esto último gracias también a un recubrimiento metálico sobre la superficie del reflector.

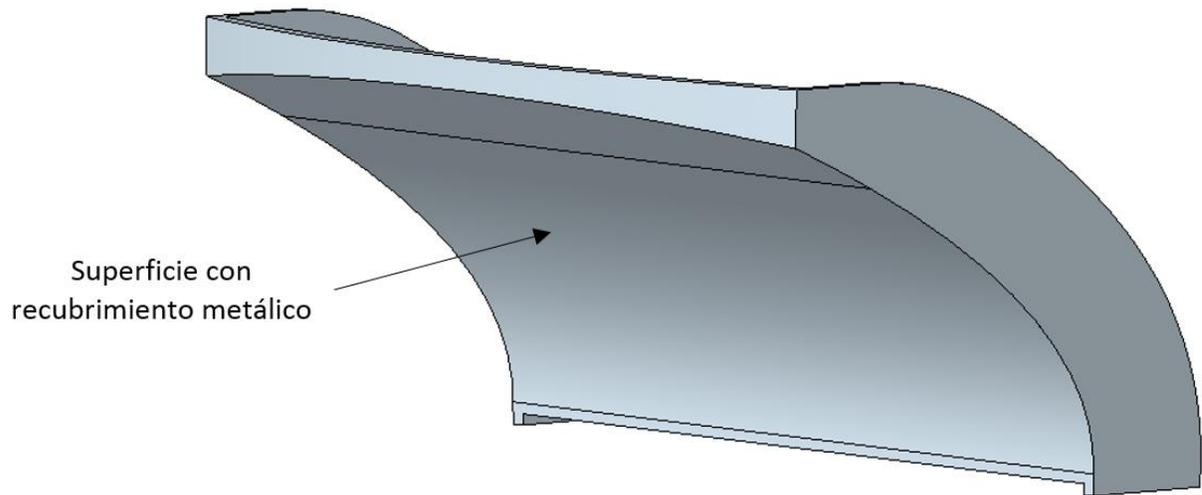


Figura 14. Reflector utilizado en las luminarias L-856 de Dialight
(Fuente: Dibujo de ensamble 8800856004700x Rev. H)

2.11 Categorías de luminarias de obstrucción y su aplicación

1. Luces estroboscópicas de alta intensidad L-856

Este tipo de luminarias son utilizadas en instalaciones cuya altura relativa respecto al aeródromo civil exceda los 150 m, y la ubicación quede dentro de las superficies limitadoras de obstáculos (NOM-014-SCT3-1995) o áreas de protección de operaciones por instrumentos. Por ser unidireccionales, este tipo de luces sólo alcanzan a cubrir un haz máximo de 120°; debido a lo anterior, se deberán utilizar tres para cumplir la cobertura de 360° (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1995). La figura 15 muestra un ejemplo de la luminaria L-856 construida por la empresa Dialight, como se puede apreciar consta de 3 niveles, cada nivel es un módulo que puede funcionar de manera independiente, sin embargo para cumplir con el objetivo de su aplicación es necesario tener los 3 módulos montados.



Figura 15. Luz L-856 de Dialight
(recuperado de: http://www.unimar.com/wp-content/uploads/2013/05/LED_High_Intensity_3level.pdf)

2. Luces estroboscópicas de media intensidad L-865

Estas luminarias son empleadas en instalaciones con alturas que excedan los 100 m sobre el nivel del aeródromo civil, independientemente de su ubicación respecto a las zonas protegidas. Este tipo de dispositivo es omnidireccional, por lo que sólo se requiere una; sin embargo, en instalaciones alejadas, con mantenimiento muy esporádico, se recomienda colocar dos con dispositivo de transferencia (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1995). La figura 16 muestra un ejemplo de la luminaria L-865 construida por la empresa Dialight.



Figura 16. Luz L-865 de Dialight (Recuperado de: https://www.ledinside.com/news/2013/9/dialight_introduces_new_line_of_led_aviation_warning_lights)

3. Faro de destello color rojo L-864

Colocadas en la cúspide en instalaciones cuya altura relativa, respecto al aeródromo civil sea de 60 m a 100 m, o cuando queden dentro de superficies limitadoras de obstáculos o áreas de protección para operaciones por instrumentos, cerca de los límites, aunque la altura sea menor de los 60 m. Es omnidireccional por lo que aplica la misma recomendación del artículo anterior (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1995). La figura 17 muestra un ejemplo de la luminaria L-864 construida por la empresa Dialight.



Figura 17. Luz L-864 de Dialight
(Recuperado de: <https://www.alliedelec.com/m/d/2161ff65fd9e913c8c2c11a58cf41c9d.pdf>)

4. Luz de obstrucción color rojo L-810

Encendido fijo, en dispositivo doble, son usadas en la cúspide de instalaciones con alturas relativas con el aeródromo de 45 m a 60 m, independientemente de su ubicación referida a las áreas de protección. Es doble y omnidireccional, por lo que cumple cobertura de haz y transferencia automática (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1995). La figura 18 muestra un ejemplo de la luminaria L-810 construida por la empresa Dialight.



Figura 18. Luz L-810 de Dialight

(Recuperado de: <https://mx-es.alliedelec.com/product/dialight/rto-1r07-001/70082550/>)

2.12 Requerimientos de intensidad en luces de obstrucción

La tabla 2 muestra los requerimientos típicos de intensidad según el tipo de luminaria y la condición de luz natural (luz de día) acorde a su aplicación.

Tabla 2. Requerimientos típicos de intensidad por tipo de luminaria
(Fuente: creación propia, información recuperada de: NOM-014-SCT3-1995)

TIPO DE LUZ	INTENSIDAD DIURNA	PENUMBRA	NOCTURNA
Estroboscópica alta intensidad (L-856)	200,000 cd	20,000 cd	2,000 cd
Estroboscópica media intensidad (L-856)	N/A	20,000 cd	2,000 cd
Faro rojo (L-864)	N/A	N/A	2,000 cd
Luz de obstrucción doble (L-810)	N/A	N/A	118 cd

2.13 Prueba óptica funcional en luminarias Dialight

La prueba óptica de un producto terminado en la empresa Dialight consiste en la medición de la intensidad luminosa (medida en candelas) de la luminaria en un punto determinado, dependiendo de la aplicación puede ser a 0° , -1° , 2.5° entre otros puntos, siempre tomando como referencia el eje horizontal del haz de luz. Para lograr dichas mediciones se utiliza un fotodetector en cada punto requerido y un fotómetro en que interpreta la señal eléctrica del fotodetector y despliega la medición. Debido a que los fotodetectores utilizados solo tienen la capacidad de realizar la medición en un punto específico, la ubicación de estos con respecto al haz de luz es de suma importancia, por lo que el ajuste previo a la prueba debe ser realizado correctamente. Tal y como es representado en la figura 19, para lograr el ajuste necesario para una medición a 0° , las alturas de los centros de la luminaria y el detector de luz (representados como X y X' respectivamente) deben ser las mismas.

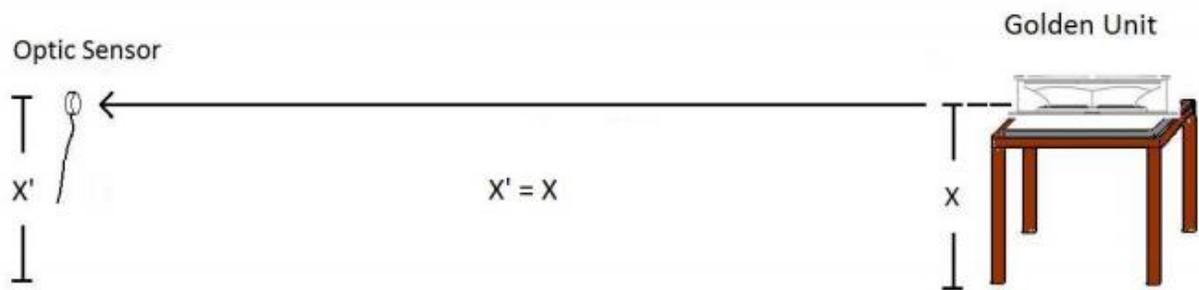


Figura 19. Alineación entre luminaria y sensor óptico para una medición a 0°
(Fuente: Creación propia)

Tomando como ejemplo la aplicación de la luminaria tipo L-856 y sus requerimientos de prueba, la medición de la intensidad debe ser realizada a 0° (Dialight, 2013), esto implica que el centro del haz de luz de la luminaria debe coincidir o estar alineado con el centro del detector óptico o sensor. Este requerimiento es mostrado en la figura 20 mediante una representación física de la luminaria vista desde arriba.

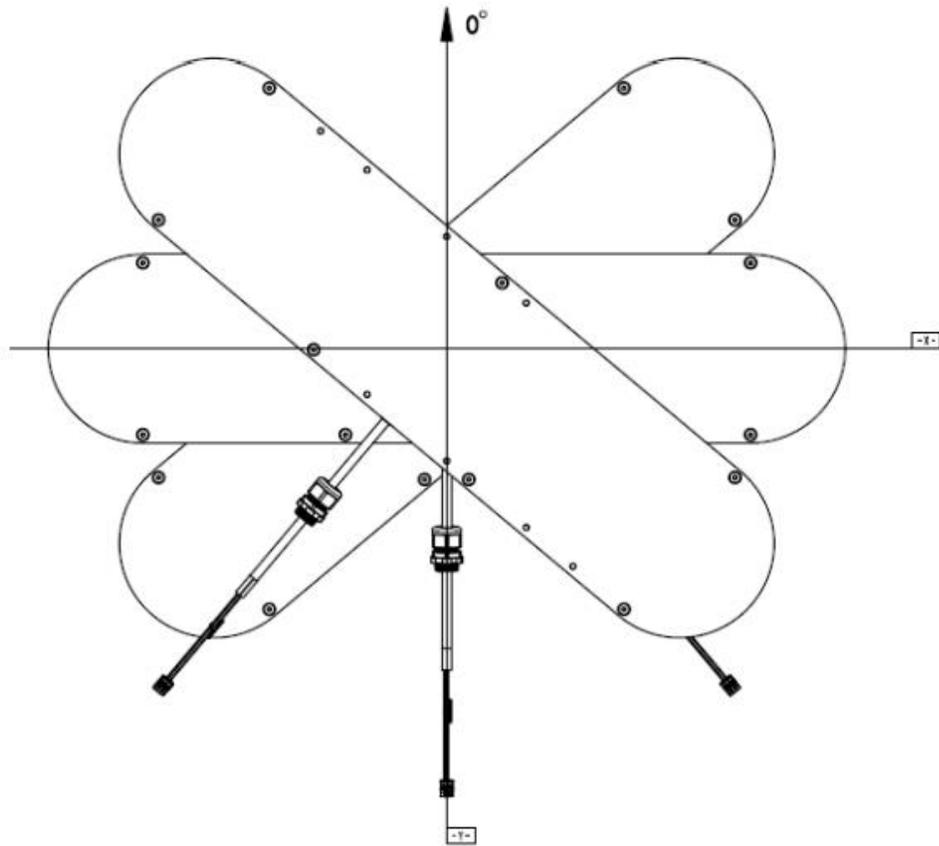


Figura 20. Luminaria L-856 vista desde arriba, la flecha indica la dirección del haz de luz
(Fuente: Manual de pruebas para luminarias L-856 número 8851856004800x Rev. F)

Dependiendo de la aplicación hay dos formas generales de realizar el proceso de prueba; la primera aplica cuando la luz es estroboscópica, es decir, enciende y apaga a manera de destellos con una frecuencia de 40 ciclos por minuto, para dicha aplicación la medición se realiza promediando la intensidad de 10 destellos, lo cual se logra sumando la cantidad de luz detectada durante 15 segundos (1.5 segundos entre destellos) y dividiendo la suma total entre 10. La segunda aplicación es para luz constante, para este caso, la medición es directa.

Referente a las condiciones de prueba, las instalaciones cuentan con una estructura de montaje para los detectores donde su posición puede ser ajustada dependiendo de la necesidad, asimismo, la luminaria es montada sobre una base con una altura definida. Todo esto dentro de una habitación a manera de túnel con una longitud determinada donde la luz ambiental no afecte la medición. La figura 21 muestra un bosquejo de las instalaciones a manera de referencia.

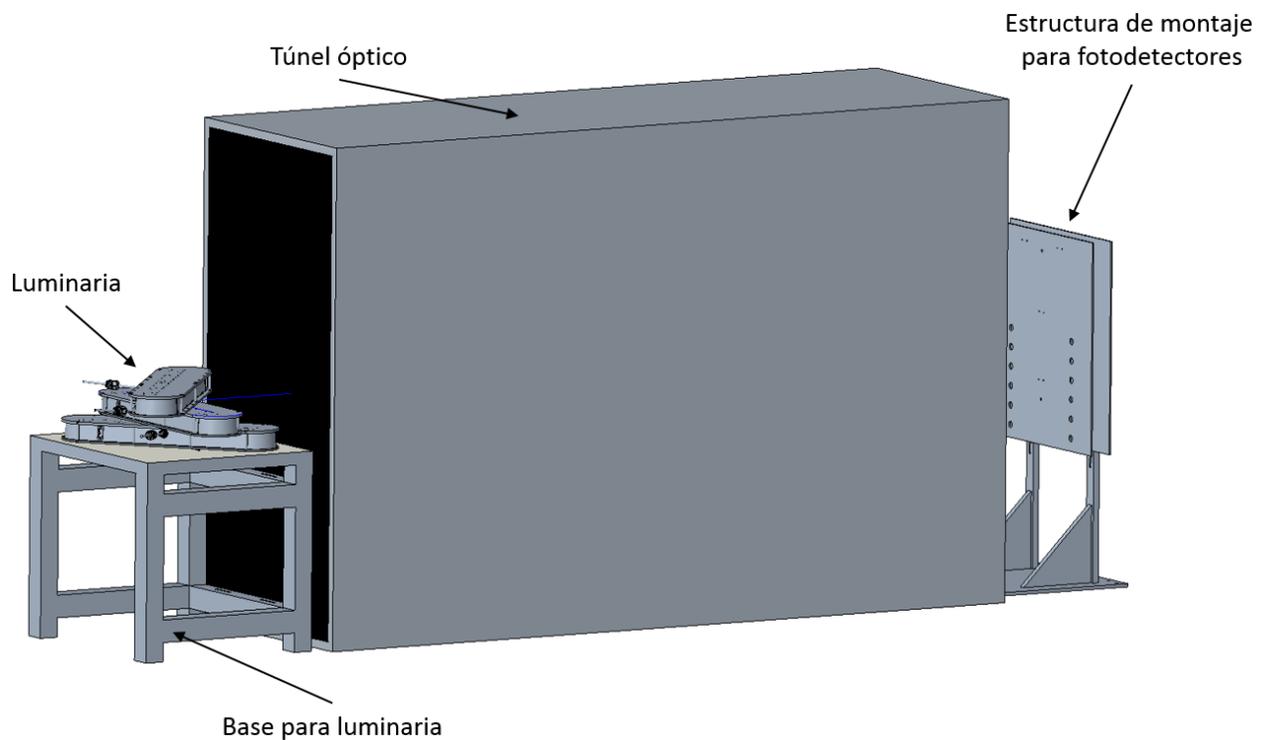


Figura 21. Instalaciones de prueba óptica para producto terminado en la empresa Dialight
(Fuente: Creación propia)

2.15 Interfaz gráfica de usuario

Al igual que cualquier tipo de prueba o evaluación que se base de tecnologías computacionales y equipos de medición, una prueba óptica o fotométrica requiere de un medio en el cual la persona encargada de interpretar los datos y manipular el proceso de prueba puede visualizar o acceder a los controles del equipo, esto se logra mediante una Interfaz gráfica de usuario, también conocida como GUI (Graphical User Interface), la cual es un programa que hace de intermediario entre usuario y máquina. Un software que muestra de forma visual todas las acciones posibles en una plataforma, así como la información disponible, para que los usuarios puedan interactuar con mayor facilidad y sin necesidad de disponer de profundos conocimientos de informática (NeoAttack, 2019).

