# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA** DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

# "SISTEMA DE CONTROL, ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS MEDIANTE LABVIEW PARA UN GONIOFOTÓMETRO"

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

# MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

# RODOLFO IBAÑEZ PAYÁN

DIRECTOR DE LA TESIS: DR. LUIS FFRANCISCO CORRAL MARTÍNEZ

CO-DIRECTOR DE LA TESIS: DR. ISMAEL ARTURO GARDUÑO WILCHES









CHIHUAHUA, CHIH., MAYO 2019





Instituto Tecnológico de Chihuahua

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Chihuahua, Chih. 13 de mayo de 2019

#### C. RODOLFO IBAÑEZ PAYÁN PRESENTE

Por este conducto le comunico que a propuesta del Jurado de Examen, la División de Estudios de Posgrado e Investigación ha concedido autorización para la impresión de su tesis para obtener el grado de en Ciencias en Ingeniería Electrónica, cuyo título es:

"Sistema de control, adquisición y procesamiento de datos mediante LabVIEW para un goniofotómetro"

La tesis presenta el siguiente contenido de capítulos:

I Antecedentes II Marco Teórico III Sistema de Control IV Sistema de adquisición de datos V Sistema de procesamiento de datos VI Resultados VII Conclusiones y trabajo futuro

**ATENTAMENTE** Excelencia en Educación Tecnológica<sub>®</sub>



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA

MTRO. LUIS CARDONA CHACÓN JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Ave Tecnológico No. 2909 Col. 10 de Mayo C.P. 31310, Chihuahua, Chih. México Tel. 01 (614) 201 2000,(614)413 5187, Ext. 2150 e-mail: dir\_chihuahua@tecnm.mx www.tecnm.mx | www.itchihuahua.edu.mx







Instituto Tecnológico de Chihuahua

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Chihuahua, Chih. 13 de mayo de 2019

#### MTRO. LUIS CARDONA CHACÓN JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN PRESENTE

Por medio de la presente notificamos a usted que en cumplimiento de los requerimientos para la obtención del grado de en Ciencias en Ingeniería Electrónica, el documento de tesis del C. RODOLFO IBAÑEZ PAYÁN, ha sido aprobado y aceptado para su impresión. El título de la tesis es:

"Sistema de control, adquisición y procesamiento de datos mediante LabVIEW para un goniofotómetro"

Por lo que proponemos, le sea concedida la autorización de impresión correspondiente.

Agradeciendo la atención a la presente, quedamos de usted:

ATENTAMENTE Excelencia en Educación Tecnológica»

DR. LUIS FRANCISCO CORRAL MARTÍNEZ DIRECTOR DE TESIS

MTRO. ISMAEL ARTURO GARDUÑO WILCHES MIEMBRO DEL JURADO DE EXAMEN

DR. MARCELINO ANGUIANO MORALES

MTRO. RAFAEL SANDOVAL RODRÍGUEZ MIEMBRO DEL JURADO DE EXAMEN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA



Ave Techológico No. 2969 Col. 10 de Mayo C.P. 31310, Chihuahua, Chih. Mezico Tel. 01 (614) 201 2000,(614)413 5187. Ext. 2150 e-mail. dir\_chihuahua/stechmorr.z www.techm.mx | www.itchihuahua.edu.mx







Instituto Tecnológico de Chihuahua

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

### CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de Chihuahua el día 23 de mayo de 2019, el que suscribe C. RODOLFO IBAÑEZ PAYÁN de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, con número de control G17060618, adscrito a la DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN, del Instituto Tecnológico de Chihuahua, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Luis Francisco Corral Martínez y cede los derechos del trabajo titulado "Sistema de control, adquisición y procesamiento de datos mediante LabVIEW para un goniofotómetro", al Tecnológico Nacional de México y/o Instituto Tecnológico de Chihuahua para su difusión, divulgación, transmisión, reproducción, así como su digitalización con fines académicos y de investigación.







Dra. María Elena Álvarez-Buylla Roces Director de CONACYT.

#### Presente.

Por este conducto aprovecho la ocasión para saludarlo e informarle que a la fecha he obtenido el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua. Motivo por el cual agradezco todo el apoyo brindado por esta Institución que usted representa, el otorgamiento de esta beca permitió dedicarme de tiempo completo a la realización de mis estudios de Posgrado y de esta manera lograr el cumplimiento del objetivo principal del convenio establecido.

Sin otro particular por el momento, me es grato quedar de usted como su seguro servidor, no sin antes reiterar mi agradecimiento. Muchas Gracias.

Atentamente

Rodolfo Ibañez Payán

Exbecario CONACYT

c.c.p. M.F. Luis Cardona Chacón

Jefe de la División de Posgrado e Investigación

#### AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios quien me dio la capacidad, la fortaleza y la perseverancia para poder llevar a feliz término este trabajo de tesis realizado por un periodo de más de dos años, en donde hubo momentos de desesperación e incertidumbre, donde no sabía si tendría la capacidad necesaria para realizar este proyecto. Pero gracias a Él puedo ver concluido de manera exitosa el desarrollo de mi proyecto.

Agradezco a mi director de tesis el Dr. Luis Francisco Corral por ayudarme a lo largo de mi trabajo de tesis, por esclarecer todas mis dudas relacionadas con el desarrollo de este proyecto. A sí mismo a mi co-director de tesis el Dr. Ismael Garduño quien por causas inesperadas tuvo que salir de la institución, pero aun así en todo momento estuvo al pendiente de los avances del desarrollo de este proyecto.

Agradezco a los demás miembros de mi comité como son el Dr. Marcelino Anguiano y el Dr. Rafael Sandoval por sus consejos y aportaciones, por su disposición que siempre mostraron para ayudarme y orientarme. Gracias a sus conocimientos y ayuda se ha logrado la conclusión de este trabajo de tesis.

Agradezco a la maestra Alma Corral por su compromiso como coordinadora de la maestría en ciencias en ingeniería electrónica. Por su ayuda en todos los procesos y papeleo, por estar al pendiente de cada uno de nosotros.

Agradezco a mi familia por apoyarme y creer en mí, por estar siempre conmigo en cada una de las etapas de mi vida, por instarme a nuca renunciar a mis sueños y siempre luchar por ser una persona de bien, por inculcarme los valores y bases necesarias para poder alcanzar el éxito en mi vida profesional.

vi

#### RESUMEN

#### SISTEMA DE CONTROL, ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS MEDIANTE LABVIEW PARA UN GONIOGOTOMETRO

Ing. Rodolfo Ibañez Payan Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua Chihuahua, Chih., 2019 Director de Tesis: Dr. Luis Francisco Coral Martínez Co-Director de Tesis: Dr. Ismael Arturo Garduño Wilches

Uno de los principales equipos destinados al diseño y caracterización de luminarias es el goniofotómetro, ya que nos permite conocer la distribución del flujo luminoso alrededor de una fuente de iluminación. Estos equipos tienen un costo muy elevado en el mercado, y sus dimensiones no son adecuadas para el área del laboratorio de sistemas de iluminación del Instituto Tecnológico de Chihuahua.

Este proyecto de tesis se realizó con el objetivo de desarrollar un sistema de control, adquisición y procesamiento de datos mediante LabVIEW para un goniofotómetro del cual se tenía el diseño óptico y mecánico. En este trabajo de tesis se describen cada una de las etapas del desarrollo de este sistema, los componentes de hardware y las diferentes partes del software desarrollado en LabVIEW para el cual se utilizaron la interfaz de LabVIEW para Arduino y los drivers para el manejo del multímetro.

Como resultados de las pruebas realizadas con el goniofotómetro se obtiene la matriz de intensidades en un archivo de excel y un archivo fotométrico con formato IES, el cual se encuentra bajo la norma ANSI/IESNA LM-63-02 y que puede ser interpretado por una gran variedad de software de iluminación existente en el mercado. Las resoluciones en la que el goniofotómetro puede reportar resultados son de 0.45° en el eje gama y 0.9° en el eje C, pudiendo mejorarse con una reconfiguración del hardware a cambio de incrementar la duración de la prueba.

vii

### CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABLAS	xiv
INTRODUCCIÓN	.xv
CAPÍTULO I	1
ANTECEDENTES	1
1.1 Antecedentes del proyecto	1
1.2 Trabajos previos	2
1.3 Objetivo	5
1.4 Justificación	6
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO	8
2.1 Radiometría y Fotometría	8
2.1.1 Magnitudes radiométricas	11
2.2 Luminotecnia	13
2.2.1 Magnitudes fotométricas	13
2.2.2 Conceptos	15
2.3 Luminarias y su clasificación	17
2.3.1 Lámpara	17
2.3.2. Luminaria	17
2.4 Equipo utilizado para caracterización de luminarias	20
2.4.1 Analizador de potencias	21
2.4.2 Esfera integradora	21
2.4.3 Goniofotómetro	23
2.5 Representaciones de la distribución luminosa	23
2.5.1 Curvas de distribución luminosa	24
2.5.2 Matriz de intensidades	25
2.5.3 Diagramas isocandela	26
2.5.4 Curvas Isolux	28