Capítulo 3. Metodología

El presente estudio comprende una investigación de tipo cuantitativo con un alcance de innovación tecnológica. La aplicación propuesta se basa de tecnologías existentes para crear una herramienta innovadora que optimizará el proceso de la prueba óptica de las luces de obstrucción, mediante la evaluación fotométrica para la identificación de partes fuera de especificación previa al ensamble final.

El desarrollo de la metodología del presente trabajo está basado en el método de administración de proyectos para el desarrollo de productos propuesto por Ulrich y Steven (Martínez & Chávez, 2010).

3.1 Especificaciones del diseño

La etapa o fase de especificaciones del diseño enlista aquellos requerimientos indispensables a cubrir para que el producto resultante logre cumplir su objetivo de aplicación, para poder definir las especificaciones de la herramienta desarrollada, se utilizaron como base los requerimientos del producto final para simular las condiciones de una prueba funcional, el sistema consta de 4 partes:

1. Fuente de luz

- Luz blanca
- Luz constante
- Intensidad variable

2. Estructura de montaje

- Alturas fijas para el sensor y la fuente de luz
- Centros del sensor y reflector deben estar alineados
- Distancias entre sensor y fuente de luz sin restricciones
- Ajuste fino de la separación entre sensor y fuente de luz

3. Detector fotométrico

- Comunicación a PC
- Detección de luz en ángulos 0 y -1 con respecto al eje de haz de luz
- Inmune a la luz ambiental

4. Interfaz de usuario

- Representación gráfica de las mediciones en los ángulos requeridos
- Respuesta en tiempo real
- Criterio de aceptación visual
- Resultado de la prueba con indicadores visuales

3.2 Selección de Tecnologías

Durante la fase de selección de tecnologías se pretende seleccionar dispositivos que sean relevantes a la aplicación y que cumplan con los requerimientos estipulados apartado anterior, esto, siempre contemplando su integración en un solo sistema, es decir, que además de los requerimientos estipulados deben ser compatibles entre sí.

1. Fuente de luz

Esta parte del sistema está basada en las condiciones reales del producto terminado, por lo que se procedió a utilizar un ensamble PCB de LEDs de Dialight con número de parte 8800856004300, el cual consta de 21 LEDs de luz blanca y actualmente es utilizado en las luces estroboscópicas de alta intensidad L-856. La figura 21 muestra una referencia física del ensamble.

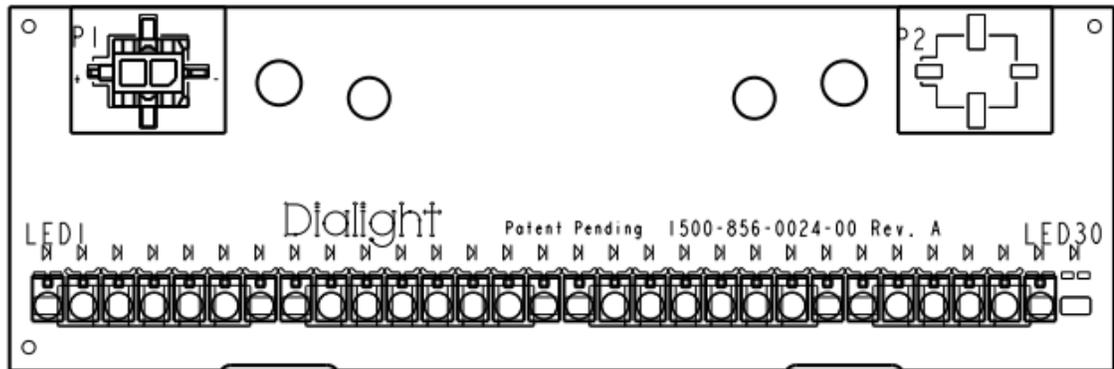


Figura 22 Ensamble PCB de LEDs (Extraído del dibujo de ensamble Dialight 8800856004200x Rev. F)

Para energizar el ensamble de LEDs se utilizó una fuente de poder de corriente directa de voltaje y corriente variables, esto debido a que las especificaciones de voltaje y corriente serán dictadas durante la fase de caracterización del fotogoniómetro en la etapa de pruebas preliminares.

2. Estructura de montaje

La estructura de montaje fue diseñada en el software de modelado 3D y 2D Creo Parametric versión 5.0, la cual se construyó de material de aluminio debido a su versatilidad en el proceso de maquinado y larga duración. Por otra parte se utilizaron micrómetros comerciales del fabricante THORLABS con número de parte XR25C, los cuales permiten realizar un ajuste fino en la posición del sensor y fuente de luz.

3. Detector fotométrico

Como es descrito en la sección 2.13, actualmente la prueba óptica del producto terminado cuenta con fotodetectores dirigidos que miden la intensidad de luz en puntos específicos según sea requerido, lo anterior es funcional para la prueba de producto terminado ya que como máximo se necesitan medir 2

puntos diferentes. Sin embargo, para realizar una prueba o evaluación fotométrica, es necesario conocer el nivel de intensidad de la luz en una serie de puntos por arriba y debajo de la horizontal (0°), tales que sea posible cubrir la mayor parte del haz de luz incidente.

Con el propósito de cumplir con el requerimiento antes descrito y a su vez restringir el tamaño del diseño mecánico, se optó por buscar en el mercado un dispositivo que pudiera efectuar un barrido de las intensidades en diferentes ángulos. Para esto se propuso el dispositivo “Smart High Sensitivity CCD Line Camera” del fabricante THORLABS con número de modelo LC100, ya que cuenta con la capacidad de realizar mediciones de intensidad de luz dentro de un arreglo de 2048 pixeles. Dicho dispositivo envía la información digitalizada a través de un puerto USB a la computadora para ser procesada.

4. Interfaz gráfica de usuario

Para el desarrollo de la interfaz, se tomó ventaja del dispositivo propuesto ya que cuenta con controladores para diversos ambientes de desarrollo y una interfaz gráfica base la cual viene incluida en el software del dispositivo, ésta es ilustrada en la figura 23. Para el acondicionamiento de la interfaz gráfica final se optó por utilizar LabVIEW.

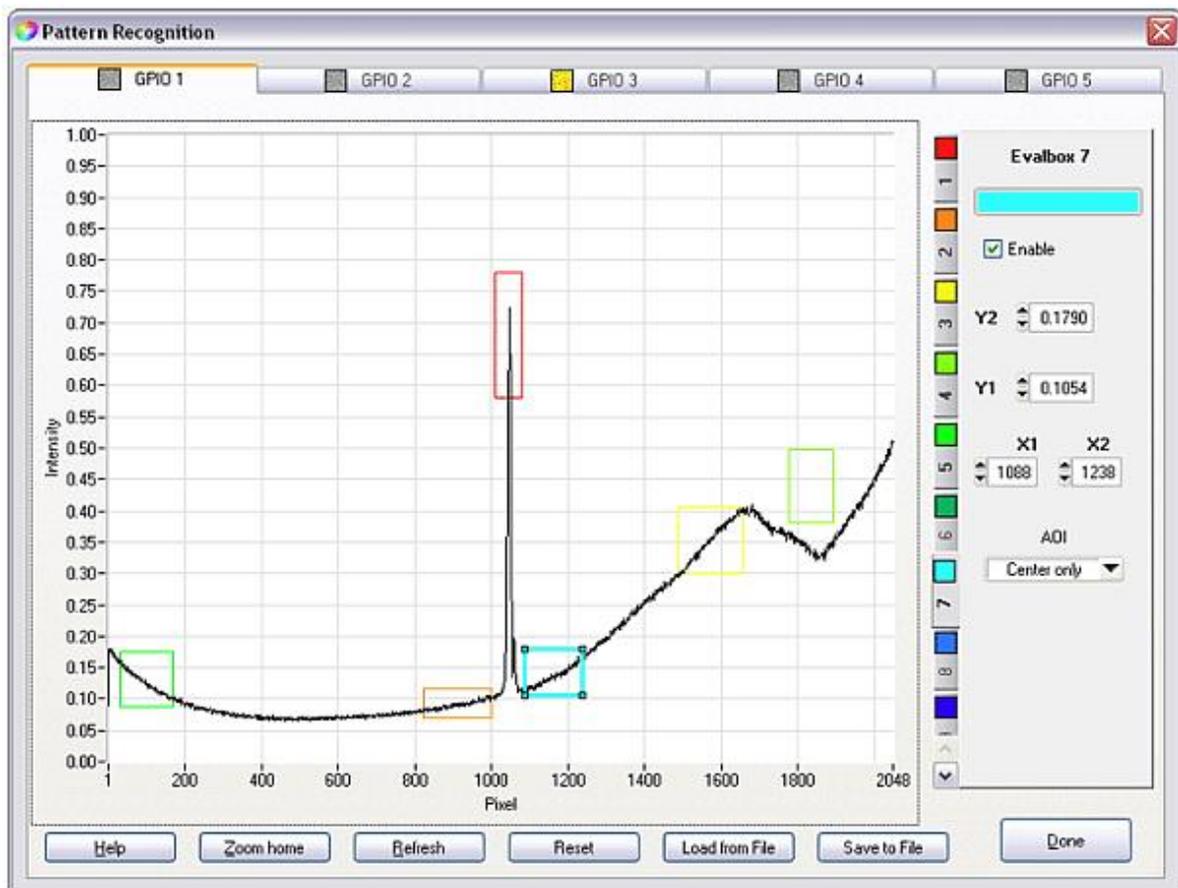


Figura 23. Interfaz de usuario del equipo LC100 de THORLABS
(Recuperado de: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5290)

3.3 Diseño

La fase de diseño pretende documentar las partes del sistema que fueron desarrollos propios para la creación de la herramienta, cabe añadir que como se mencionó al inicio de este capítulo, la innovación buscada en este estudio es una herramienta integradora que se base de tecnologías existentes para la resolución de problemáticas en la industria. El desarrollo del diseño mecánico está basado en el uso conjunto de las partes seleccionadas en el apartado anterior por lo que se tienen tres puntos esenciales:

1. Desarrollo de la estructura de montaje

Tomando en cuenta las restricciones que son las alturas y centros tanto del sensor fotométrico como de la fuente de luz, se procedió a elegir una distancia entre sensor y fuente que fuera manejable desde la perspectiva del tamaño de la herramienta, así mismo, las dimensiones de los dispositivos seleccionados en el apartado anterior dictaminaron las bases para el diseño mecánico de la estructura de montaje. Esta consta de las siguientes partes:

- **Base principal** – Plato o barra de aluminio barrenada para el montaje conjunto del resto de las partes que comprenden el diseño, la figura 24 muestra su plano 2D de construcción.

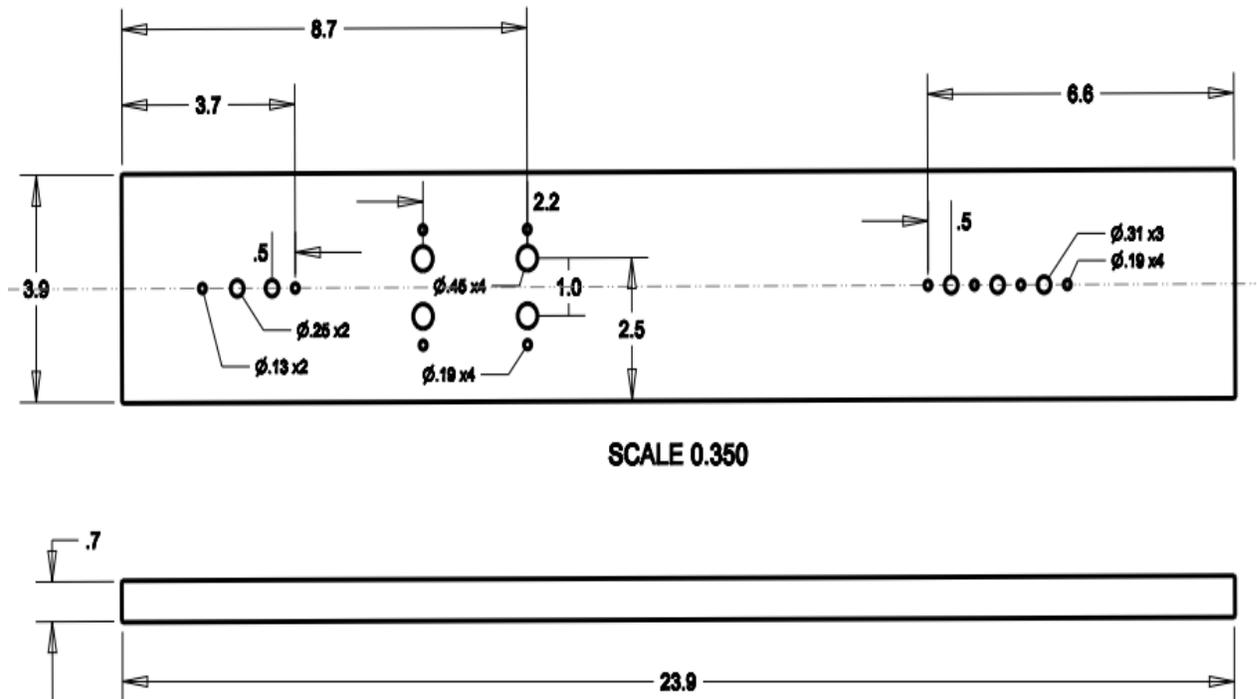


Figura 24. Plano de construcción de la base principal de la estructura de montaje (dimensiones en pulgadas)

- **Base para Cámara** – Estructura mediante la cual el dispositivo detector es fijado a la base principal, la figura 25 muestra su plano 2D de construcción.

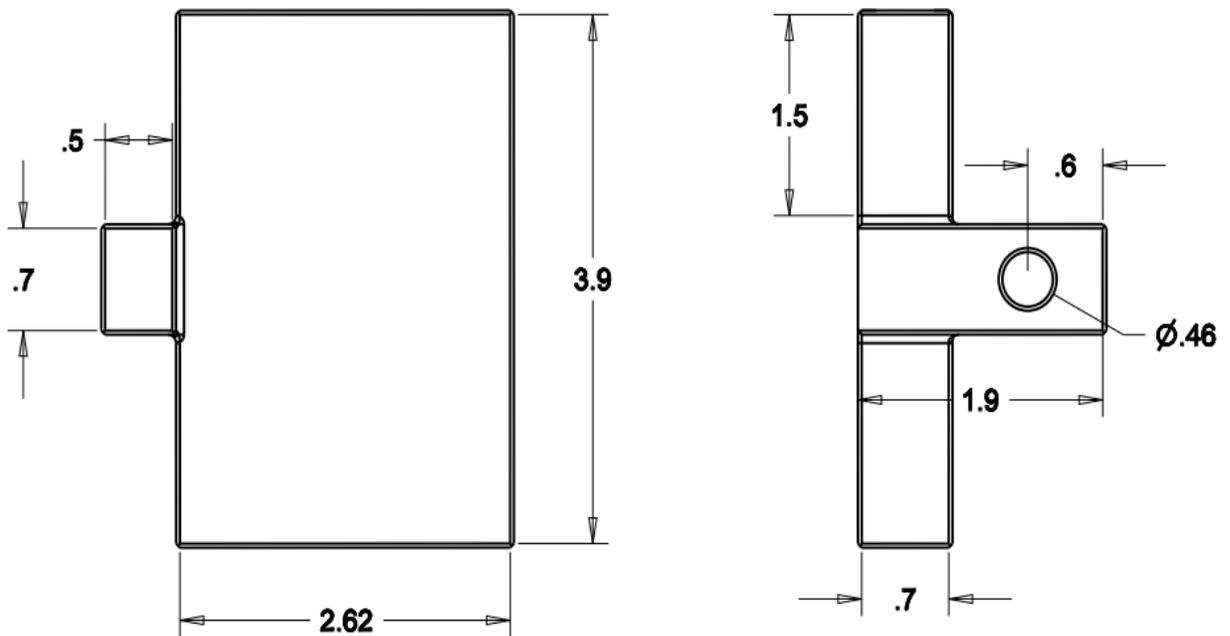


Figura 25. Plano de construcción de la base para cámara

- **Base para fuente de luz y reflector** – Estructura mediante la cual la fuente de luz y el reflector son fijados a la base principal, la figura 26 muestra su plano 2D de construcción.

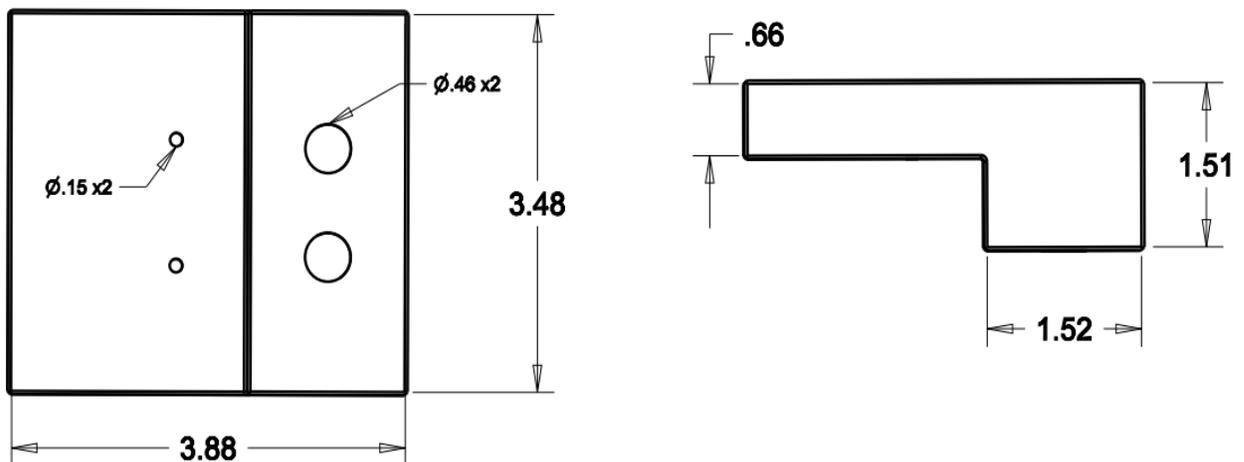


Figura 26. Plano de construcción de la base para reflector y Fuente de luz

- **Dispositivos de ajuste o micrómetros** – Dispositivos utilizados para el ajuste de las distancias entre detector y fuente de luz, la figura 27 muestra un modelo del dispositivo.

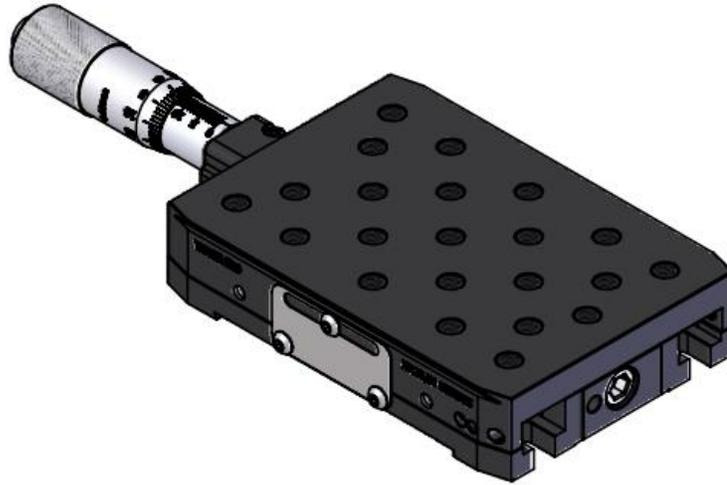


Figura 27. Micrómetro utilizado como dispositivo de ajuste
(Recuperado de: https://www.thorlabs.com/drawings/4e37ae474c7a49f6-57A23D3B-BB4B-5814-30FBBC3167EF858/XR25C_M-AutoCADPDF.pdf)

2. Desarrollo del ensamble mecánico

La figura 28 muestra un bosquejo del ensamble resultante de la integración de las partes, esto incluye los dispositivos seleccionados y la estructura de montaje desarrollada.

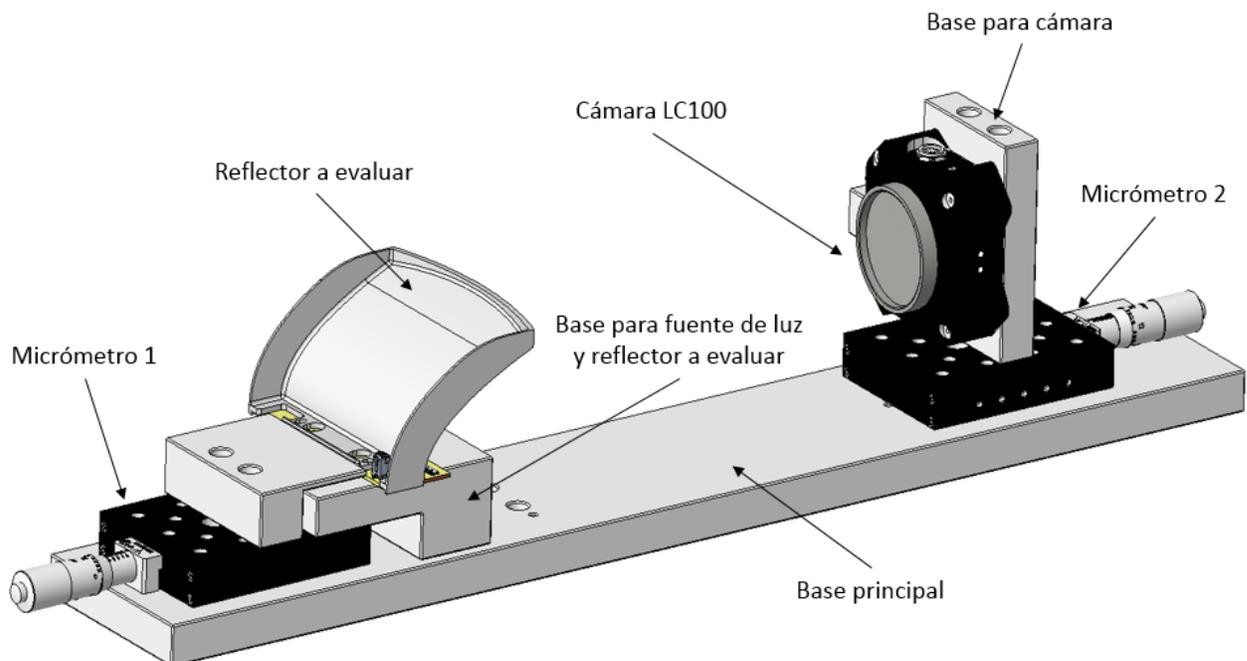


Figura 28. Bosquejo para el ensamble de herramienta de prueba

3. Interfaz Grafica

La interfaz gráfica resultante es mostrada en la figura 29, siguiendo las especificaciones o requerimientos estipulados en la primera fase de la metodología, se cuenta con las siguientes partes:

- Botón de inicio de prueba
- Botón de paro de prueba
- Botón de salida de la interfaz
- Dirección del archivo seleccionado con los requerimientos de prueba
- Factor de ganancia de la medición utilizado durante la calibración del sistema
- Eje 'Y' del grafico indica el nivel de intensidad medido en candelas (cd)
- Eje 'X' del grafico indica el ángulo medido respecto a la horizontal del haz de luz
- Indicador de límite mínimo de intensidad como criterio de aceptación, mostrado con línea roja
- Indicador de referencia en la distribución óptica basado en el comportamiento ideal del reflector con respecto a los requerimientos de diseño, esto es mostrado con línea azul
- Indicador visual de la medición en tiempo real, mostrado con línea blanca
- Indicador de límite máximo de intensidad como criterios de aceptación, mostrado con amarilla
- Leyenda con significado de las distintas líneas de colores en el grafico como referencia
- Indicadores visuales con resultado de prueba en recuadros rojo/verde para fallas y aceptaciones respectivamente, cada recuadro señala el estándar que cumple (sea FAA, ICAO, TC entre otras)

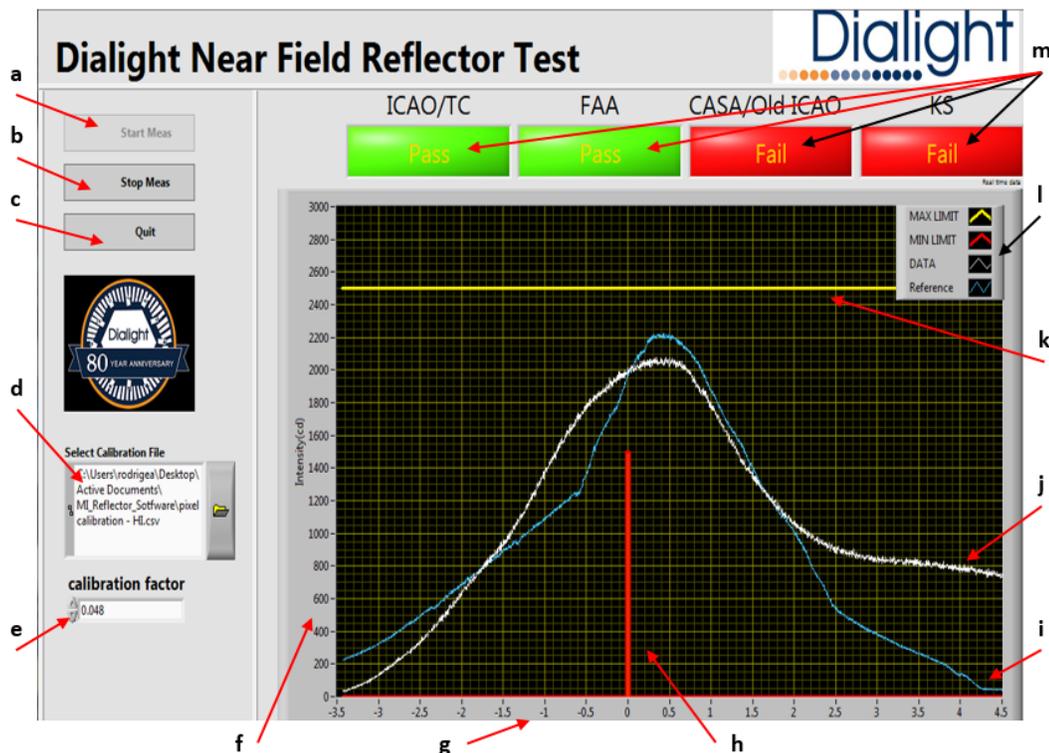


Figura 29. Diseño de la interfaz gráfica de usuario

3.4 Construcción de prototipo y pruebas preliminares

El resultado de la construcción del prototipo es mostrado en la figura 30, aquí se muestran todas las partes maquinadas y dispositivos adquiridos, tal y como fue representado en el bosquejo del ensamble.



Figura 30. Prototipo de fotogoniómetro ensamblado

Como parte de las pruebas preliminares se tomaron los datos de producción referentes al proceso de prueba funcional del producto terminado, se cuantificó la cantidad de unidades con falla y se tomaron las unidades que cumplieron con los requerimientos de prueba para caracterizar el proceso de prueba fotométrica de los reflectores. Los reflectores conformantes se utilizaron como base para definir la respuesta esperada de las unidades dentro de la especificación del diseño, así mismo, se definieron los límites de intensidad máximos y mínimos como criterio de prueba mediante un análisis de estadística descriptiva, los datos obtenidos durante este proceso son mostrados en la sección 4.1.