CAPÍTULO III	. 30
SISTEMA DE CONTROL	. 30
3.1 Estructura mecánica	. 30
3.1.1 Eje de la base de la luminaria (coordenada C)	. 32
3.1.2 Eje del marco giratorio (Coordenada $\gamma$ )	. 33
3.2 Hardware de control	. 35
3.2.2 Eje de la base de la luminaria	. 37
3.2.3 Eje del marco giratorio	. 38
3.3 Software de control	. 40
3.3.1 LabVIEW	. 40
3.3.2 LIFA (LabVIEW Interfaz For Arduino)	. 41
3.3.3 Rutina de inicio	. 42
3.3.5 Posición Inicial	. 45
3.3.6 Inicio	. 45
CAPÍTULO IV	. 48
SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS	. 48
4.1 Hardware	. 48
4.1.1 Sensor fotométrico LI-210R	. 48
4.1.2 Multímetro digital Keysight 3458A	. 52
4.2 Software de adquisición de datos	. 55
4.2.1 Drivers 3458 para LabVIEW	. 56
4.2.2 Muestreo de intensidades	. 56
4.2.3 Generación de reporte en excel	. 59
CAPÍTULO V	. 61
SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS	. 61
5.1 Formato de Archivo .IES	. 61
5.2 Rutina para obtener resolución del eje gama	. 66
5.3 VI para generación de archivo IES	. 69
5.4 Visor de archivos IES	.71
CAPÍTULO VI	. 74
RESULTADOS	. 74

6.1 Resultados	75
CAPÍTULO VII	80
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	
7.1 Conclusiones	
7.2 Recomendaciones y trabajo futuro	81
REFERENCIAS	
ANEXOS	
ANEXO 1	
CARACTERISTICAS TARJETA ARDUINO MEGA 2560	
ANEXO 2	
TABLAS DE DATOS DE FUENTES DE ALIMENTACION	
ANEXO 3	
TABLAS DE DATOS DE LOS CONTROLADORES	
ANEXO 4	
DESCRIPCION DE LIBRERÍA LIFA	
ANEXO 5	
DESCRIPCION DE DRIVERS PARA MULTIMETRO 3458A	

### LISTA DE FIGURAS

# CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Figura 2.1 Regiones del espectro electromagnético.	9
Figura 2.2 Curva de sensibilidad del ojo	11
Figura 2.3 Clasificación CIE según la distribución de la luz.	
Figura 2.4 Luminaria con infinitos planos de simetría	19
Figura 2.5 Luminaria con dos planos de simetría	19
Figura 2.6 Luminaria con un solo plano de simetría	
Figura 2.7 Esfera integradora	
Figura 2.8 Goniofotómetro tipo C a) Fotosensor móvil b) Espejo móvil	24
Figura 2.9 Curvas de distribución luminosa	25
Figura 2.10 Matriz de intensidades	
Figura 2.11 Curvas isocandela para proyectores	27
Figura 2.12 Curvas isocandela para alumbrado público	27
Figura 2.13 Curvas Isolux	

### CAPÍTULO III SISTEMA DE CONTROL

Figura 3.1 Coordenadas goniofotómetro tipo C	. 30
Figura 3.2 Estructura mecánica goniofotómetro tipo C	. 31
Figura 3.3 Base de la luminaria	. 32
Figura 3.4 Poleas y banda del eje principal	. 33
Figura 3.5 Marco giratotio y balero	. 34
Figura 3.6 Abrazadera y ejes de soporte del marco giratorio.	. 34
Figura 3.7 Soporte de espejo principal	. 35
Figura 3.8 Soporte de espejo secundario	. 35
Figura 3.9 Tarjeta arduino Mega 2560	. 36
Figura 3.10 Motor a pasos 57BYGH115-003B	. 38
Figura 3.11 Motor a pasos 85BYGH450C-012	. 40
Figura 3.12 Panel frontal del software de control.	. 42

Figura 3.13 Código fuente de la rutina de inicio	. 43
Figura 3.14 Función "Stepper ToGo" y algoritmo de control de "Stop."	. 44
Figura 3.15 Rutina de finalización de la comunicación	. 44
Figura 3.16 Código "Posición Inicial"	. 45
Figura 3.17 Código fuente secuencia de motores	. 47

# CAPÍTULO IV SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS

Figura 4.1 Sensor fotométrico LI-210R	. 49
Figura 4.2 Sensor fotométrico LI-210R-BL	. 49
Figura 4.3 Código de colores del sensor fotométrico.	. 50
Figura 4.4 Certificado de calibración	. 50
Figura 4.5 Respuesta cosenoidal del sensor LI-210R	. 51
Figura 4.6 Respuesta espectral del sensor LI-210R	. 51
Figura 4.7 Cable GPIB-USB-HS	. 51
Figura 4.8 Multímetro digital Keysight 3458A	. 52
Figura 4.9 Conexión para medición de corriente	. 52
Figura 4.10 Jerarquía de disparos	. 54
Figura 4.11 Drivers 3458 para LabVIEW	. 55
Figura 4.12 Diagrama a bloques software de adquisición de datos	. 57
Figura 4.13 Conversión de corriente a luxes	. 58
Figura 4.14 Obtención de la matriz de intensidades.	. 58
Figura 4.15 Generación de reporte en excel.	. 59

# CAPÍTULO V SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Figura 5.1 Formulas para cálculo de posición del marco giratorio	. 66
Figura 5.2 Rutina para resolución del eje gama	. 67
Figura 5.3 Código para convertir valores de ángulos a texto	. 68
Figura 5.4 Panel de control para la creación de archivo IES	. 70
Figura 5.5 Código para generar archivo IES	. 70
Figura 5.6 Visor de archivos IES	. 72
Figura 5.7 Ventana de render	. 73

## CAPÍTULO VI RESULTADOS

Figura 6.1 Foco clásico OSRAM 125 V 100 W	.75
Figura 6.2 Diagrama polar foco OSRAM 100 W	.76
Figura 6.3 Render foco OSRAM 100 W	.76
Figura 6.4 Foco OSRAM 100 W con barrera óptica	. 77
Figura 6.5 Diagrama polar foco OSRAM 100 W con barrera óptica	. 77
Figura 6.6 Render foco OSRAM 100 W con barrera óptica	. 78
Figura 6.7 Foco led ADIR 5 W	. 78
Figura 6.8 Diagrama polar foco led ADIR 5 W	. 79
Figura 6.9 Render foco led ADIR 5 W.	. 79

### LISTA DE TABLAS

## CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Tabla 2.1 Regiones del espectro electromagnético	10
CAPÍTULO IV SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	
Tabla 4.1 Rangos de corriente directa.	53

#### INTRODUCCIÓN

En la actualidad los sistemas de iluminación juegan un papel muy importante en nuestra sociedad, ya que estos son necesarios en prácticamente cualquier lugar donde se realice alguna actividad, ya sea en la escuela, el trabajo o el hogar. La luz es un elemento esencial para poder entender el entorno en el que vivimos, ya que la mayor parte de la información que recibimos por medio de los sentidos, la obtenemos a través de la vista, en forma de radiación visible. Es por esto la gran importancia de contar con sistemas de iluminación eficientes, que cumplan con los estándares establecidos por las normas oficiales tanto mexicanas como internacionales, los cuales aseguran su correcto funcionamiento, calidad de iluminación y confort visual para las personas que están expuestas a ellos [1] - [3].

El diseño y desarrollo de sistemas de iluminación eficientes para las diferentes aplicaciones, depende principalmente de la habilidad de medir y comparar las características lumínicas de una luminaria contra los estándares establecidos en las normas ISO o las NOM. Las normas NOM (Norma Oficial Mexicana) son regulaciones obligatorias, las cuales tienen como principal objetivo prevenir los riesgos de la salud, la vida y el patrimonio. Las normas ISO son establecidas por la organización internacional de normalización, es un conjunto de normas sobre calidad y gestión de calidad que se pueden aplicar en cualquier tipo de organización o actividad orientada a la producción de bienes o servicios [4].

El tema de la calidad, en la actualidad se ha extendido a cada uno de los diferentes sectores productivos, de los cuales la industria de la iluminación artificial no está exenta [5]. La principal meta del diseño de fuentes de iluminación artificiales es alcanzar la mejor calidad de iluminación, esto se refiere a tener el nivel adecuado de intensidad de iluminación así como una buena capacidad de reproducción cromática (reproducir correctamente los colores reales), todo esto con un mínimo de energía utilizada.

xv

Cuando una fracción de la luz proveniente de fuentes artificiales no es aprovechada por tener intensidades, direcciones, rangos espectrales u horarios innecesarios se denomina contaminación luminosa. Un buen diseño está enfocado a disminuir este tipo de contaminación producida por los sistemas de iluminación. Toda esta contaminación representa un gasto significativo debido a que es energía eléctrica consumida de manera inútil, la cual es el resultado de un mal diseño o un diseño no optimizado de los sistemas de iluminación [6]. Es por esto la gran necesidad de la caracterización de luminarias para de esta manera poder tener un óptimo y eficiente consumo de la energía eléctrica y evitar cualquier tipo de contaminación luminosa.

Uno de los principales motivos por el cual se realiza este proyecto es debido a la necesidad del laboratorio de sistemas de iluminación del área de posgrado del Instituto Tecnológico de Chihuahua de contar con el equipo necesario para la correcta caracterización de luminarias y así poder certificarse de manera oficial para poder llevar a cabo este tipo de pruebas requeridas por aquellas empresas de la industria privada dedicadas al diseño y fabricación de sistemas de iluminación artificial.