3.5 Pruebas de campo

Se realizó la prueba fotométrica a distintos lotes de reflectores, se tomó el material conformante y se procedió a ensamblarlo en el producto final para realizar la prueba óptica y asegurar su desempeño.

La figura 31 muestra el proceso parcial del ensamble de una luminaria L-856 de Dialight, el producto terminado consta de tres módulos idénticos apilados, 6 reflectores son ensamblados en cada módulo por lo que un luminaria completa requiere del ensamble de 18 reflectores.

Se midió el tiempo que tarda en realizar el proceso de prueba óptica de la luminaria con y sin la previa prueba fotométrica a los reflectores. Tomando en cuenta que una unidad que falla la prueba funcional implica desmontar los reflectores del ensamble para poder reemplazarlos, el tiempo de diferencia es en realidad tiempo añadido como proceso adicional, es decir, una unidad con falla siempre agregara tiempo al proceso de producción.

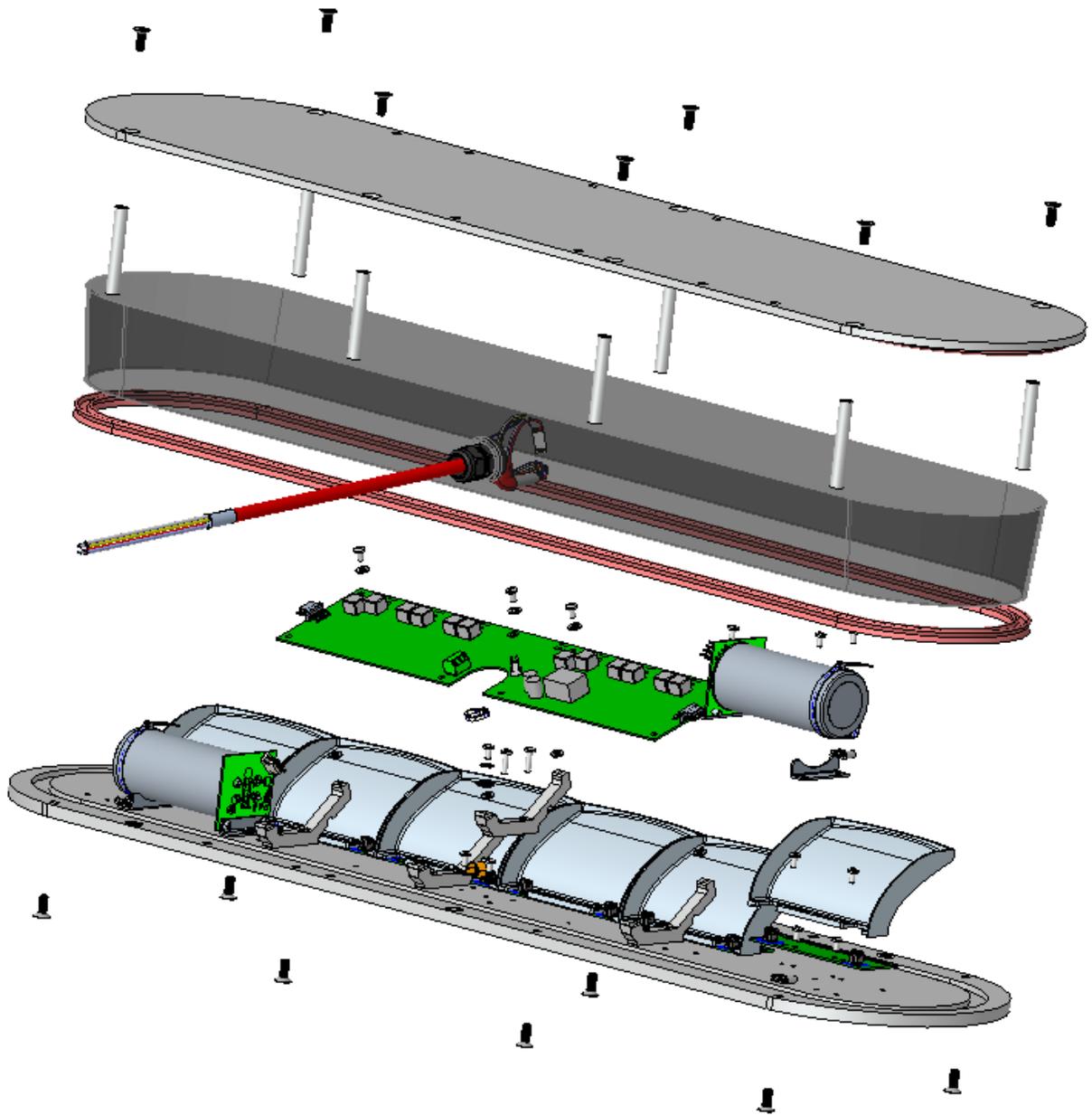


Figura 31. Ensamble de un módulo de luminaria L-856 de Dialight
(Fuente: Dibujo de ensamble 8800856004700x Rev. H)

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1 Pruebas preliminares

Los datos iniciales utilizados se basaron en 4 lotes de pruebas efectuadas a nivel final (producto terminado) donde los reflectores utilizados no fueron evaluados antes de su instalación, los resultados de estas pruebas son mostrados en la tabla 3, aquí se puede observar los altos porcentajes de falla, asimismo, es importante recordar que cada unidad de producto terminado contiene 18 reflectores.

Tabla 3. Resultados de prueba de reflectores ensamblados sin evaluación fotométrica previa

Muestra	Numero de parte	Unidades probadas	Unidades falladas	% Falla	Comentarios
E1	D2661019FH	60	49	81.7%	Falla inicial encontrada en producción
E2	D2661019FH	10	6	60.0%	Reflector lote A
E3	D2661019FH	10	8	80.0%	Reflector lote B
E4	D2661019FH	10	9	90.0%	Reflector lote C

Las muestra E1 refiere a una orden de producción en condiciones normales, esta fue la orden de manufactura con más material rechazado a lo largo de las pruebas mostradas. Las muestras E2, E3 y E4 fueron órdenes de evaluación controladas, es decir, el resto de variables posibles durante el proceso (como entrenamientos, materiales fuera de especificación, condiciones de prueba, etc.) fueron descartadas, igualmente, cada muestra fue ensamblada con reflectores de un mismo lote.

De los resultados mostrados en la tabla 3, se concluyeron 2 ideas principales:

1. Los reflectores no conformantes son la causa raíz de las fallas observadas en las muestras

Esto es debido a que durante las muestras E2, E3 y E4 fueron descartadas las distintas variables que pudieran estar afectando al desempeño de la prueba.

2. Los distintos lotes de reflectores contienen material discrepante pero también material conforme a las especificaciones

Esto se concluye al obtener resultados satisfactorios en las distintas muestras de prueba efectuadas.

Como fue descrito en la metodología, los reflectores ensamblados en las unidades cuyos resultados de prueba fueron satisfactorios, fueron utilizados para caracterizar el fotogoniómetro. Para que este proceso pudiera ser llevado a cabo, se tomó como base el comportamiento ideal de un reflector conforme a la especificación de diseño y los 180 reflectores obtenidos (18 x unidad) fueron medidos. La figura 32 muestra un histograma que resume dichos resultados.

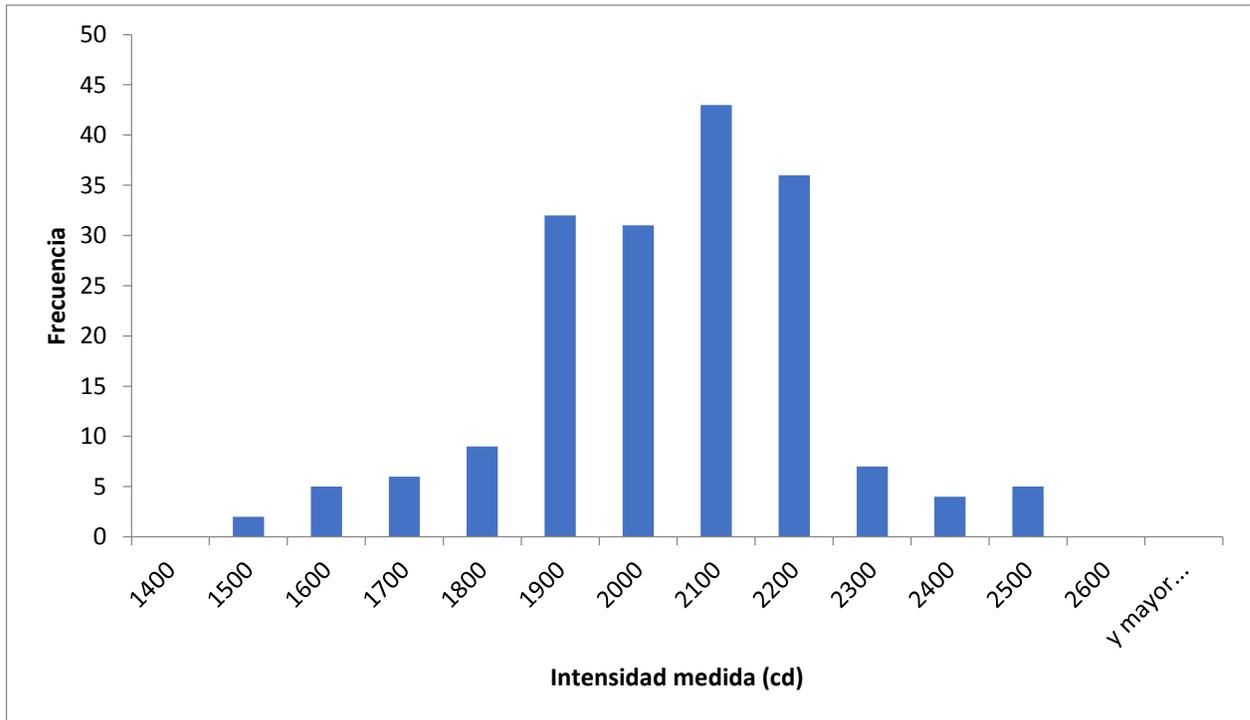


Figura 32. Histograma para caracterización de fotogoniómetro

Los resultados mostrados en la figura 32, permitieron el cálculo de los límites máximos y mínimos necesarios para identificar reflectores conformes a especificación mediante herramientas de estadística descriptiva como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Datos para caracterización de fotogoniómetro

Dato	Valor obtenido
Promedio	2000cd
Mediana	2020cd
Desviación estándar	195cd
Lecturas	180
Maximo	2490cd
Mínimo	1500cd
Límite máximo	2584cd
Límite Mínimo	1416cd

Los límites máximos y mínimos fueron basados en 3 desviaciones estándar a cada extremo del promedio calculado, sin embargo, por cuestiones de seguridad en las mediciones, se optó por utilizar valores más cercanos a las mediciones máximas y mínimas reales para asegurar la confiabilidad de los resultados. Una vez finalizada la caracterización del equipo de prueba, se definieron las condiciones y ajuste de prueba para ser utilizado en producción, estos son mostrados en la tabla 4.

Tabla 5. Condiciones de prueba

Parámetro	Valor
Voltaje de la fuente	55VDC
Corriente limite	20mA
Límite máximo de intensidad	2500cd
Límite mínimo de intensidad	1500cd

4.2 Pruebas de campo

Una vez definidos los ajustes de prueba y criterios de aceptación, se procedió a realizar la evaluación fotométrica de los distintos lotes de reflectores que se encontraban en la planta de manufactura, la figura 33 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos de reflectores no conformantes o bien de una prueba fallida, en esta muestra se puede observar un defecto de moldeo ya que los niveles de intensidad son similares a los deseados pero desfasados en ángulo.

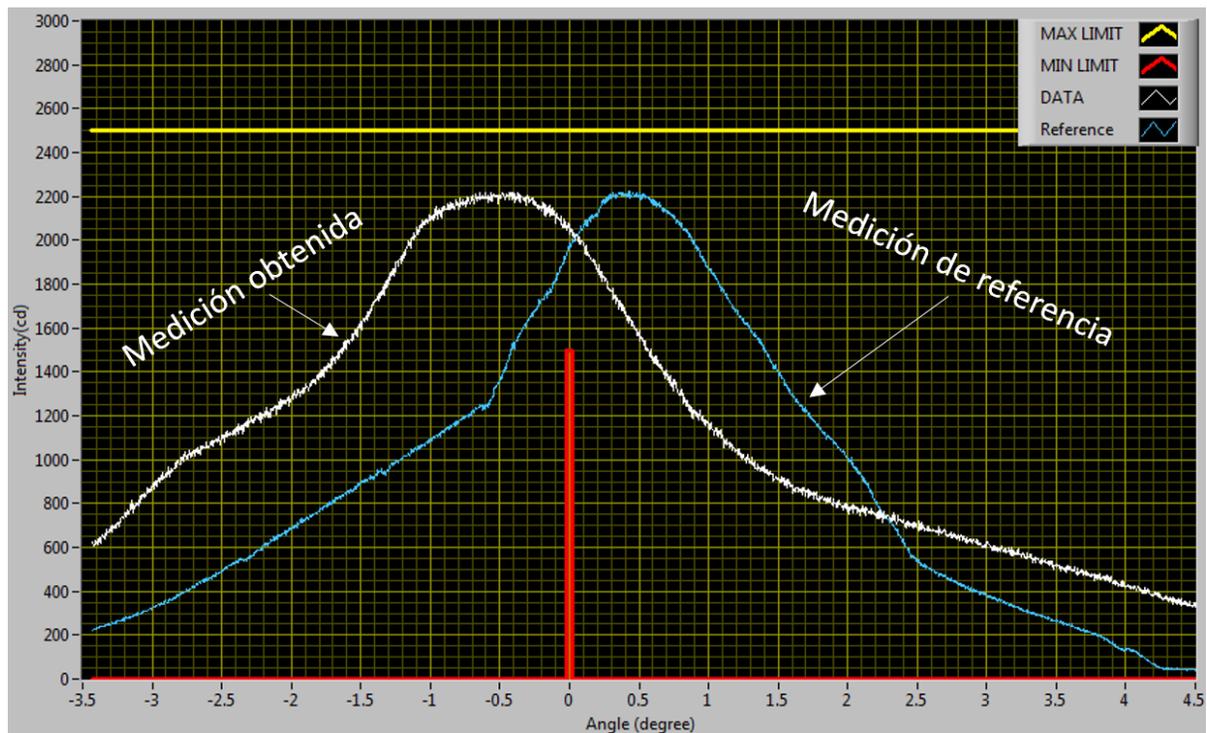


Figura 33. Ejemplo del resultado de reflector con defecto de moldeo

Otro ejemplo de los resultados obtenidos como reflectores no conformantes es mostrado en la figura 34, en esta se muestra que los límites mínimos de intensidad no son alcanzados, razón por la cual falló la prueba, este es un ejemplo de defecto de metalizado ya que la forma de la distribución de intensidad es la correcta en ángulos pero no en intensidad total.