El laboratorio actualmente cuenta con el analizador de potencias y la esfera integradora, sin embargo es necesario contar con un equipo de medición de distribución de la intensidad luminosa como lo es el goniofotómetro, sin embargo después de analizar las opciones de presupuesto y espacio del laboratorio de iluminación, se determinó que los goniofotómetros comerciales tienen un costo muy elevado en el mercado, además de requerir una amplia cantidad de espacio para su instalación. Por lo cual se determinó llevar a cabo el diseño y construcción de un goniofotómetro el cual requiriera una menor área de trabajo y así mismo poder fabricarlo a un menor costo.

El contenido de este proyecto de tesis denominado "Sistema de control, adquisición y procesamiento de datos mediante LabVIEW para un goniofotómetro" se encuentra dividido en seis capítulos, de los cuales se hace una breve descripción a continuación.

xvi

En el Capítulo I se presenta la parte de los antecedentes del proyecto, trabajos previos realizados, los cuales se tomaron como base para el desarrollo de esta tesis, se presentan también los objetivos del proyecto y la justificación.

En el Capítulo II se presenta el marco teórico el cual contiene información y conceptos de radiometría y fotometría, luminotecnia, tipos de gráficos, clasificación de luminarias de acuerdo a la distribución del flujo luminoso, etc. Lo cual es de gran importancia para la comprensión y entendimiento del desarrollo de cada una de las etapas del proyecto, desde la parte de control hasta el procesamiento de datos.

En el capítulo III se presenta la parte del desarrollo del sistema de control de los ejes del goniofotómetro. Se describen las principales características de los componentes del sistema de control, como son la tablilla arduino, las fuentes de poder, los drivers para el control de los motores y los motores a pasos. Así mismo se describe el desarrollo del software de control desarrollado en LabVIEW.

En el capítulo IV se presenta todo el desarrollo de la parte de adquisición de datos del goniofotómetro. Se describen los principales componentes del sistema de adquisición como lo son el sensor fotométrico LI-210R, y el multímetro digital Keysight 3458A. Por último se describen los principales VI's utilizados en LabVIEW y el desarrollo del software de adquisición de datos.

En el capítulo V se presenta la parte del desarrollo del software de procesamiento de datos en donde se introduce el concepto de archivo IES, que es, para que se usa, sus principales características, el software desarrollado para la creación de este archivo, software existente en el mercado para la interpretación de este tipo de archivos y el software utilizado para este proyecto.

En el capítulo VI se presentan se presenta la parte de los resultados finales obtenidos, como lo son las gráficas de distribución luminosa y la función de render para la visualización de la distribución del flujo luminoso.

En el capítulo VII se presentan las conclusiones del proyecto, algunas recomendaciones y trabajo futuro necesario para la optimización del equipo.

xvii

# CAPÍTULO I ANTECEDENTES

En este capítulo se presentan los antecedentes de éste proyecto, el motivo del desarrollo del mismo, trabajos relacionados al diseño y construcción de goniofotómetros desarrollados alrededor del mundo y finalmente los objetivos y justificación para el desarrollo de este proyecto.

#### 1.1 Antecedentes del proyecto

El desarrollo de este proyecto es la continuación del iniciado por el M.C. Manuel Morales Barraza "Desarrollo de un goniofotómetro para análisis de sistemas de iluminación [7], el cual surge de la necesidad de equipar el laboratorio de iluminación del área de posgrado del ITCH, que como ya se ha mencionado anteriormente actualmente cuenta con una esfera integradora y un analizador de potencias, requiriendo solamente un equipo capaz de medir la distribución del flujo e intensidad luminosa alrededor de una luminaria, dicho esquipo es el fotogoniómetro.

Debido a las necesidades de espacio y presupuesto del laboratorio, se opta por el diseño de un fotogoniómetro tipo C, el cual pueda ser adaptado a un área determinada del laboratorio y llevar a cabo su construcción a un menor costo.

El diseño de un equipo de estas características incluye varias etapas. El proyecto "Desarrollo de un goniofotómetro para análisis de sistemas de iluminación" desarrollado previamente cubre únicamente la parte del diseño mecánico y óptico del goniofotómetro, que va desde la selección del tipo de goniofotómetro (A, B o C) y el diseño de la estructura mecánica hasta la distribución de cada uno de los componentes ópticos, todo esto con el fin de optimizar el espacio utilizado por el equipo en el laboratorio [7].

Para el funcionamiento completo del goniofotómetro es necesario el diseño de un sistema de control, adquisición y procesamiento de datos.

Dicho diseño debe incluir la parte del control de los motores a pasos seleccionados en la parte de diseño mecánico del proyecto realizado por el ingeniero Manuel Morales [7]. Así mismo se requiere un sistema para controlar el funcionamiento y adquirir la señal de corriente del fotosensor, el cual también ya ha sido seleccionado en la parte del diseño óptico.

Esta parte debe incluir la coordinación de los motores a pasos con el sensor fotométrico para llevar a cabo el muestreo de las intensidades en cada uno de los ángulos de posicionamiento del espejo y la luminaria, para de esta manera completar una esfera virtual alrededor de la misma.

Estas señales tomadas por el sensor deben ser acondicionadas y convertidas a señales digitales para procesar dicha información y así poder desplegarla de manera gráfica en una pantalla y el usuario sea capaz de obtener la información requerida.

#### 1.2 Trabajos previos

La importancia de un goniofotómetro es fundamental para la correcta caracterización de luminarias, ya que como es sabido de todos, la calidad es un aspecto muy importante en la fabricación de cualquier elemento, tanto así que se ha extendido a lo largo de todos los sectores de la industria [8].

La industria de la iluminación artificial de igual manera debe cumplir con ciertas normas de calidad las cuales exigen el uso de un goniofotómetro, el cual reproduce la metodología propuesta en las normas de la CIE (Commission Internationale de L'Éclairage) para la caracterización de luminarias [8].

Debido a la gran importancia del uso del goniofotómetro para la caracterización de luminarias, y a su alto costo en el mercado, se han realizado varios proyectos alrededor del mundo enfocados a la fabricación y calibración de goniofotómetros, de los cuales, la mayoría incluyen en su diseño tres aspectos principales, los cuales son: Parte mecánica, parte óptica y parte electrónica o de control y adquisición de datos [9].

A continuación se mencionan algunos de los trabajos previos realizados que incluyen y mencionan las metodologías de diseño de sistemas de control y adquisición de datos utilizadas:

Cortés y Rodríguez [9] presentan el desarrollo del diseño de un fotogoniómetro en el cual se toman en cuenta cuatro aspectos: Diseño mecánico, diseño fotométrico, diseño óptico y diseño electrónico. En la parte de diseño electrónico es donde se incluye la parte de adquisición de datos, control mecánico y sistema fotométrico. La base de dicho sistema es una tarjeta de desarrollo CY8CKIT030 PsoC 3. Dicha tarjeta se encarga del posicionamiento de los ejes del fotogoniómetro, así como enviar las señales al sensor para realizar las lecturas, registrarlas y se hace la calibración de un convertidor ADC en el cual se hace la adquisición de la señal del fotosensor para convertirla en una señal digital de 20 bits.

Muñoz y Gómez [10] de la universidad de Málaga España, hacen una breve descripción de su proyecto, en donde al igual que los demás proyectos de diseños de goniofotómetros se divide en parte mecánica, parte óptica y parte de control y adquisición de datos. Específicamente la parte de control y adquisición de datos la denominan "Electrónica de control" en donde se explica brevemente la forma en la que hacen el control de los motores, la cual es por medio de un DSP de 32 bits (Procesador Digital de Señales), el cual es básicamente un microprocesador que cuenta con un conjunto de instrucciones precargadas para procesar señales analógicas en tiempo real. Así mismo se explica también la parte del sistema de adquisición de datos, la cual consiste básicamente del sensor fotométrico, un amplificador y un conversor A/D de 12 bits.

Ghazali y Rahim [11] nos hablan acerca del procedimiento o metodología implementada para el desarrollo de un sistema de control y adquisición de datos para un goniofotómetro. La primera etapa del desarrollo del hardware de control consiste en el diseño de una tablilla PCB compuesta principalmente por un microcontrolador de Microchip PIC18F2455, así como componentes electrónicos básicos tales como: capacitores electrolíticos, diodos de potencia, MOSFETs, conector USB, resistencias

CAPÍTULO I

y puertos de salida de motor de pasos. Así mismo utilizan un fotosensor VT43N2 el cual es sensible al ancho de banda de la luz visible (400-700 nm). El sistema de basado en el microcontrolador realiza las tareas de movimiento de los motores de pasos y la obtención de la señal analógica del fotosensor en cada uno de los movimientos del motor, y realiza la conversión A/D de la señal obtenida enviándola a un ordenador por medio de un protocolo de comunicación RS232, dicho ordenador cuenta con un software desarrollado diseñado para procesar los datos recibidos y mostrarlos en una gráfica 3D.

Singh [12] habla acerca del diseño de un sistema de control para los motores que controlan el giro de los ejes de un goniofotómetro. Dicho diseño se basa en un lenguaje de programación grafico denominado LabVIEW, el Software desarrollado en este lenguaje de programación es conectado a un Driver montado en una tablilla PCB por medio de un puerto paralelo. La configuración de este sistema de control está diseñada para el manejo de cuatro motores de DC o para dos motores de pasos. En este artículo solo se incluye la parte de control de los ejes, sin embargo no se menciona ningún dato acerca de la parte de adquisición y procesamiento de datos.

Sametoglu [13] habla de la construcción de un goniofotómetro de dos ejes, en el cual la luminaria se mantiene fija en el centro del goniofotómetro y el sensor fotométrico realiza la exploración alrededor de la misma. El sistema de control está basado en dos servomotores y el software de control desarrollado en LabVIEW. El sistema de adquisición consiste en un sensor fotométrico Hamamatsu 1227-1010BQ con un área activa de 10 mm<sup>2</sup> en conjunto con un medidor de fotocorriente (I 1000 SD) el cual se conecta a la computadora mediante GPIB.

Arias [14] nos habla acerca de del diseño, construcción y calibración de un goniofotómetro tipo C de espejo móvil. Se concentra principalmente en la descripción del diseño mecánico, el cual consiste en una estructura mecánica empotrada al suelo. Sobre la estructura principal está sujeto el eje sobre el cual se apoya el brazo que sostiene y da movimiento al espejo reflector por medio de un sistema de poleas y un servomotor. Sin embargo no menciona información acerca del sistema de control y

adquisición de datos. Como resultados presenta unas graficas isolux y una gráfica de distribución luminosa obtenida con el equipo.

Como puede observarse en la parte de trabajos previos anteriormente descrita, la mayoría de los trabajos realizados alrededor del mundo en las diferentes universidades, relacionados a la parte de control y adquisición de datos de un goniofotómetro utilizan como principal elemento circuitos electrónicos basados en microcontroladores[10],[11]. Dichos microcontroladores combinados con los componentes electrónicos necesarios y ensamblados en una tablilla PCB son utilizados para llevar a cabo el control de posicionamiento de los motores que controlan los ejes del fotogoniómetro y coordinar este movimiento con el funcionamiento del fotosensor, para así poder llevar a cabo el muestreo en los diferentes puntos alrededor de la luminaria [10].

Sin embargo para llevar a cabo el desarrollo de este sistema de control es necesario invertir tiempo y dinero en el diseño y fabricación de este tipo de circuitos electrónicos, así como también desarrollar el software necesario para el microprocesador [11], el cual la mayoría de las veces se realiza en lenguajes de programación de bajo nivel que son complicados y en caso de requerir modificaciones es necesario volver a programar el circuito, o en caso de ser programado en un lenguaje de alto nivel se requiere el uso de compiladores para poder convertir el programa original a lenguaje máquina que el microprocesador pueda ejecutar.

#### 1.3 Objetivo

La idea principal de este proyecto es desarrollar un sistema de control, adquisición y procesamiento de datos basado en LabVIEW, dicho lenguaje de programación está basado en un paradigma de flujo de datos con una interfaz gráfica, la cual cuenta con un panel frontal en el que se muestran los controles necesarios para llevar a cabo el posicionamiento de los ejes del goniofotómetro, así como el software necesario para el control del sensor fotométrico, el cual por medio de un multímetro Keysight 3458A y un cable GPIB envía la información a la computadora en donde se

hace el procesamiento de los datos y posteriormente se genera un archivo fotométrico con formato IES, el cual puede ser interpretado y analizado por cualquier software de diseño de iluminación.

#### 1.4 Justificación

El goniofotómetro es uno de los tres instrumentos principales utilizados en la caracterización de luminarias, actualmente en el mercado existe una gran cantidad de goniofotómetros comerciales, sin embargo algunas de las principales desventajas de este tipo de equipos es su costo elevado y el hecho de que requieren una área grande para su instalación. Debido a estas desventajas y a la necesidad de contar con este equipo en el laboratorio de iluminación, se optó por la fabricación de un goniofotómetro a un menor costo y así mismo se llevó a cabo el rediseño óptico y mecánico para poder adecuarlo a un área determinada del laboratorio.

Sin embargo en la parte de control, adquisición y procesamiento de datos, los equipos actualmente existentes están basados principalmente en el uso de microprocesadores, microcontroladores y una gran cantidad de componentes electrónicos auxiliares. Dicha configuración, hace que el sistema final de control, adquisición y procesamiento de datos sea más voluminoso y complejo de utilizar por parte del usuario, ya que generalmente el sistema está dividido, es decir no se maneja como un conjunto, sino que el control, la adquisición y procesamiento de datos son sistemas separados y basados en diferentes componentes electrónicos.

El sistema de control, adquisición y procesamiento de datos de este proyecto, se maneja como un sistema completo basado en el lenguaje de programación gráfico de LabVIEW en conjunto con una tarjeta arduino mega, el cual cuenta con una interfaz virtual por medio de la computadora, lo cual hace mucho más amigable la interacción del usuario con el equipo, ya que se tiene acceso al control de los ejes del goniofotómetro, así como un acceso en tiempo real de los datos y graficas de distribución de intensidad luminosa obtenidas, todo esto por medio de una sola interfaz de usuario.

Otra de las grandes ventajas con la que cuenta este equipo en comparación con los equipos comerciales existentes es su bajo costo y menor volumen. La mayor parte de su funcionamiento está basado en el software desarrollado y un mínimo de hardware electrónico requerido para la adquisición de datos, lo cual disminuye el gasto económico en compra de material electrónico, así como el espacio requerido para su instalación.

Además de la optimización en costo, se tiene la ventaja de poder realizar los cambios necesarios al software en tiempo real, sin tener que estar llevando a cabo la programación de circuitos electrónicos cada vez que se realiza algún cambio al programa, lo cual nos daría una gran ventaja al momento de llevar a cabo la depuración de errores. No se requiere ningún tipo de compilación, ya que la programación se realiza de manera gráfica y es ejecutada directamente por el ordenador, el cual manda las señales de control a través de la tarjeta arduino. Esto nos permite la optimización del tiempo invertido en el desarrollo del software.

Hasta este punto se han presentado los antecedentes, objetivos y justificación del proyecto. En el siguiente capítulo se describen cada uno de los conceptos teóricos que se estarán utilizando a lo largo del desarrollo de este proyecto, los cuales son la base para poder comprender los estándares de la industria en cuanto a diseño y caracterización de luminarias.

# CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan y describen ampliamente los principales conceptos y fundamentos teóricos que se estarán utilizando a lo largo de este trabajo, los cuales son necesarios para la comprensión de cada una de las actividades realizadas descritas en esta tesis para el desarrollo del software de control, adquisición y procesamiento de datos y la caracterización de sistemas de iluminación.

#### 2.1 Radiometría y Fotometría

La radiometría es la rama de la física constituida por un lenguaje (terminologías), relaciones matemáticas e instrumentos de medición empleados para estudiar y medir la propagación de la radiación electromagnética, incluyendo los efectos en tal radiación, tales como reflexión, refracción, absorción, transmisión y dispersión por sustancias en estado sólido, liquido o gaseoso. Su campo abarca todas las longitudes de onda del espectro electromagnético (frecuencias entre 3×10<sup>11</sup> y 3×10<sup>16</sup> Hz o longitudes de onda de entre 0,01 y 1000 micrómetros) [15].

Una parte de la radiometría está encargada del estudio de cómo es emitida, detectada y cuantificada la radiación electromagnética en términos de energía, así como también la manera en que ésta se distribuye a lo largo del espectro electromagnético. Para su estudio, el espectro electromagnético está seccionado en diferentes campos de interés, estas secciones están clasificadas de acuerdo a su longitud de onda  $\lambda$  o frecuencia v, como se muestra en la figura 2.1.

Dentro del espectro electromagnético se encuentra la parte de la radiación visible, es decir, la radiación electromagnética a la cual el ojo humano es sensible, esta radiación abarca un rango de longitudes de onda que va desde los 380 nm hasta los 780 nm [16]. Fuera de estos límites, el ojo no percibe ninguna clase de radiación.

Como se puede observar en la tabla 2.1 el rango visible para el ojo humano se encuentra localizado entre el infrarrojo en su parte inferior y el ultravioleta en su parte superior. Este rango específico (Rango visible) es estudiado por la fotometría, la cual es el área de la radiometría que se encarga de estudiar la radiación electromagnética que es capaz de estimular el sistema visual del ser humano.

El término "Luz" solamente debería ser aplicado a la radiación electromagnética que se encuentra dentro del rango visible del espectro. Basándonos en esta terminología, no existe la llamada "Luz ultravioleta" o "Luz infrarroja". Radiación fuera de los límites del espectro visible es radiación.



Figura 2.1 Regiones del espectro electromagnético.

La Comisión Internacional de Iluminación (*Commission internationale de l'éclairage*, CIE) ha estandarizado estos datos mostrados en la tabla 2.1, sin embargo, el rango espectral de la radiación visible no tiene límites precisos, debido a que estos límites varían de acuerdo a cada persona.

Nombre	Rango de longitudes de onda
UV-C	100 nm - 280 nm
UV-B	280 nm - 315 nm
UV-A	315 nm - 400 nm
Visible	360 nm - 400 nm hasta 760 nm - 800 nm
IR-A	780 nm - 1400 nm
IR-B	1.4 μm - 3.0 μm
IR-C	3.0 µm - 1.0 mm

Tabla 2.1 Regiones del espectro electromagnético.

Para entender mejor el término "fotometría", es necesario comprender como responde el ojo humano ante diferentes longitudes de onda del espectro visible.

Después de pasar a través de la córnea, el humor acuoso, el iris, el cristalino y el humor vítreo, la luz que entra al ojo es recibida por la retina la cual contiene dos clases de receptores: conos y bastones, los cuales a su vez tienen foto pigmentos que se encargan de absorber la energía luminosa y convertirla en señales electroquímicas, las cuales luego son transmitidas a las siguientes neuronas, el nervio óptico y finalmente al cerebro causando la sensación de vista.