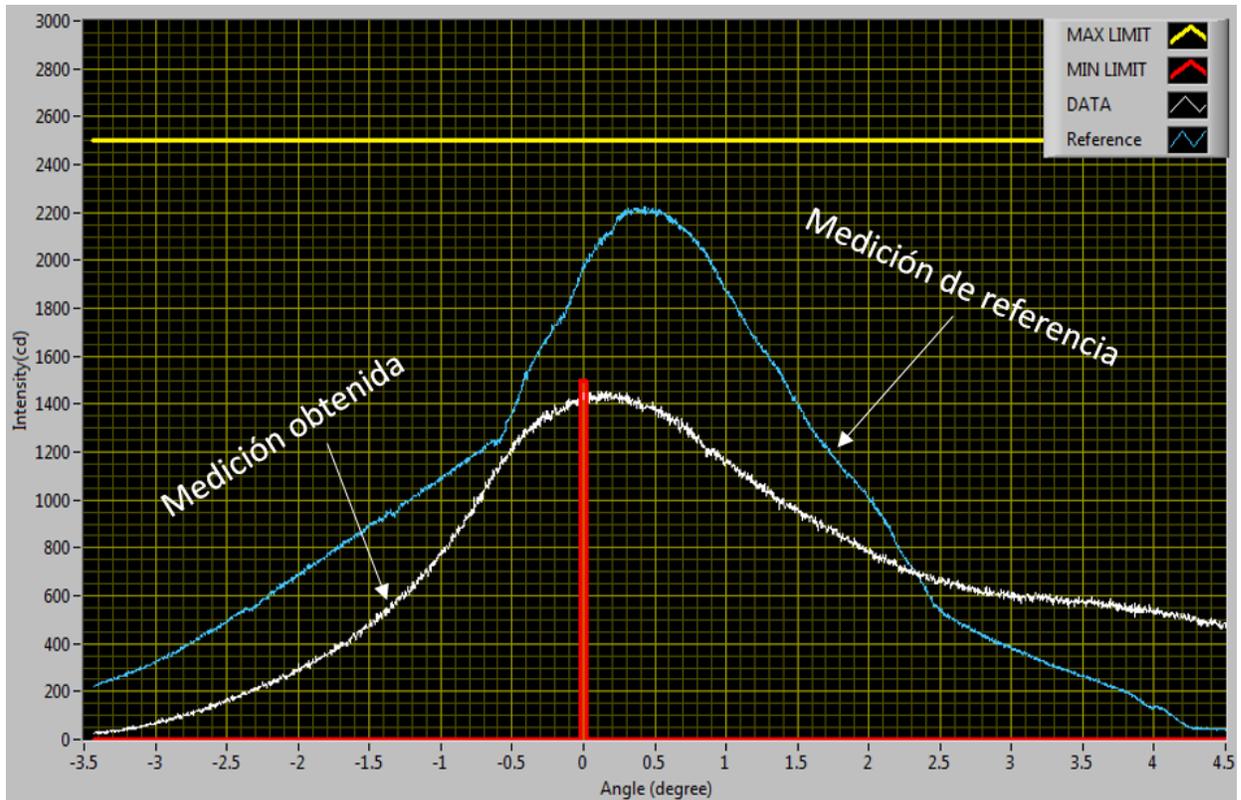


Figura 34. Ejemplo del resultado de reflector con defecto de metalizado

En lo referente a las pruebas satisfactorias, la figura 35 muestra un ejemplo del resultado de un reflector que cumple los criterios de prueba, en este ejemplo se logra observar una distribución de intensidades similar a la de referencia, tanto en ángulo como en magnitud.

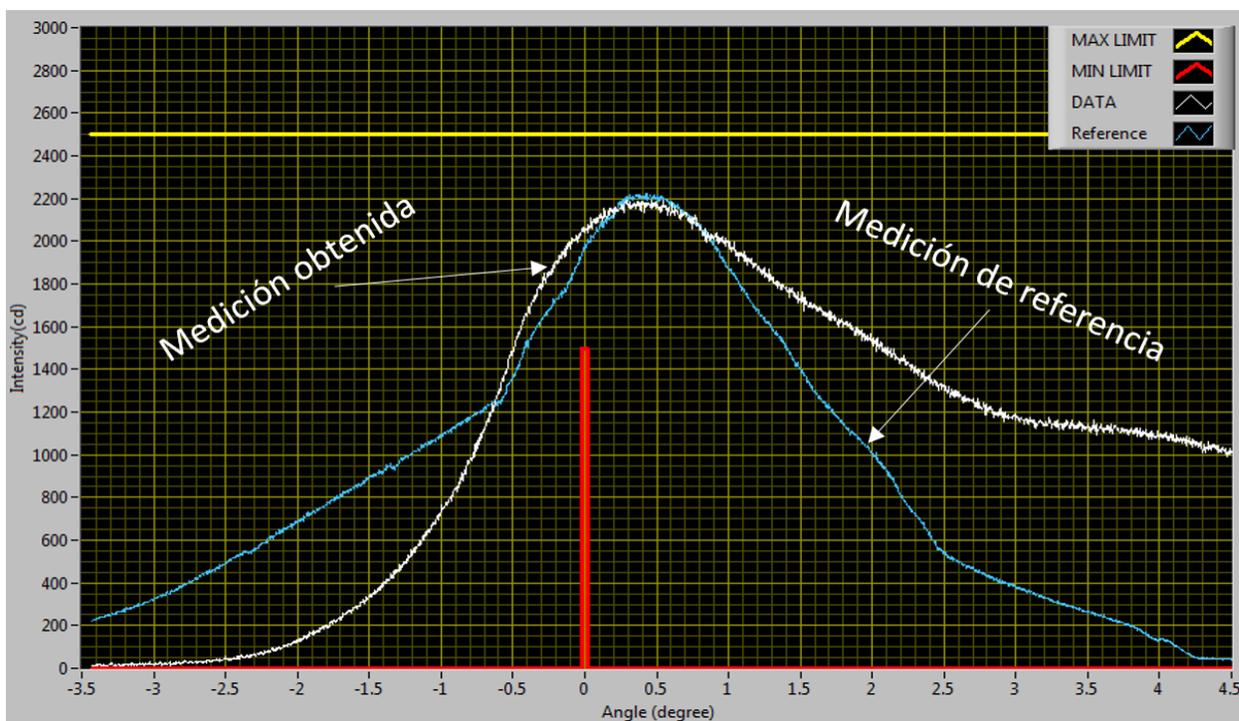


Figura 35. Ejemplo del resultado de reflector que cumple los criterios de prueba

De manera preliminar se optó por evaluar el lote de reflectores cuya fecha de fabricación era la más antigua, como resultado se obtuvieron 273 reflectores no conformante de un total de 774 (~35%). Una vez confirmada la veracidad de los resultados mediante la prueba óptica del producto terminado, se procedió a evaluar el resto de los reflectores que se encontraban en inventario, dando lugar a los resultados de la tabla 6.

Tabla 6. Resultado general de las pruebas a distintos lotes de reflectores

Muestra	Numero de parte	Reflectores medidos	Reflectores no conformantes	% Falla	Comentarios
R1	9450865000200	774	273	35.3%	Lote D
R2	9450865000200	889	347	39.0%	Lote E
R3	9450865000200	1050	395	37.6%	Lote F
R4	9450865000200	822	393	47.8%	Lote G
R5	9450865000200	2688	295	11.0%	Lote H

Los resultados de la figura tabla 6 implican que hubo una mejora en el proceso de fabricación de los reflectores, ya que la muestra con el mayor número de reflectores probados es la que tiene el menor número de fallas y como se comentó anteriormente, este fue el último lote fabricado.

4.3 Desempeño del proceso

Los reflectores previamente evaluados fueron utilizados para el ensamble de luminarias, como parte del proceso de análisis de datos, se construyeron y se realizó prueba óptica a 3 muestras de 10 unidades cada una, los resultados son mostrados en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de prueba óptica funcional en product terminado utilizando reflectores previamente evaluados en el fotogoniómetro

Muestra	Numero de parte	Unidades probadas	Unidades falladas	% Falla	Comentarios
E5	D2661019FH	10	0	0%	Reflector lote D
E6	D2661019FH	10	0	0%	Reflector lote E
E7	D2661019FH	10	0	0%	Reflector lote F

Haciendo una comparación entre la tabla 3 y la tabla 7, se puede observar que las fallas son mitigadas en todas las muestras probadas, la figura 36 muestra la comparación entre muestras E2-E4 (reflectores sin previa evaluación) y las muestras E5-E7 (reflectores previamente evaluados).

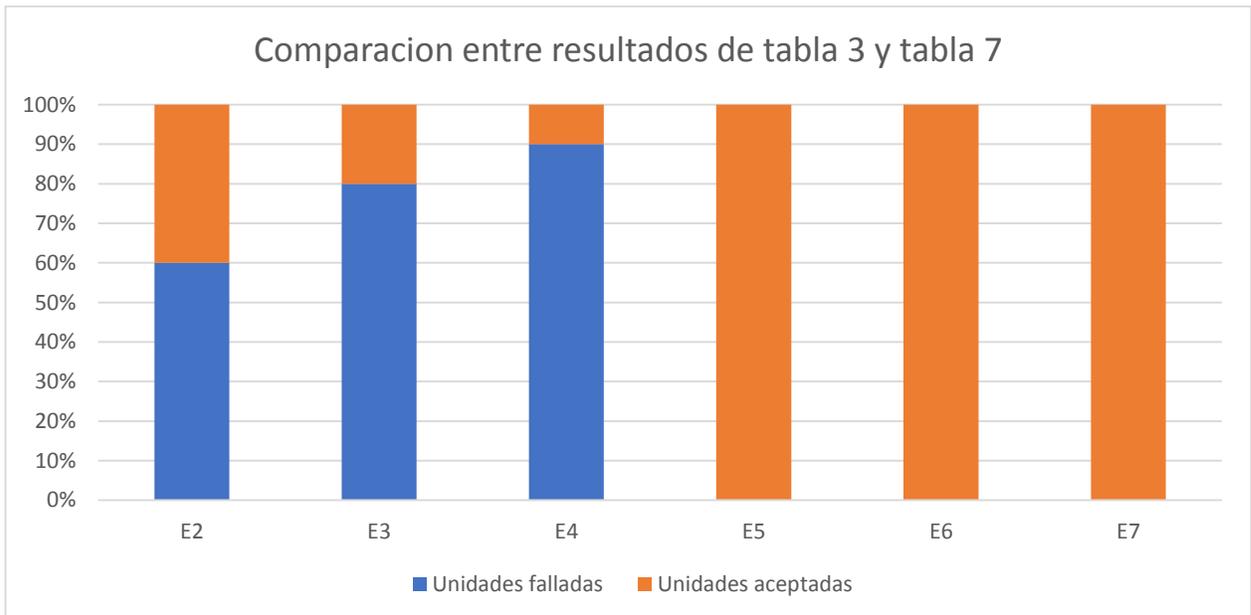


Figura 36. Comparación entre resultados de tabla 3 y tabla 7

El resultado de la figura 36 refiere a que la confiabilidad de la prueba óptica funcional incrementa de un promedio de 20% sin la evaluación previa de los reflectores a un 100% al realizar una prueba fotométrica a los reflectores antes de ser utilizados en el proceso de ensamble. Es a su vez indica que el desempeño del fotogoniómetro construido del 100% de confiabilidad.

Se procedió a realizar un estimado del impacto financiero a la empresa relacionado con los tiempos de proceso añadido y la cantidad de material desechado por cuestiones de calidad. La tabla 8 indica los tiempos por etapa del proceso de retrabajo para las unidades con falla y la tabla 9 indica los costos por material desechado.

Tabla 8. Tiempo añadido en proceso de retrabajo por unidad con falla

Proceso	Tiempo por modulo (min)	Tiempo por unidad (min)
Desensamblar módulos	N/A	2
Remover plato superior	2	6
Remover reflectores	2	6
Ensamblar reflectores	2	6
Ensamblar plato superior	2	6
Ensamblar módulos	N/A	2
Realizar prueba óptica	N/A	12
Tiempo total		40 minutos

Tabla 9. Impacto financiero por material no conformante

Muestra	Numero de parte	Reflectores no conformantes	Costo por reflector (USD)	Costo de la muestra (USD)
R1	9450865000200	273	\$0.93	\$253.89
R2	9450865000200	347	\$0.93	\$322.71
R3	9450865000200	395	\$0.93	\$367.35
R4	9450865000200	393	\$0.93	\$365.49
R5	9450865000200	295	\$0.93	\$274.35
Costo total			\$1,583.79	

4.4 Discusión

Los resultados obtenidos durante las pruebas preliminares mostrados en la figura 32 fueron utilizados para caracterizar el fotogoniómetro, este hecho tiene la implicación de que los criterios de evaluación y las condiciones de prueba fueron obtenidos de manera experimental y a su vez podría significar que los límites de prueba o criterios de evaluación estarían muy acotados, implicando que se está rechazando material conforme debido a falsos rechazos en la evaluación fotométrica. Para poder refutar este hecho, o visto desde otra perspectiva, para mejorar los criterios de evaluación, sería necesario analizar los resultados de las pruebas ópticas del producto terminado mediante herramientas de estadística descriptiva y así poder replantear de ser necesario el cálculo de los límites de evaluación en la prueba fotométrica.

De manera general, los resultados obtenidos en cuanto al funcionamiento del fotogoniómetro desarrollado fueron satisfactorios, las curvas fotométricas obtenidas fueron las esperadas en comparación con el comportamiento teórico de los reflectores y la confiabilidad de los resultados fue de un 100% al cumplir satisfactoriamente las especificaciones de prueba durante la prueba óptica del producto terminado.

En referencia a la aplicación de la herramienta, los resultados mostraron su efectividad en cuanto a los retrabajos evitados por fallas en la prueba óptica final, sin embargo, para poder arreglar la causa raíz del problema, el cual radica en el proceso de fabricación de los reflectores, será necesario implementar la evaluación fotométrica como parte del proceso de inspección de calidad durante su fabricación y/o proceso de metalizado, de esta forma el material no conformante será identificado en tiempo para poder evitar los porcentajes de falla mostrados durante las pruebas de este estudio. Dicha implementación podría ser objetivo de un proyecto futuro, ya que implicaría estudios técnicos industriales referentes a los procesos de fabricación y a su vez, el desarrollo de la correcta documentación para la ejecución de la prueba y manejo de la herramienta desarrollada.