Los conos son los responsables de poder ver los colores así como también de la visión diurna, la cual es llamada también visión fotopica. Los bastones son los encargados de la visión nocturna, cuando los niveles de iluminación que llegan al ojo son demasiado bajos, esta es llamada también visión escotópica.

La sensibilidad del ojo para las distintas longitudes de onda de la luz del mediodía soleado, suponiendo a todas las radiaciones luminosas de igual energía, se representa mediante una curva denominada "*Curva de sensibilidad del ojo*" o también conocida como curva V de lambda. La función que describe la sensibilidad del ojo V( $\lambda$ ) se denomina función de luminosidad o función de eficiencia luminosa.

Esta función varía dependiendo si el ojo se encuentra en condiciones de buena iluminación (Visión fotópica) o de mala iluminación (Visión escotópica) y tiene su máximo valor en 555 nm y 507 nm respectivamente como se muestra en la fig. 2.2.



Figura 2.2 Curva de sensibilidad del ojo.

#### 2.1.1 Magnitudes radiométricas

Este tipo de magnitudes miden el contenido de energía de la radiación. A estas se les adiciona el adjetivo "radiante" para distinguirlas de las magnitudes fotométricas y se les agrega el subíndice e.

#### Energía radiante

Es la cantidad de energía que se propaga sobre, a través de, o emerge de, una superficie especifica de un área dada en un periodo de tiempo. Su unidad de medida es el Joule [J] y es representada con el símbolo Q<sub>e</sub>, o Q [15].

#### Flujo radiante

Se define como la tasa de tiempo de flujo de energía radiante emitida, transferida o recibida, también es llamada potencia radiante. Su unidad de medida es el Watt [W] que es igual a 1 J/S. Se representa con el símbolo  $\Phi_{e,}$  o  $\Phi$  [15]. El flujo radiante se define mediante la siguiente ecuación:

$$\Phi = \frac{\mathrm{dQ}}{\mathrm{dt}} \tag{2.1}$$

#### Irradiancia

Es la densidad de área de flujo radiante, el flujo radiante por unidad de área en una superficie específica que incide, pasa a través de, o emerge de un punto de la superficie. La irradiancia que emerge de una superficie puede ser llamada exitancia y se simboliza con la letra *M*. La irradiancia que incide en una superficie se denomina incidencia. Se mide en Watt/m<sup>2</sup> y se representa con el símbolo *E*<sub>e</sub>, *o E* [15]. Se define por medio de la siguiente ecuación:

$$\mathsf{E} = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}S_{\mathrm{o}}} \tag{2.2}$$

#### Intensidad radiante

Es la densidad de ángulo solido de flujo radiante, el flujo radiante por unidad de ángulo sólido, incidente, que pasa a través de, o emerge de un punto en el espacio y se propaga en una dirección específica. Sus unidades son Watt por estereorradián [W/sr] y se representa con el símbolo  $I_e$ , I [15]. Se define por medio de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$
(2.3)

#### Radiancia

Está definida como la densidad de área y ángulo solido de flujo radiante, el flujo radiante por unidad de ángulo sólido y unidad de área proyectada perpendicular a la dirección de propagación [15]. Sus unidades son W/m<sup>2</sup>•sr y se representa con el símbolo *L<sub>e</sub>*, *o L*. Se define por medio de la siguiente ecuación:

$$L = \frac{d^2 \Phi}{d\Omega dS} = \frac{d^2 \Phi}{d\omega dS_0 COS\theta}$$
(2.4)

Donde  $ds = dS_0 COS \theta$  es el área proyectada con una dirección y ángulo  $\theta$ .

#### 2.2 Luminotecnia

La luminotecnia es la ciencia que estudia las distintas formas de producción de luz, así como su control y aplicación y aprovecharla para embellecer espacios [16].

#### 2.2.1 Magnitudes fotométricas

Cada una de las magnitudes radiométricas descritas en el punto anterior pueden ser normalizadas para indicar la respuesta al ojo humano y así obtener su correspondiente magnitud fotométrica. A estas magnitudes fotométricas se les agrega el sufijo V (de visible o visual) [15]. Dichas magnitudes se definen por medio de su magnitud radiométrica correspondiente, en base a la siguiente ecuación:

$$Q_v = 683 \int_{380}^{770} QV(\lambda) d\lambda$$
 (2.5)

Por medio de esta ecuación se puede realizar la conversión de cualquier magnitud radiométrica a su correspondiente magnitud fotométrica. Es necesario resaltar que la longitud de onda debe estar en unidades de nanómetros. Q es la magnitud radiométrica que se desea convertir y el 683 representa la máxima eficacia luminosa espectral de la radiación para la visión fotopica.

#### Flujo luminoso

Es la potencia emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Su unidad de medida es el lumen y es el equivalente al flujo radiante o potencia en radiometría. Es la unidad básica de la fotometría y se representa con el símbolo  $\Phi_v$ . A la relación entre watts y lúmenes se le llama equivalente luminoso de la energía y equivale a 1 watt-luz a 555 nm = 683 lm [17], [18].

#### Eficacia luminosa o rendimiento luminoso

Expresa el rendimiento energético de una lámpara y mide la calidad de la fuente como instrumento destinado a producir luz por la transformación de energía eléctrica en energía radiante visible. Es el cociente entre el flujo luminoso total emitido y la potencia total consumida por la fuente [18].

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \tag{2.6}$$

 $\eta =$  Eficacia luminosa

 $\Phi = Flujo Luminoso$ 

P = Potencia eléctrica consumida

#### lluminancia

Es la magnitud fotométrica equivalente de la irradiancia en radiometría. Es el flujo luminoso incidente en una superficie por unidad de área. Sus unidades son los luxes (Ix) o lo que es lo mismo lumen por metro cuadrado [19]. Se representa con el símbolo  $E_v$  y al igual que la irradiancia cuando el flujo es emitido por una superficie se le da el nombre de exitancia luminosa y se representa con el símbolo  $M_v$  [20]

$$E = \frac{\Phi}{S}$$
(2.7)

E = Luminancia

 $\Phi = Flujo Luminoso$ 

S =Superficie iluminada

#### Intensidad luminosa

Es la magnitud fotométrica equivalente a la intensidad radiante. Es la cantidad de flujo luminoso en lúmenes emitido por una fuente puntual en determinada dirección en

el espacio por unidad de ángulo sólido [19]. Su unidad de medida es la candela [cd] o lo que es lo mismo lumen/ estereorradián, se representa con el símbolo  $I_v$  [20].

$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$
(2.8)

 $\Phi = Flujo luminoso$ 

 $\omega = \text{Angulo solido}$ 

I = Intensidad luminosa

#### Luminancia

Puede ser pensado como "Brillo fotométrico". Es la magnitud fotométrica equivalente a la Radiancia en radiometría [19]. Se puede describir como la cantidad de flujo luminoso que pasa a través de un punto en una superficie especifica en determinada dirección, por unidad de área proyectada en el punto en la superficie y por unidad de ángulo solido en la dirección dada. Sus unidades están dadas en Im/m<sup>2</sup>•sr [17], [18].

$$L = \frac{I}{S}$$
(2.9)

I = Intensidad luminosa reflejada

S = Superficie o área que refleja

L = Luminancia o brillo

#### 2.2.2 Conceptos

En esta sección se describen algunos conceptos de luminotecnia que son utilizados para la caracterización de luminarias.

#### Contraste

Es la diferencia de luminancias entre los objetos y su alrededor, necesaria para poder distinguirlos [18].

#### Deslumbramiento

Es la sensación producida por áreas brillantes intensas dentro del campo de visión, puede ser experimentado como deslumbramiento molesto o perturbador [18].

#### Índice de reproducción cromática

Define la capacidad de una fuente de luz para reproducir el color real (color que tienen bajo la luz natural) de los objetos que ilumina. Puede tomar valores entre 0 y 100, entre más cercano es el valor a 100 mayor calidad de reproducción cromática tiene la fuente [21].

#### Temperatura de color

Se mide en grados Kelvin (°K) y es la temperatura a la cual un cuerpo debe ser calentado para que emita luz estable con un color determinado. Las lámparas incandescentes tienen una temperatura de color comprendida entre los 2700 y 322 °K [17], [21].

#### Ley de inversa de los cuadrados

Se utiliza para calcular la iluminación a una distancia d<sub>2</sub> si previamente se conoce la iluminación a una distancia d<sub>1</sub>. Esta ley nos dice que "La iluminación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia existente entre la fuente de luz y la superficie iluminada" [21].

$$E = \frac{I}{d^2}$$
(2.10)

#### Ley del coseno

Esta ley nos dice que la iluminación es proporcional al coseno del ángulo de incidencia [21].

$$E = \frac{I}{d^2} \cos \alpha \tag{2.11}$$

#### 2.3 Luminarias y su clasificación

Para la iluminación de espacios que carecen de luz natural es necesario contar con la presencia de fuentes de luz artificial, lámparas y luminarias que proporcionen un adecuado nivel de iluminación para dar soporte a cada una de las actividades que se realicen en interiores o exteriores fuera de horarios de luz natural, y así poder sobreponerse a las limitaciones que la naturaleza impone a las actividades humanas.