En lo referente a proyectos futuros basados en la presente investigación, la implementación del fotogoniómetro desarrollado para la ejecución de la prueba óptica del producto terminado, será una opción a desarrollar cuyo impacto en el proceso actual sería disruptivo. A diferencia de los ejemplos mostrados en los antecedentes, las luces de obstrucción solo necesitan ser evaluadas en uno o dos puntos específicos, por lo que la infraestructura necesaria para llevar a cabo dicha prueba no incurre en gastos millonarios y las tecnologías elegidas para el presente estudio, han demostrado ser viables para la aplicación.

Capítulo 5. Conclusiones

Los resultados mostrados en la figura 37 mostraron el cumplimiento de la hipótesis formulada para este proyecto de investigación, incluso, al mitigar por completo el porcentaje de falla en el producto terminado, se demostró que la evaluación de los reflectores previa al proceso de ensamble con ayuda de un fotogoniómetro, asegura al 100% la calidad de los reflectores utilizados en el producto final.

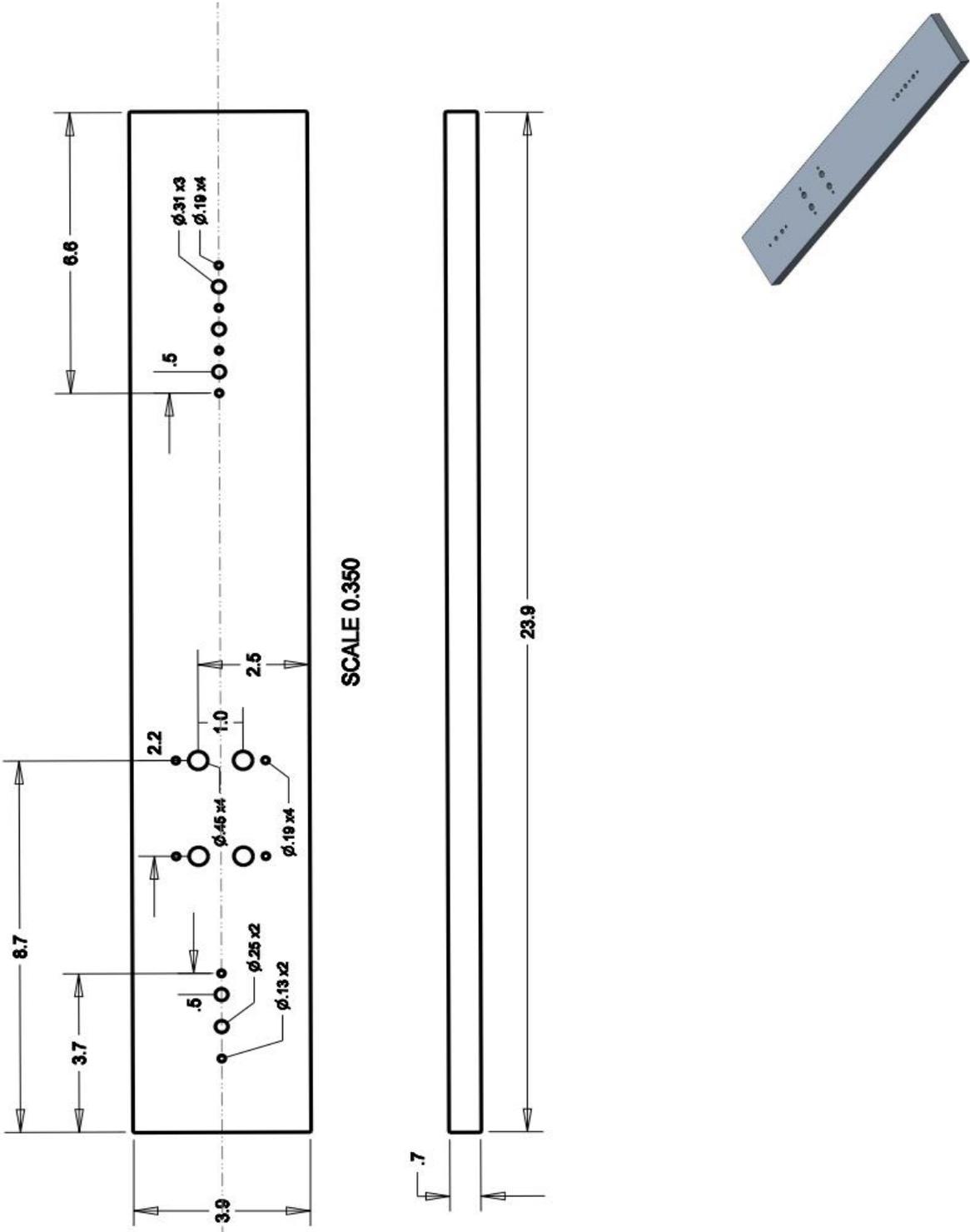
En lo que percate a las tecnologías utilizadas para el desarrollo del fotogoniómetro, gracias a las capacidades del dispositivo fotodetector elegido fue posible obtener la curva fotométrica completa de los reflectores sin necesidad de reubicar la fuente de luz durante la ejecución de la prueba. Los ejemplos de fotogoniómetros mostrados en estudios previos, en su mayoría constan de estructuras automatizadas las cuales posicionan la fuente de luz en distintos ángulos para poder obtener la curva fotométrica, pero gracias a que las luminarias de obstrucción son una aplicación donde el haz de luz a evaluar es enfocado solo horizontalmente, el vector de 2048 pixeles del fotodetector es suficiente para medir el haz de luz.

De manera general se logra concluir que el proceso de evaluación fotométrica propuesto, logra cumplir su objetivo de identificar los reflectores no conformantes y así eliminar en un 100% las fallas de la prueba de producto terminado referentes a la calidad de los reflectores utilizados. De la misma manera, se concluye que el desarrollo de un fotogoniómetro enfocado en una aplicación específica, es funcionalmente posible incluso sin la necesidad de infraestructura de un laboratorio óptico certificado, sin embargo, esto tiene sus limitantes como lo es la exactitud de las mediciones al momento de obtener las lecturas de intensidades.

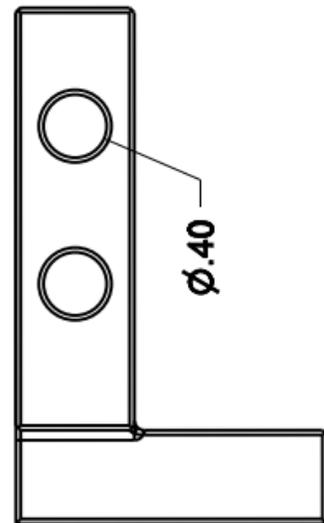
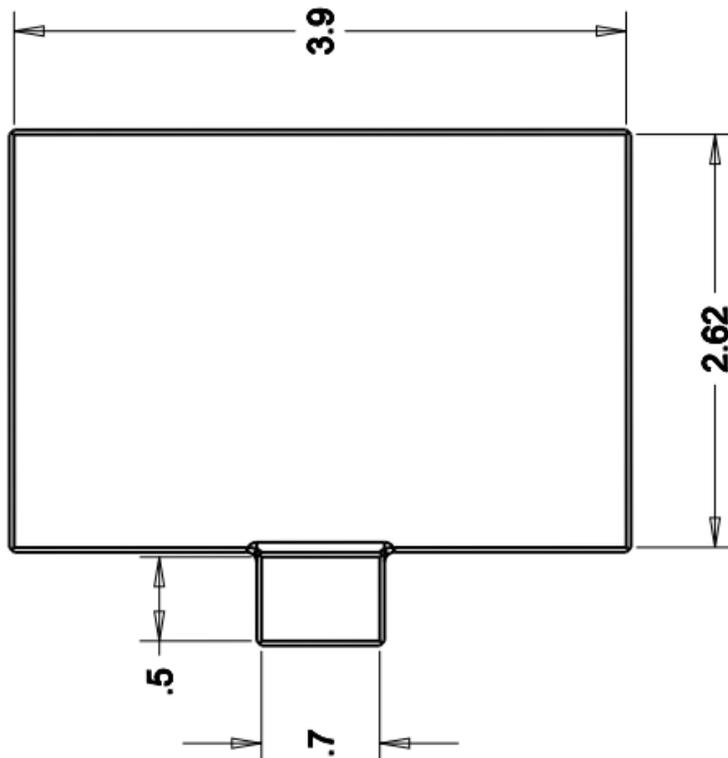
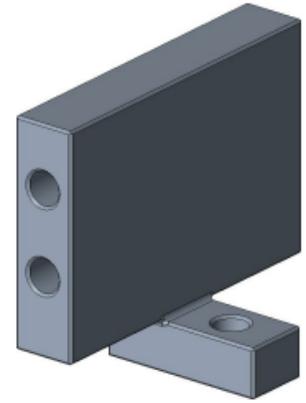
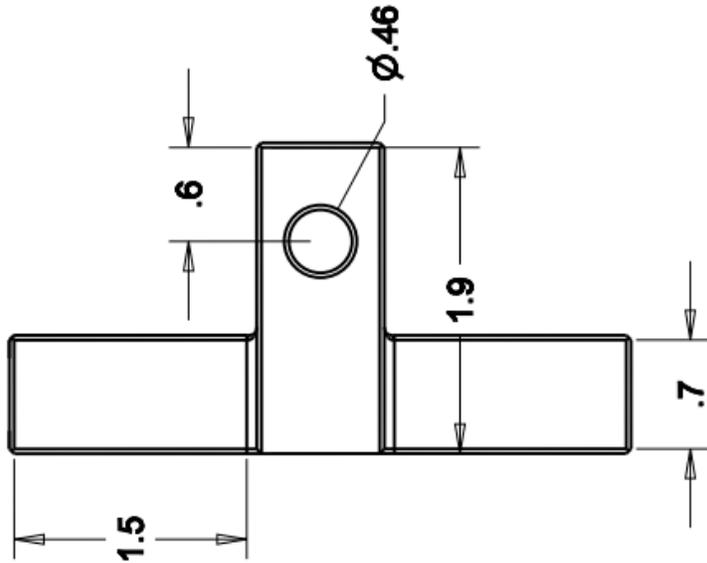
Así mismo, el alcance de la herramienta desarrollada solo realiza una comparación entre las distribuciones de intensidades de reflector a reflector, no es posible confirmar al 100% una lectura en cuanto a la cantidad de intensidad luminosa medida en una dirección dada. Por lo que no es posible utilizar la herramienta para la ejecución de la prueba óptica del producto terminado sin un desarrollo previo.

Anexos

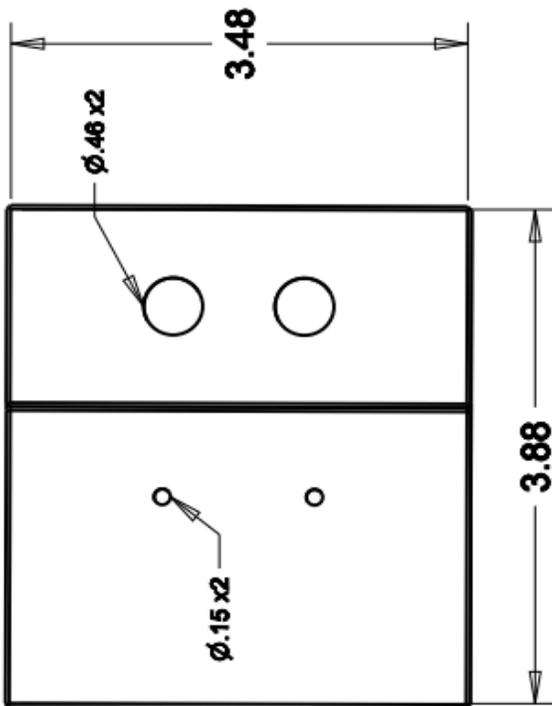
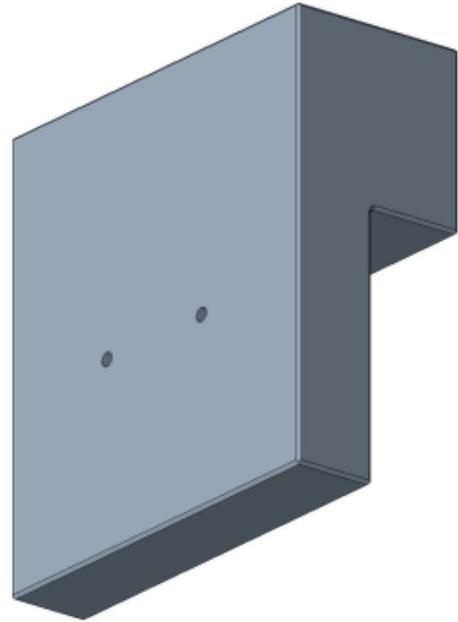
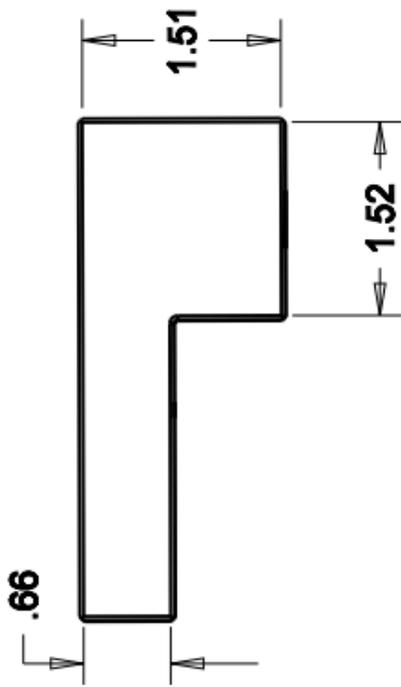
Anexo A. Plano de construcción de la base principal de la estructura de montaje
(dimensiones en pulgadas)



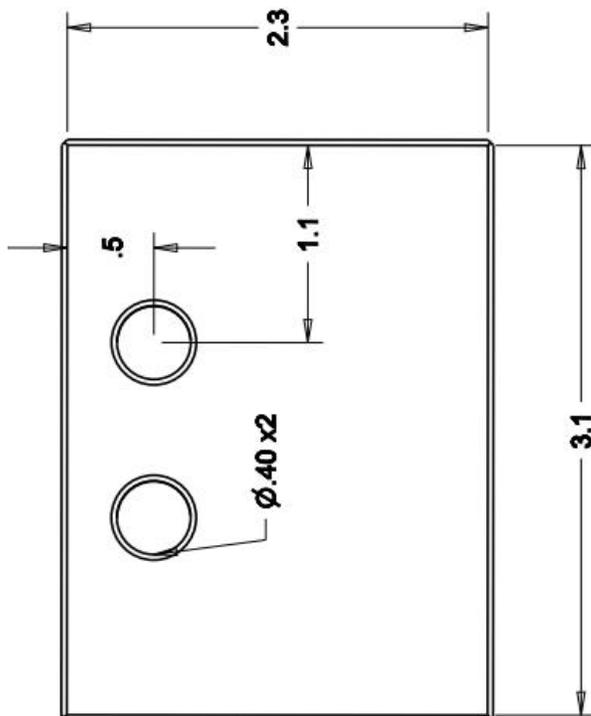
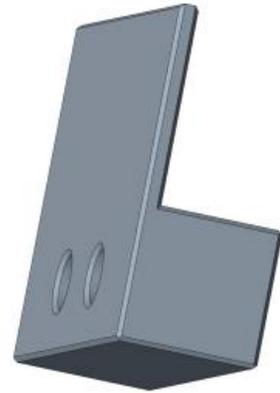
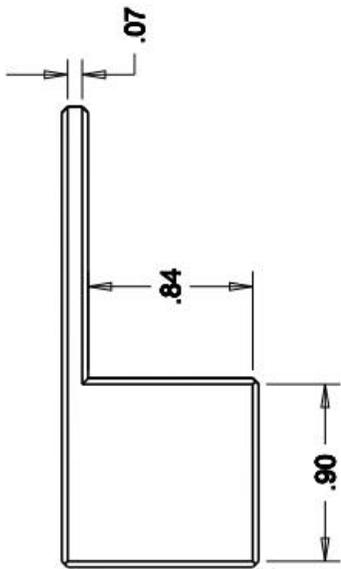
Anexo B. Plano de construcción de la base para el fotodetector (dimensiones en pulgadas)



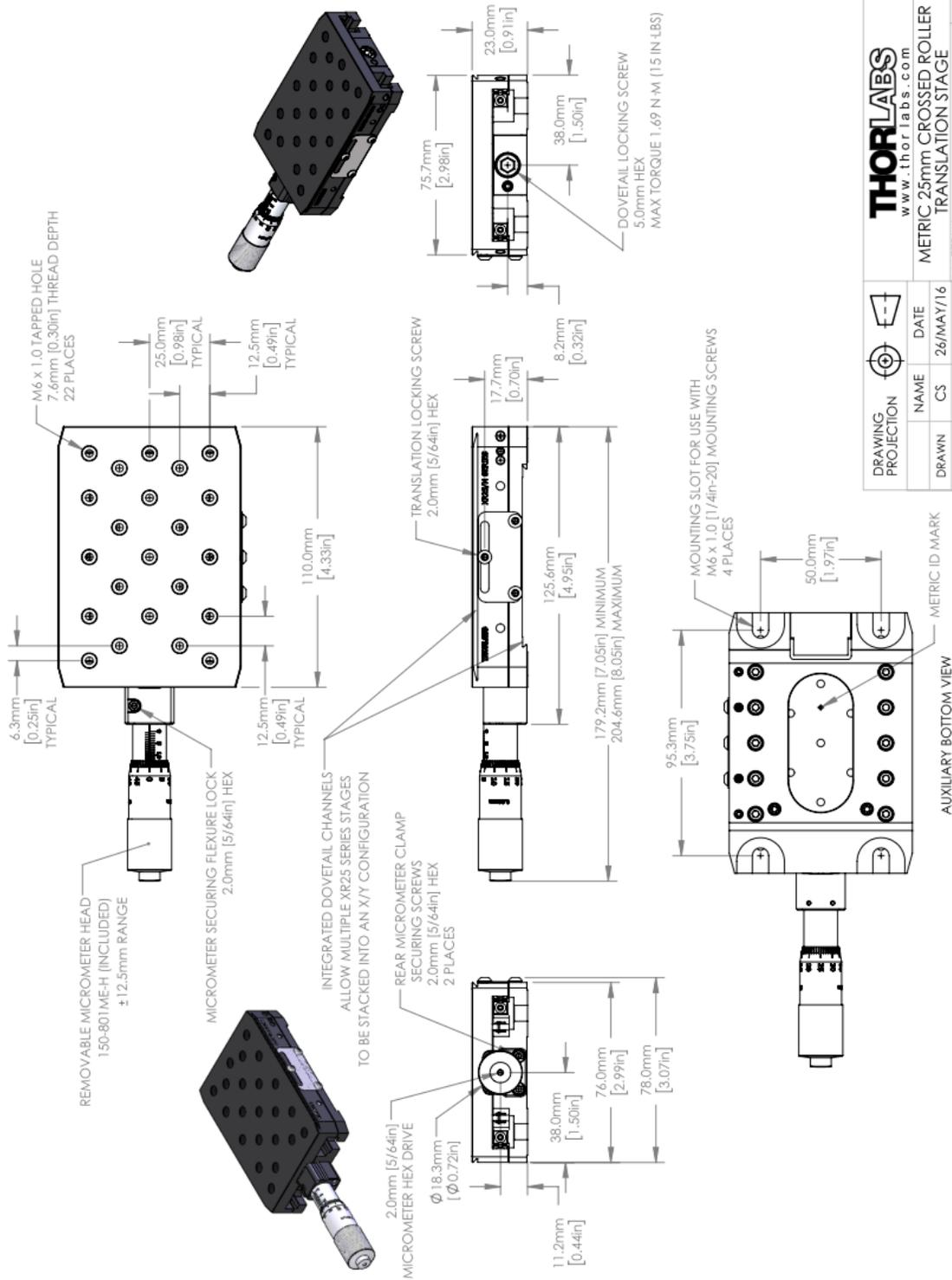
Anexo C. Plano de construcción para la base de la Fuente de luz y reflector
(dimensiones en pulgadas)



Anexo D. Plano de construcción para la base de ajuste para el reflector
(dimensiones en pulgadas)



Anexo E. Hoja de datos del micrómetro utilizado en la estructura de montaje
 (Fuente: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=XR25C#ad-image-0>)



NAME	DATE	METRIC 25mm CROSSED ROLLER TRANSLATION STAGE	REV
CS	26/MAY/16		D
AV	26/MAY/16	MATERIAL	N/A
COPYRIGHT © 2016 BY THORLABS VALUES IN PARENTHESES ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND OFF ERRORS		ITEM #	APPROX WEIGHT
		XR25C/M	0.51 kg

FOR INFORMATION ONLY
 NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES

SONY

ILX554B

2048-pixel CCD Linear Sensor (B/W) for Single 5V Power Supply Bar-code Reader

Description

The ILX554B is a rectangular reduction type CCD linear image sensor designed for bar code POS hand scanner and optical measuring equipment use. A built-in timing generator and clock-drivers ensure single 5V power supply for easy use.

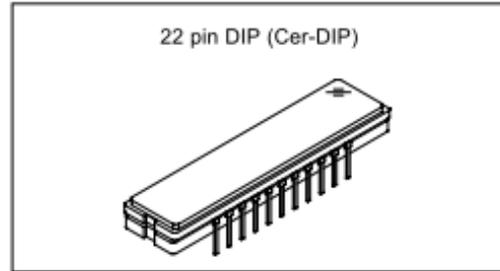
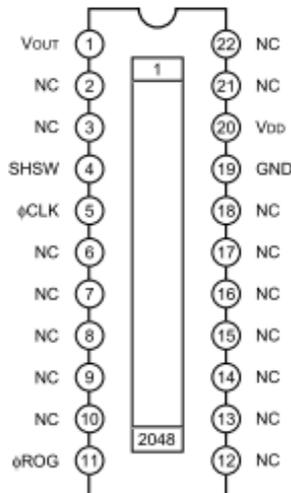
Features

- Number of effective pixels: 2048 pixels
- Pixel size: 14µm × 56µm (14µm pitch)
- Single 5V power supply
- Ultra-high sensitivity
- Built-in timing generator and clock-drivers
- Built-in sample-and-hold circuit
- Maximum clock frequency: 2MHz

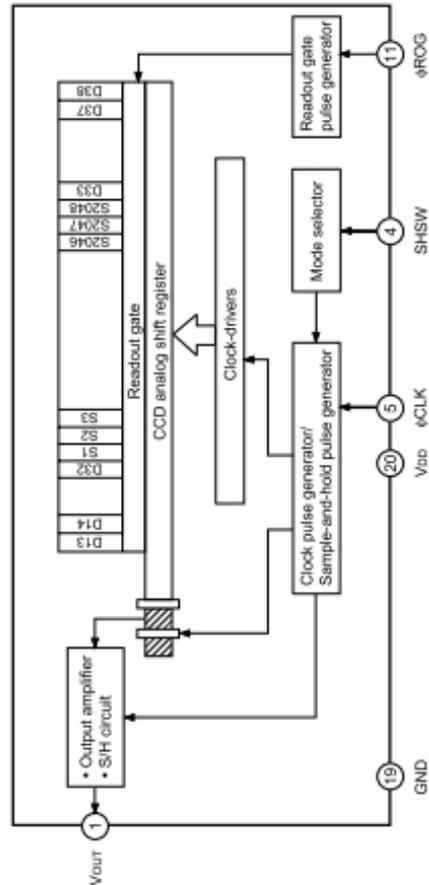
Absolute Maximum Ratings

- Supply voltage V_{DD} 6 V
- Operating temperature -10 to +60 °C
- Storage temperature -30 to +80 °C

Pin Configuration (Top View)



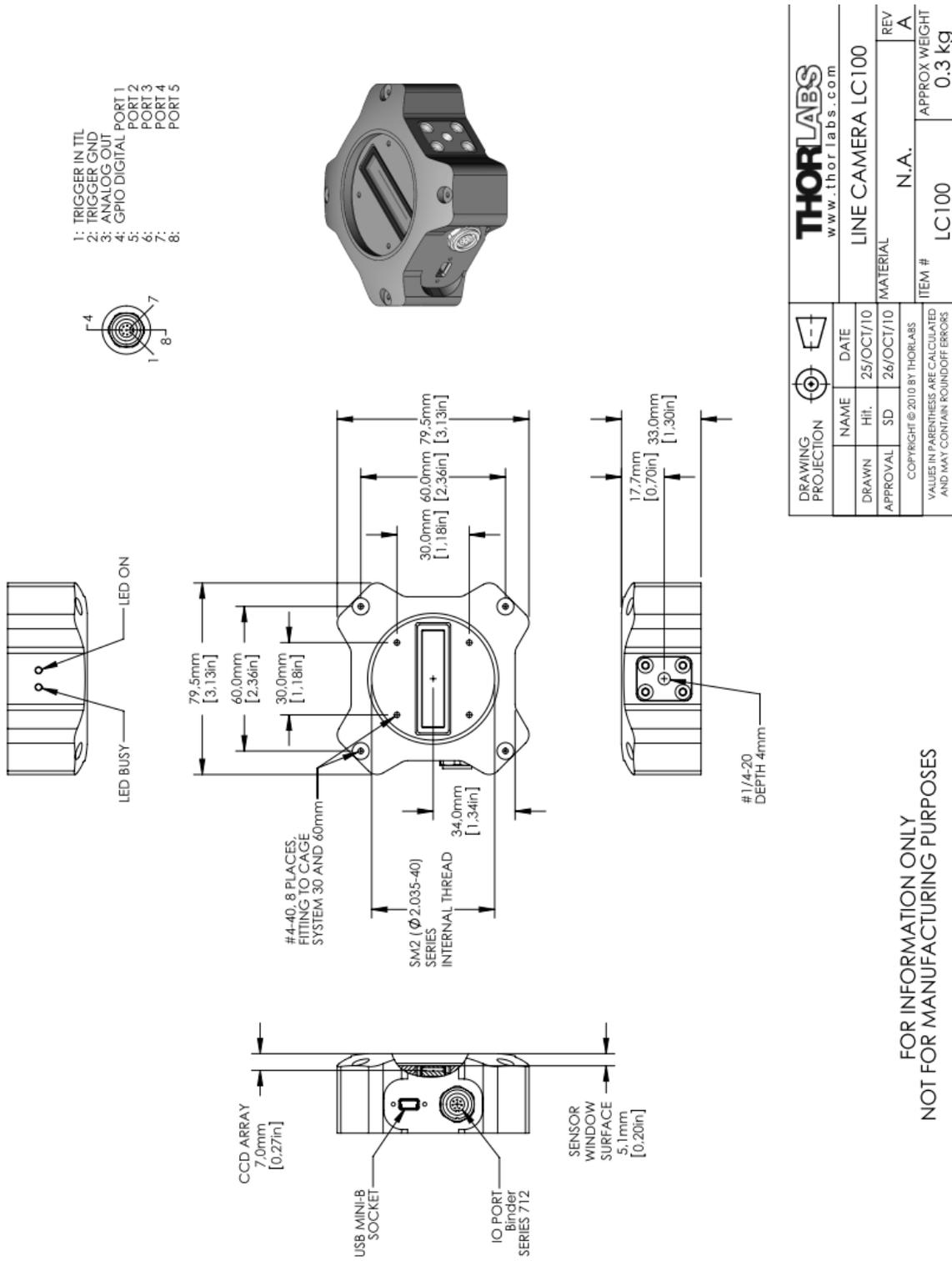
Block Diagram



Sony reserves the right to change products and specifications without prior notice. This information does not convey any license by any implication or otherwise under any patents or other right. Application circuits shown, if any, are typical examples illustrating the operation of the devices. Sony cannot assume responsibility for any problems arising out of the use of these circuits.