#### 2.3.1 Lámpara

La definición de una lámpara es un dispositivo que está destinado a transformar la energía eléctrica en luz. Su principal clasificación se divide en dos grupos que son lámparas incandescentes y lámparas de descarga y cada una de ellas a su vez se sub divide en diferentes tipos [17].

#### 2.3.2. Luminaria

Una luminaria es un dispositivo que sirve para repartir, controlar y dirigir la luz de una fuente de iluminación [22]. Éstas incluyen todos los elementos de soporte eléctrico, mecánico, óptico y estético de las lámparas, elementos que son necesarios para dar soporte y protección, así mismo para poder tener acceso al suministro de energía de la red eléctrica [17], [18].

Las luminarias pueden ser clasificadas en base a diferentes características, sin embargo lo más usual es basarse en criterios ópticos, mecánicos o eléctricos. Para el

desarrollo de este proyecto únicamente nos interesa la clasificación en base a las características ópticas.

# 2.3.2.1 Clasificación de acuerdo al porcentaje de flujo luminoso distribuido por encima y por debajo del plano horizontal que atraviesa la lámpara

En este tipo de clasificación se toma en cuenta la cantidad de flujo luminoso que la luminaria irradie hacia el techo o hacia el suelo. Como puede observarse en la figura 2.3 de acuerdo a esta clasificación se tienen seis clases: Directa, semi-directa, General difusa, Directa-indirecta, semi-indirecta, indirecta [17], [18].



Figura 2.3 Clasificación CIE según la distribución de la luz.

#### 2.3.2.2 Según la simetría de distribución del flujo luminoso

Dentro de esta clasificación se encuentran:

#### Luminarias simétricas

En este tipo de luminarias el flujo luminoso se reparte simétricamente con respecto al eje de simetría y la distribución de intensidades puede representarse mediante una curva fotométrica.

#### Luminarias asimétricas

En este caso el flujo luminoso no se reparte de forma simétrica respecto a un eje como en el caso anterior y la distribución de intensidades solo puede ser representada mediante diversos planos fotométricos.

#### 2.3.2.3 Según los planos de simetría de su respectivo solido fotométrico

Dentro de esta clasificación se encuentran:

#### Luminarias con infinitos planos de simetría

Dentro de esta clasificación se encuentran los reflectores y las luminarias para lámparas incandescentes.



Figura 2.4 Luminaria con infinitos planos de simetría.

#### Luminaria con dos planos de simetría

Dentro de esta clasificación se encuentran las luminarias para lámparas fluorescentes.



Figura 2.5 Luminaria con dos planos de simetría.
#### Luminarias con un solo plano de simetría

Dentro de esta clasificación se encuentran las luminarias de alumbrado vial.



Figura 2.6 Luminaria con un solo plano de simetría.

#### 2.4 Equipo utilizado para caracterización de luminarias

Para clasificar, caracterizar y diseñar luminarias se requiere llevar a cabo pruebas de laboratorio denominadas fotometrías, dichas pruebas permiten determinar la forma de la distribución de la intensidad luminosa de una fuente en cada punto alrededor de la misma. Así mismo es necesario determinar la eficiencia luminosa en relación con la potencia eléctrica consumida (radiación en el rango visible entre la radiación total emitida por la fuente). Para poder llevar a cabo este tipo de pruebas es necesario contar con equipo especializado diseñado específicamente para éste propósito [14].

Existen diferentes instrumentos destinados al diseño y caracterización de sistemas de iluminación, entre los principales podemos encontrar: el analizador de potencias y la esfera integradora (esfera de Ulbricht), los cuales son muy útiles al momento de determinar la eficacia de una luminaria, ya que el analizador de potencias nos permite conocer la potencia eléctrica consumida, mientras que por medio de la esfera integradora se puede determinar el flujo luminoso total entregado por la fuente de iluminación. Mediante éstos dos parámetros, potencia eléctrica y flujo luminoso total, es posible determinar la eficacia de un sistema de iluminación, ya que ésta se define como el flujo luminoso total entregado por una fuente de iluminación, entre la potencia

Por último y de igual manera importante, tenemos el goniofotómetro que es un equipo indispensable en la certificación de luminarias, es un instrumento destinado al análisis de curvas fotométricas. El principal objetivo de las mediciones realizadas con este instrumento, es conocer la forma de la distribución lumínica y la medida de las intensidades luminosas alrededor de la fuente bajo prueba [1], [11].

#### 2.4.1 Analizador de potencias

Un analizador de potencia tiene la capacidad de medir las características de potencia eléctrica de dispositivos que generan, transforman o consumen electricidad, también son llamados medidores de potencia o wattmetros, estos dispositivos miden parámetros tales como potencia real (watts), factor de potencia, armónicos y eficiencia en inversores, controladores de motores, iluminación, aplicaciones para el hogar, equipo de oficina, fuentes de poder, maquinaria industrial y otros dispositivos.

Estos dispositivos permiten también a los ingenieros minimizar perdidas de energía debido a distorsiones, transitorios en electrónica de potencia tales como inversores, motores, circuitos de iluminación y fuentes de poder. Este equipo de medición, en conjunto con la esfera integradora permite conocer la eficiencia energética de un sistema completo.

#### 2.4.2 Esfera integradora

El objetivo principal de una esfera integradora es la medición de la energía radiante o del flujo luminoso (lúmenes) de la fuente luminosa bajo prueba. Es una esfera hueca de dos metros de diámetro, cubierta internamente con una capa de espectralón o sulfato de bario el cual tiene como característica principal que presenta una reflexividad prácticamente constante y muy cercana al 100% para la región visible del espectro electromagnético [23].

En su centro geométrico se sitúa la lámpara cuyo flujo lumínico se quiere determinar y sobre la superficie de la esfera se monta el instrumento de medición (luxómetro) el cual lleva a cabo la medición de la luminancia correspondiente de acuerdo a la siguiente figura.



Figura 2.7 Esfera integradora.

Para que la esfera se comporte se comporte como esfera integradora, se coloca una placa (cubierta con el mismo material que la esfera), cuyo principal objetivo es evitar que la luz incida directamente sobre el elemento de medición. De esta manera y en forma ideal, se puede asumir que la esfera integradora es una superficie lambertiana (refleja la energía incidente de manera difusa y uniforme en todas direcciones), con reflectancia no selectiva, es decir que para cualquier longitud de onda (del espectro visible) se tiene la misma reflectividad en todos los sentidos de la esfera. Además por la geometría de la esfera y por el hecho de que la luz no incide directamente sobre el punto de medición, no existen puntos privilegiados en su superficie interior.

Podemos asumir que el flujo luminoso detectado por el sensor representa una fracción de la cantidad de flujo que incide en la superficie completa de la esfera, por lo tanto lo que se estaría midiendo es la cantidad de energía por unidad de área (iluminancia) por lo cual para determinar la energía total irradiada por la luminaria, solo debemos multiplicar la energía incidente por unidad de área por el área total de la superficie de la esfera [16], [23].

### 2.4.3 Goniofotómetro

Un goniofotómetro, también llamado fotogoniómetro, es un equipo destinado al relevamiento de curvas fotométricas de luminarias o lámparas como las que se utilizan en alumbrado público, interiores, ornamental, etc. El objetivo de las pruebas, llamadas fotometrías es conocer la forma de la distribución lumínica y la medida de las intensidades luminosas alrededor de la fuente bajo prueba. Existen diversas formas de hacer llegar la luz al sensor de medida utilizado, así como también distintos sistemas de coordenadas. Estas variantes y otras de tipo constructivo dan lugar a la existencia de tres distintos tipos de goniofotómetro [14], [16], [24].

Se tiene el tipo A en el cual la luminaria gira alrededor del eje horizontal fijo Y, así mismo se tiene la posibilidad de hacer girar la luminaria alrededor del eje vertical X para completar la esfera virtual alrededor de la fuente.

Se tiene también el tipo B en el cual el eje vertical se encuentra fijo sobre el cual se da la rotación y la luminaria gira sobre si misma sobre el eje horizontal para completar la esfera virtual sobre la cual se toman las mediciones.

Finalmente tenemos el tipo C (Fig. 2.8), éste sistema presenta un fotosensor, el cual es el encargado de la medición de intensidades, o un espejo móvil alrededor de un eje horizontal. Se caracteriza principalmente por tener a la luminaria bajo prueba suspendida en una orientación fija en el espacio, por lo cual solo puede moverse alrededor del eje vertical. El fotosensor o espejo gira alrededor de la luminaria en un plano vertical. Hay dos estilos de goniofotómetro tipo C: el que tiene un fotosensor móvil montado sobre una guía en forma de media luna con centro en el "centro fotométrico" de la luminaria, y el que posee un espejo que orbita alrededor de la luminaria [14], [25].

#### 2.5 Representaciones de la distribución luminosa

La fotometría nos muestra la forma y dirección de la distribución del flujo luminoso emitido por una fuente de iluminación en el espacio.



Figura 2.8 Goniofotómetro tipo C a) Fotosensor móvil b) Espejo móvil.

Esta información, ya sea en forma de tablas o gráficos, se utiliza para conocer de antemano como se distribuye la luz y así poder seleccionar correctamente los sistemas de iluminación en la etapa de diseño del proyecto. A continuación se muestran algunas de las diferentes formas de representar la distribución luminosa de una fuente.

#### 2.5.1 Curvas de distribución luminosa

Las curvas de distribución de la intensidad luminosa son curvas polares que pueden ser obtenidas en el laboratorio por medio de un instrumento llamado goniofotómetro.

También llamadas curvas fotométricas, son una representación gráfica del comportamiento de la luz y nos permiten conocer diferentes características relacionadas con la naturaleza de la fuente. Contar con este tipo de información es fundamental al momento de seleccionar la luminaria o fuente ideal para cada proyecto de iluminación en específico [16], [22].

Estas describen la dirección e intensidad en la que se distribuye la iluminación alrededor de la fuente. Para obtenerlas se miden las intensidades luminosas en diferentes ángulos verticales alrededor de la fuente (Denominados ángulos gamma), como se mencionó en la sección 2.4.3, se hace un barrido de la esfera completa y se unen los puntos contenidos en un mismo plano vertical y horizontal para así obtener un volumen conocido como solido fotométrico [17].

En este tipo de gráficos la distancia de cualquier punto de la curva al centro nos indica la intensidad luminosa de la fuente en esa dirección, entre mayor la distancia, mayor la intensidad luminosa. Generalmente estas curvas están normalizadas para una fuente de 1000 lúmenes y el grafico queda expresado en cd/klm (candela/ kilolumen). Para conocer el valor real de la intensidad solo se multiplica el valor nominal del flujo luminoso de la lámpara por el valor en el diagrama polar y se divide entre 1000 (lm).

$$I_{real} = \Phi_{lampara} \bullet \frac{I_{grafico}}{1000}$$
(2.12)

Generalmente solo se emplean las curvas que se obtienen al cortar el sólido fotométrico mediante dos planos verticales, ya que el sólido en si es poco práctico. Dichos planos están orientados uno por el eje longitudinal y el otro por el eje transversal de la lámpara y reciben el nombre de plano C90-C270 y C0-C180 respectivamente [21]. En la figura 2.9 se muestran las representaciones de las CDL.



Figura 2.9 Curvas de distribución luminosa.

#### 2.5.2 Matriz de intensidades

También es posible encontrar estos datos en forma de tablas llamadas matriz de intensidades luminosas en donde a cada pareja de valores de C (plano vertical) y  $\gamma$  (Inclinación respecto al eje vertical) corresponde un valor de I normalizado para una lámpara de flujo de 1000 lm. Por medio de una matriz de intensidades es posible

conocer la distribución de intensidad luminosa en cualquier punto alrededor de una luminaria [17], [22]. En la figura 2.10 se muestran los valores de la parte superior de una matriz de intensidades.

		c 270.0	c 285.0	c 300.0	c 310.0	¢ 315.0	C 320.0	¢ 325.0	¢ 350,0	C 335.0
G	0.0	241.00	241.00	241.00	241.00	241.00	241.00	241.00	241.00	241.00
G	10.0	179.00	177.00	181.00	187.00	190.54	194.00	197.37	201.00	205.21
G	20.0	150.00	148.00	147.00	148.00	150.50	153.00	155.99	162.00	172.80
ß	30.0 1	127.00	129.03	130.00	131.00	132.02	134.00	137.70	143.00	149.94
G	35.0	114.00	120.00	119.00	121.00	123.66	127.00	131.51	137.00	143.54
G	40.0 ]	107.00	111.00	112.00	117.00	117,98	120,00	123.80	129.00	135.19
G	45.0	98.00	102.00	101.00	107.00	110.92	114.00	116.00	119.00	124.98
G	47.5	95.00	96.00	97.00	102.00	107.74	112.00	114.15	117.00	123.16
G	50.0	91.00	91.00	94.00	99.00	104.72	109.00	111.33	115.00	122.70
G	52.5	83.00	85.00	92.00	97.00	101.72	106.00	109.85	115.00	122.64
G	55.0	75.00	78.00	89,00	93.00	97.97	103.00	108.22	114.00	120.54
G	57.5	67.00	70.00	84.00	91.00	95.35	100.00	105.21	111.00	117.30
G	60.0	58.00	61.00	79.00	87.00	91.21	96.00	101.75	108.00	114.30
G	62.5	47.00	53.00	72.00	83.00	87.79	93.00	98.87	105.00	111.11

Matriz de INTENSIDADES - cd/klm

Figura 2.10 Matriz de intensidades.

#### 2.5.3 Diagramas isocandela

Aun cuando las curvas de distribución luminosa son herramientas muy útiles y prácticas para conocer las características de la fuente, tienen la desventaja de que solo nos dan información de lo que ocurre en unos pocos planos meridionales (eje C) y no podemos saber con certeza lo que pasa en el resto. Para evitar estos inconvenientes y poder tener una representación plana con información de las intensidades en cualquier dirección, se definen lo que son conocidas como curvas isocandela o diagramas isocandela [17], [22].

Un diagrama isocandela es aquel en el que los puntos de igual valor de intensidad luminosa están representados en un plano por medio de curvas de nivel. Cada punto indica una dirección en el espacio la cual está definida por medio de dos coordenadas angulares. Dependiendo de cómo se escojan estos ángulos, se pueden tener dos casos.

- Proyectores para alumbrado por proyección
- Luminarias para alumbrado público. Proyección azimutal de Lambert

Para los proyectores se utiliza un sistema de coordenadas rectangulares con ángulos en lugar de X e Y. Para especificar una dirección se utiliza un sistema de meridianos y paralelos similar al de la tierra. El paralelo 0° se hace coincidir con el plano horizontal que contiene la dirección del haz de luz y el meridiano 0° con el plano perpendicular a este. Cualquier dirección que se quiera especificar quedará definida por medio de dos coordenadas angulares. Después de identificarlas y localizarlas en el gráfico, se unen los puntos con el mismo valor de intensidad luminosa formando así las líneas isocandela.

En las luminarias para alumbrado público, en lugar de coordenadas rectangulares, se utilizan los ángulos C y  $\gamma$  usados en los diagramas polares.



Figura 2.11 Curvas isocandela para proyectores.

Se supone la luminaria situada dentro de una esfera y sobre ésta se dibujan las líneas isocandela. Los puntos se obtienen por medio de la intersección de los vectores de intensidad luminosa con la superficie de la esfera. Para su representación plana se recurre a la proyección azimutal de Lambert.



Figura 2.12 Curvas isocandela para alumbrado público.

En este tipo de gráficos los meridianos están representados por el ángulo C, los paralelos por  $\gamma$  y las intensidades son las líneas rojas, las cuales están expresadas en tanto por ciento de la intensidad máxima. Ya que las superficies son proporcionales a las originales, el flujo luminoso se calcula multiplicando el área en el diagrama (en estereorradianes) por la intensidad luminosa en esta área.

#### 2.5.4 Curvas Isolux

A diferencia de los gráficos vistos en los puntos anteriores (diagramas polares e isocandela) los cuales se obtienen de características de la fuente luminosa, tales como flujo o intensidad luminosa, y dan información acerca de la forma y magnitud de la emisión luminosa de esta [22]. Las curvas isolux dan información referida a iluminancias, es decir, flujo luminoso incidente en una determinada área, dichos datos se obtienen ya sea experimentalmente o por medio de cálculos a partir de la matriz de intensidades usando la siguiente formula:

$$E_{\rm H} = \frac{I(C,\gamma)}{{\rm H}^2} \cdot {\rm COS}^3\gamma$$
(2.13)

Este tipo de grafico es de gran utilidad ya que nos proporciona información sobre la cantidad de luz recibida en cada punto de la superficie de trabajo. Son muy utilizadas en el alumbrado público, en donde por medio de este diagrama podemos darnos una idea de cómo iluminan las farolas la calle. Lo más común es expresar las curvas isolux en valores normalizados para una lámpara de 1000 lm y una altura de montaje de 1 m [17].



Figura 2.13 Curvas Isolux.

Se pueden obtener los valores reales a partir de las curvas por medio de la siguiente expresión:

$$E_{H_{real}} = E_{curva} \cdot \frac{\Phi_{L_{real}}}{1000} \cdot \frac{1^2}{H^2}$$
(2.14)

También puede expresarse en valores relativos a la iluminancia máxima (100%) para cada altura de montaje. Los valores reales de la iluminancia se calculan entonces como:

$$E_{real} = E_{curva} \cdot E_{max}$$
(2.15)

Con

$$E_{\max} = a \cdot \frac{H_{L_{real}}}{H^2}$$
(2.16)

Siendo a un parámetro suministrado con las gráficas.

Hasta este punto se han descrito cada uno de los conceptos necesarios, los cuales nos ayudarán para la comprensión del desarrollo de cada una de las etapas de este proyecto. En los siguientes capítulos se describirán detalladamente el desarrollo del sistema de control, adquisición y procesamiento de datos respectivamente, y finalmente la parte de resultados y conclusiones de los datos obtenidos, así como recomendaciones y trabajo futuro.

## CAPÍTULO III SISTEMA DE CONTROL

En este capítulo se describen cada una de las actividades realizadas para el desarrollo del sistema de control del goniofotómetro. En la sección 3.1 se hace una descripción de los principales componentes mecánicos del sistema, como lo son en este caso el marco giratorio, la base de la luminaria, las poleas y baleros, los cuales fueron diseñados en un proyecto previo [7]. En la sección 3.2 se describen los componentes del hardware de control, como lo es tablilla arduino utilizada, las fuentes de poder, los controladores y los motores a pasos. Finalmente en la sección 3.3 se describe el software de control, así como los botones del panel frontal desarrollado en Labview como lo son la rutina de inicio, posición inicial e inicio.