Anexo G. Especificaciones mecánicas del dispositivo LC100

(Fuente: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5290)



FOR INFORMATION ONLY
 NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES

Anexo H. Tabla con los resultados de reflectores conformantes para la caracterización del fotogoniómetro

Reflector	Medición (cd)						
1	1840	46	2190	91	1960	136	1540
2	2170	47	2140	92	2120	137	2110
3	2060	48	1800	93	2170	138	2090
4	2160	49	1820	94	2020	139	1720
5	2080	50	1870	95	2000	140	2050
6	1840	51	1870	96	1820	141	1500
7	1960	52	1920	97	2010	142	1760
8	2140	53	2140	98	1900	143	2130
9	2040	54	1950	99	2080	144	2160
10	2030	55	2140	100	1960	145	1740
11	1900	56	1980	101	1840	146	2170
12	2060	57	2070	102	2430	147	1610
13	2020	58	1930	103	1870	148	1500
14	2090	59	1890	104	2130	149	1900
15	2180	60	2100	105	1980	150	2160
16	2060	61	1960	106	2070	151	1710
17	2110	62	1850	107	2180	152	1950
18	2190	63	1890	108	1610	153	2490
19	1990	64	2060	109	1590	154	2020
20	2080	65	1860	110	2380	155	2260
21	1810	66	1910	111	1710	156	2120
22	1930	67	2150	112	2270	157	2350
23	1910	68	1990	113	1930	158	2090
24	2090	69	2010	114	1820	159	1640
25	1890	70	2090	115	2440	160	2190
26	2180	71	1840	116	1530	161	1910
27	1910	72	2140	117	1870	162	2060
28	1800	73	2030	118	1560	163	1510
29	2180	74	1880	119	1850	164	1950
30	2000	75	1960	120	2150	165	1940
31	2100	76	2100	121	2190	166	2130
32	2170	77	2120	122	2480	167	1920
33	2010	78	1830	123	1670	168	2210
34	2060	79	1880	124	2020	169	2440
35	2070	80	2070	125	1860	170	2270
36	2050	81	1930	126	2030	171	2020
37	2170	82	2040	127	2200	172	1880
38	1970	83	1870	128	1960	173	1660
39	2160	84	2180	129	1730	174	1670
40	1840	85	1960	130	1970	175	2190
41	2070	86	2010	131	2040	176	2390
42	1980	87	2080	132	2090	177	1840
43	1830	88	2190	133	2320	178	1870
44	1820	89	2050	134	2300	179	1750
45	2050	90	2000	135	2240	180	2270

Anexo I

El siguiente apartado ofrece al lector información relevante para un mejor entendimiento y comprensión de lo que el presente estudio ofrece, esto es referencia a la resolución de la problemática encontrada en los procesos de manufactura de la empresa de luminarias Dialight. Se presentaran algunos puntos resumiendo la información explicada en el cuerpo del documento para una mejor comprensión de los mismos.

1. Problemática a resolver

En lo que percate a la problemática enfrentada, dicho de manera puntual y resumida, es el alto porcentaje de fallas (de hasta 80%) durante el proceso de prueba óptica del producto L-856, esto debido a los problemas de calidad que afectan a los reflectores utilizados en el ensamble. Asimismo, parte del problema es que actualmente Dialight no cuenta con un proceso definido para evaluar la calidad de los reflectores, por lo que el material no conformante afecta directamente el producto terminado.

Si bien, los efectos al proceso a causa de la problemática planteada fueron cuantificados en la sección de resultados (tiempo agregado de proceso y monto de scrap), la razón detrás de la urgencia en el desarrollo de este proyecto fue que a causa del problema encontrado con los reflectores, la línea de ensamble del producto L-856 fue detenida totalmente, esto es, el producto no estaba siendo fabricado y por tanto los clientes no estaban siendo atendidos. Esta dirección fue dada por el equipo gerencial de la planta de manufactura debido a que los costes de producción por correr en estas condiciones serían muy altos, razón por la cual los recursos de producción fueron enfocados a líneas de producto con ventas listas para enviar.

2. Propuesta de integración de la tecnología en un paquete transferible como proyecto futuro

Si bien, la idea para el desarrollo del presente estudio surge debido al problema enfrentado durante el proceso de ensamble de la luminaria L-856, la aplicación de la herramienta resultante (fotogoniómetro) no se limita a la planta de manufactura en Ensenada o en si al proceso de fabricación de la luminaria, si no que para poder atacar la causa raíz del problema, es necesario aplicar el uso del fotogoniómetro desarrollado en la planta de fabricación de los reflectores a manera de inspección de su producto justo en el momento de fabricación.

En lo referente a los defectos encontrados en los reflectores durante las pruebas del fotogoniómetro, se resumen en dos problemas generales ligados al proceso de fabricación; el primero es un problema de

moldeo, posiblemente debido a desgaste del herramental o cambios al proceso en general que no fueron correctamente validados; el segundo problema es debido a deficiencias en el metalizado, esto es, recubrimientos pobres de metalizado sobre el reflector, posiblemente debido a problemas durante el proceso de enmascarado o ineficiencias del proceso en general.

Para poder atacar dichos problemas de raíz, es indispensable implementar procesos de evaluación de calidad a los reflectores mediante la utilización del fotogoniómetro desarrollado, para esto es imperativo la integración de la herramienta a los procesos de fabricación (moldeo y metalizado). Para lo cual se sugiere un estudio futuro que se enfoque en el desarrollo e implementación de un proceso con el objetivo de solucionar el problema de raíz, implicando el desarrollo de los siguientes puntos:

a) Manual de instalación

Este documento tendría como objetivo desarrollar paso a paso el proceso necesario para el ensamble mecánico del fotogoniómetro, la correcta instalación de los controladores e interfaz gráfica de usuario en la computadora y asimismo, como realizar pruebas de control para asegurar el funcionamiento del sistema. Al mismo tiempo se podría agregar un proceso de caracterización en caso de querer utilizar el sistema para la evaluación de reflectores diferentes para los que fue desarrollado.

Adicionalmente, se agregarían todas las especificaciones mecánicas y planos de construcción de los diseños propios mencionados en este estudio y los modelos y números de parte de los dispositivos que fueron comprados, esto ayudaría a que todo el material necesario pueda ser adquirido localmente por la empresa a utilizarlo, reduciendo el costo de adquisición.

b) Guía de implementación

Este apartado estaría enfocado al desarrollo metodológico de la implementación del proceso de evaluación al proceso de fabricación, para lo cual sería necesario cubrir lo siguiente; 1) definir criterios de evaluación o prueba y ligarlos a las posibles variables del proceso que podrían estar afectando el desempeño de las mediciones; 2) definir tamaño de la muestra y su frecuencia de ejecución, es decir, cada cuando es necesario realizarla, puede ser por cantidad de unidades construidas, tiempo de utilización de algunas herramientas de fabricación o para la validación de movimientos o cambios a los procesos.

c) Manual de usuario

Dicho manual tendría como objetivo documentar todo lo relacionado al uso del sistema para la aplicación específica para la cual fue desarrollado, entre otros aspectos debería cumplir con; 1) explicar cada uno de los botones de la interfaz y los comandos posibles en la misma; 2) explicar cuál sería el proceso a seguir para realizar una evaluación en base a la aplicación para la cual fue desarrollado el sistema; 3) las condiciones de prueba y los resultados esperados.

d) Hoja de especificaciones del sistema

De manera breve una hoja de especificaciones debería proporcionar los requerimientos mínimos necesarios para la instalación del sistema entre otros, serian dos aspectos generales a proveer, el aspecto mecánico, el cual dictaría los espacios necesario para la instalación física del sistema y sus componentes necesarios tales como; una computadora, la fuente de alimentación de voltaje y corriente directa entre otras; y el aspecto electrónico/eléctrico del sistema que englobaría la alimentación de los dispositivos, los requerimientos del sistema de computadora, y las condiciones de temperatura y luz ambiental a la que puede estar expuesta durante la ejecución del sistema.

3. Impactos y mejoras potenciales

El presente estudio comprende dos aspectos principales; el primero es el desarrollo de un fotogoniómetro como herramienta para realizar una prueba fotométrica y el segundo es la aplicación de dicha herramienta como innovación al proceso de evaluación de calidad de los reflectores para su ensamble en la luminaria. Sin embargo, en lo que refiere a los impactos y beneficios esperados con la integración del fotogoniómetro en la empresa Dialight, se incluyen las tres aplicaciones mencionadas a lo largo de la presente investigación, siendo la primera el objetivo del presente estudio y las otras dos los proyectos futuros planteados en los apartados anteriores.

a) Evaluación de los reflectores previa al proceso de ensamble

- Elimina en un 100% el tiempo añadido al proceso de ensamble por retrabajos, lo cual fue calculado como 40 minutos por luminaria
- Aumento en la eficiencia del proceso de ensamble al garantizar un rendimiento del 100% en la prueba óptica
- Aumento en la productividad de la línea de producción al disminuir la cantidad de gente añadida previamente por los retrabajos (cantidad estimada de 3 personas)

b) Evaluación de los reflectores como parte su proceso de fabricación

- Mejora en los controles de calidad con un nivel de confianza de hasta 100%
- Reducción de scrap al 0%, para lo cual se estima un total de \$3,000 USD anuales
- Elimina el 100% de quejas y retornos de cliente, implicando los costos de análisis, investigación y transporte del material, entre otros gastos que se incluyen en el desarrollo del seguimiento necesario a partir de una queja de cliente

c) Uso del fotogoniómetro para la realización de la prueba óptica del producto terminado

- Aumenta la eficiencia del proceso de prueba óptica mediante la disminución del tiempo de ciclo de prueba
- Disminuye la cantidad de equipo requerido, descartando 5 detectores fotométricos y 3 fotómetros, entre otros material de instrumentación
- Liberación de espacio por la infraestructura del túnel óptico, siendo un espacio de aproximadamente 30m²

De manera general, la integración de la herramienta desarrollada mediante alguna o todas las aplicaciones presentadas, tendrá impacto en diversos aspectos de la empresa los cuales incluyen; tiempo de entrega a clientes, costo por unidad, productividad y eficiencia de la operación y utilización del espacio de producción. Todo esto presentara de menara positiva impactos financieros y mejorara la competitividad de la planta de manufactura.

Literatura citada

- (s.f.). Obtenido de <https://www.ecured.cu/Automatizaci%C3%B3n>
- (1988). En T. G. Mingot, *Pequeño Larousse de Ciencias y Técnicas* (pág. 528). Editorial Científico-Técnica.
- Arias-Cuellar, A., Ealo-Cuello, J. L., & Caicedo, E. (2007). *diseño, construcción y calibración de un fotogoniómetro para la empresa colombiana de luminarias Roy Alpha S.A.* Cali, Colombia: Cali: Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle.
- Carreón, J. C. (2004). *Manual de instalaciones de Alumbrado y Fotometría*. Mexico D.F.: Editorial Limusa S.A. de C.V.
- Claus Grupen, I. B. (2012). *Handbook of Particle Detection and Imaging*. Springer.
- Currea, G. B. (2005). *Ingeniería Económica*. Bogotá: Fondo Educativo Panamericano.
- Curso on-line de iluminación*. (s.f.). Obtenido de <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-luminarias-componentes.php>
- Dereniak, E., & Crowe, D. (1984). *Optical radiation detectors*. United States .
- Dialight. (3 de 11 de 2013). 8851856004800X. New Jersey, USA: Dialight.
- Estrada-Hernández, A., González-Galva, L. P., & Matamoros-García, C. H. (2008). *Mediciones en LEDs de Alta Intensidad*. Santiago de Querétaro: Centro Nacional de Metrología.
- FAA. (2016). Specification for Obstruction Lighting Equipment. *Ac No: 150/5345-43H*. U.S.
- FAA. (2018). Obstruction Marking and Lighting. *AC 70/7460-1L*. US.
- Fernandez, J. (2008). *Dispositivo Medidor de Aceleracion*. Sevilla.
- Flash Technology. (2018). Obtenido de www.flashtechology.com: <https://www.flashtechology.com/faa-lighting-requirements/>
- Flores, H. G. (2019). Estrena INAOE Laboratorio de Iluminación y Eficiencia Energética. (D. P. González, Entrevistador)
- Genes, P. d. (1999). *Superconductivity of Metals and Alloys*. Perseus Books.
- González, E. (2015). *Desarrollo de Sistema Automatizado para Control y Alarmas de Luces de Obstrucción en Torres de Telecomunicaciones*. Cataluña: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Hoyos, J. C., & Barreto, J. A. (2013). *Diseño y Desarrollo de un Goniómetro Basado en Sensores Cinemáticos con Comunicación Inalambrica en Tiempo Real*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Ledbox News. (2019). *Ledbox News*. Obtenido de <https://blog.ledbox.es/informacion-led/luminarias-led-de-alta-calidad-elementos-fundamentales>
- Lozada, J. C., Zárate, I. R., & Carbajal, M. O. (2008). *Computadoras de Bolsillo como una Alternativa para el Control de Servomotores en Robótica*. Mexico, Mexico.

- Martínez, F. R., & Chávez, G. H. (2010). *Administración de proyectos - Guía para el aprendizaje*. México: Pearson Educación.
- Mayeya, E. M. (2013). *Guía de elaboración de curvas fotométricas para iluminarios LED mediante métodos alternos*. Estado de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- NeoAttack. (2019). *NeoAttack*. Obtenido de <https://neoattack.com/neowiki/interfaz-grafica-de-usuario/>
- Nordlöf, J., & Lagusson, P. (20 de Mayo de 2015). Plataforma Autoajutable. Estocolmo, Suecia.
- Ortiz, M. C. (2014). *La Tecnología LED*. I.E.S. Castro Alobre.
- Pozo, D. (2010). Diseño y Construcción de una Plataforma Didáctica para medir Angulos de Inclinacion usando sensores Inerciales como Acelerometro y Giroscopio. Quito.
- Puertas, O. G. (2015). *Fabricación de placas de circuito impreso con*. Valladolid: UNIVERSIDAD DE VALLADOLID.
- Quilique, M. J. (14 de 10 de 2016). Obtenido de Entorno Empresarial: <https://entornove.weebly.com/blog/goniometria-la-medicion-de-los-angulos>
- Reeves, E. A. (1978). *Vademécum de Electricidad*. Loreto: Reverté.
- Rogalski, A. (2010). *Infrared Detectors*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (9 de Enero de 1995). PROYECTO de Norma Oficial Mexicana NOM-015-SCT3-1995, Que regula el señalamiento visual y luminoso de objetos. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 14-24.
- Silva, D. I. (19 de Julio de 2018). Programa de Simulación del Goniómetro de Espejo del Laboratorio de Fotometría y Control de Calidad. Valparaíso: Pontificia universidad católica de Valparaíso.
- TINOCO, M. P. (2013). *PROPUESTA DE UN LABORATORIO PARA PRUEBAS FOTOMÉTRICAS A LUMINARIOS LED*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería.
- Torres, J. D., Rodríguez, W. F., & Franco, H. A. (2014). *Diseño y Construcción de un Fotogoniómetro para el Laboratorio de Iluminación de la Universidad Distrital, Sede Tecnológica*. Bogotá: Revista Tecnura, Edición especial.
- Torres, J. D., Rodríguez, W. F., & Franco, H. A. (2014). *Diseño y Construcción de un Fotogoniómetro para el Laboratorio de Iluminación de la Universidad Distrital, Sede Tecnológica*. Bogotá: Revista Tecnura, Edición especial.
- XAL GmbH. (May de 2018). XAL. Obtenido de <https://www.xal.com/es/conocimientos/curva-de-distribucion-de-intensidad-luminosa/>