#### 3.1 Estructura mecánica

En este caso se cuenta con la estructura de un goniofotómetro tipo C con fotosensor fijo y espejo móvil. Este equipo cuenta con el sistema de coordenadas más utilizado y recomendado por la CIE. Se trata de un sistema de coordenadas C y  $\gamma$ , la coordenada C representa el ángulo que presentan los planos de rotación y  $\gamma$  representa los planos de elevación de la luminaria como se puede ver en la figura 3.1.



Figura 3.1 Coordenadas goniofotómetro tipo C.

En este tipo de goniofotómetro se hace llegar la luz al fotosensor de manera indirecta por medio de un sistema de dos reflexiones, en donde el espejo principal está colocado sobre un marco giratorio, en una posición inicial tal que éste queda debajo de la luminaria bajo prueba. Así mismo este espejo principal está alineado de tal forma que refleja el flujo luminoso incidente hacia el espejo secundario, el cual a su vez está alineado con el sensor fotométrico, teniéndose de ésta manera un flujo luminoso incidente en el fotosensor de forma constante, obteniendo así finalmente una matriz de iluminancias de dos dimensiones donde los ángulos de los ejes son las coordenadas C y  $\gamma$ , y la medición del fotosensor es la iluminancia buscada.

La norma marca una distancia de prueba entre la luminaria y el sensor fotométrico de al menos cinco veces la dimensión máxima de la abertura luminosa del luminario bajo prueba, y no menor a 3 m. Esta especificación es fácil de cumplir con este sistema de dos reflexiones y de esta manera hace posible el poder realizar pruebas a un amplio rango de tamaños de luminarias, cumpliendo con los estándares establecidos. En la figura 3.2 se muestra la imagen de la estructura mecánica del goniofotómetro tipo C, así como el camino óptico del flujo luminoso desde que sale de la luminaria hasta que incide en la superficie del fotosensor.



Figura 14 Estructura mecánica goniofotómetro tipo C.

Esta estructura fue seleccionada en la parte del diseño mecánico debido a que tiene una mayor estabilidad, un mínimo de vibraciones mecánicas tanto en el marco como en los espejos, esto debido a la forma del marco y a la característica de tener dos soportes, uno en cada base del goniofotómetro.

## 3.1.1 Eje de la base de la luminaria (coordenada C)

Cada uno de los ejes del goniofotómetro representa una coordenada, el eje giratorio de la base de la luminaria representa la coordenada C, el cual en cada paso de avance del motor hace el cambio de meridiano en la esfera imaginaria formada alrededor de la fuente bajo prueba.

La base de la luminaria va montada sobre el eje principal del marco giratorio la cual está fijada por medio de tornillos opresores. De la base sale un brazo principal el cual soporta el motor a pasos que da el movimiento rotacional a la luminaria bajo prueba. La flecha del motor va unida al eje giratorio, el cual a su vez está sujeto por medio de dos baleros cónicos, los cuales evitan que el peso de la luminaria actúe como una fuerza de tensión sobre el motor. En la figura 3.3 se muestra una imagen del mecanismo de soporte de la luminaria.

La luminaria está suspendida en el espacio y es soportada por una base giratoria controlada por un motor a pasos tipo nema 23 de la marca Wantai, modelo 57BYGH115-003B, el cual cuenta con características muy específicas seleccionadas en la parte del diseño mecánico del goniofotómetro, tales como 1.8° por paso, torque sostenido de 2.9419 N-m, una corriente de 3 A y una inercia del rotor de 800 gr- cm<sup>2</sup>. Cuenta con un par de arranque elevado y por medio del driver que lo maneja es posible a micro pasos [7].



Figura 3.3 Base de la luminaria.

## 3.1.2 Eje del marco giratorio (Coordenada $\gamma$ )

El eje del marco giratorio representa la coordenada  $\gamma$ , el giro de este eje está controlado por el motor principal y un juego de dos poleas y una banda (Fig. 3.4), las poleas tienen una relación de 6 a 1, lo que significa que para poder completar una vuelta del marco giratorio se necesitan seis vueltas de la polea que esta ensamblada al eje del motor principal [7].

El motor seleccionado en la parte de diseño mecánico del goniofotómetro es un tipo nema 34 de la marca Wantai modelo 85BYGH450C-012 (Fig. 3.10), este motor cuenta con características muy específicas necesarias para el movimiento del marco, tales como 1.8° por paso, un par sostenido de 11.2 N-m, una corriente de 3 A y una inercia del rotor de 3.6 Kg-cm [7].



Figura 3.4 Poleas y banda del eje principal.

El marco giratorio es un rectángulo formado de perfil hueco y sus medidas internas son 3.4 m x 2.6 m (Fig. 3.5). El material del cual está formado es R-300 calibre 18 de 3 in x 1.5 in. Es un material resistente y liviano lo cual facilita el giro del marco ya que requiere de un menor torque inicial del motor.

El marco esta fijo por ambos lados a cada una de las bases que lo soportan, en cada lado vertical el marco tiene en su parte central un cuadro, en donde por medio de cuatro tornillos van fijos los valeros que permiten el giro del mismo (Fig. 3.5).

Por el centro de estos valeros cruza un eje hueco de 2 in de diámetro, el cual asienta y va fijo a las bases del goniofotómetro por medio de dos abrazaderas de aluminio (Fig. 3.6).



Figura 3.5 Marco giratorio y balero.



Figura 3.6 Abrazadera y ejes de soporte del marco giratorio.

El marco giratorio soporta el espejo primario y el secundario, los cuales dirigen el flujo luminoso hacia la superficie del sensor fotométrico. El espejo principal está montado sobre el soporte de aluminio, el cual al igual que el del espejo secundario tiene un mecanismo que permite ajustar la posición y así poder hacer una correcta alineación entre los espejos y el fotosensor.

El soporte del espejo principal está montado sobre el travesaño horizontal del marco giratorio, el cual es ubicado justo debajo de la luminaria bajo prueba y es direccionado hacia la superficie del espejo secundario Fig. 3.7.



Figura 3.715 Soporte de espejo principal.

El soporte del espejo secundario está montado sobre el travesaño vertical del marco giratorio, justo en la parte central para direccionar el flujo luminoso hacia el sensor fotométrico Fig. 3.8.



Figura 3.816 Soporte de espejo secundario.

De esta manera podemos tener un flujo luminoso constante desde la luminaria hasta la superficie del fotosensor y registrar las mediciones de las intensidades luminosas en los diferentes puntos alrededor de la luminaria.

#### 3.2 Hardware de control

El hardware de control está conformado por una tablilla arduino mega 2560, que recibe el código fuente del software desarrollado en LabVIEW y envía las señales de control a los drivers de los motores a pasos, los cuales a su vez envían las señales de potencia a los motores y generan el movimiento de cada uno de los ejes del goniofotómetro, la posición del ejes gama es calculada por medio de la rutina

desarrollada en LabVIEW para obtener la resolución del eje gama, en la cual por medio de tres fórmulas, una para la rampa de aceleración, otra para velocidad constante y otra para la rampa de frenado se determina en qué posición se realizó cada una de las lecturas.

## 3.2.1 Tablilla arduino

Es la parte central del sistema de control de los ejes del goniofotómetro, se trata de una pequeña placa de microcontrolador con puerto USB para conectar al ordenador, así como puertos digitales y análogos los cuales pueden ser conectados mediante cableado a diferentes componentes electrónicos externos, tales como motores, leds, relevadores, sensores, altavoces, micrófonos etc. [20].

La tablilla arduino utilizada para el desarrollo de este proyecto es una Arduino Mega 2560 (Fig. 3.9) debido a que es una de las más potentes en sus diferentes características. Esta tarjeta está basada en un microcontrolador ATmega2560 de la marca Atmel, tiene 54 pines digitales de entrada y salida, de los cuales 15 de ellos pueden proporcionar señales PWM, tiene además 16 entradas analógicas, 4 UARTs [26].



Figura 3.9 Tarjeta arduino Mega 2560.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizara la placa Arduino como parte central del hardware de control de los ejes del goniofotómetro, usando la interfaz de LabVIEW para arduino LIFA (LabVIEW Interfaz For Arduino), la cual se describe más a detalle en el anexo 1.

Para la utilización de estas librerías no es necesario disponer de una versión comercial de LabVIEW, basta con obtener la versión de estudiante, la cual se puede adquirir a un precio económico.

#### 3.2.2 Eje de la base de la luminaria

Para el control de giro de la base de la luminaria se utilizan tres elementos principales como lo son: el motor a pasos, la fuente de poder y el controlador del motor a pasos. Por medio de la rutina de control desarrollada en LabVIEW se envía la información a la tablilla arduino, la cual envía las señales de control al controlador del motor a pasos y éste a su vez envía las señales de potencia para generar el movimiento del motor.

#### 3.2.2.1 Fuente de Poder S-350-36

Es una fuente de alimentación ampliamente utilizada en automatización industrial y sistemas CNC a pasos o servo. Entrega un voltaje de salida máximo de 36 V, una corriente de 9.8 A y una potencia de 350 W. Cuenta con switch para seleccionar una alimentación de 110 o 220 V, cuenta con función de control PWM y tiene un potente ventilador para garantizar una alta eficiencia. En el anexo 2 se especifican las características eléctricas de esta fuente.

#### 3.2.2.2 Driver de motor de la base de la luminaria

Es un controlador de motor paso a paso hibrido de dos fases, cuyo voltaje de entrada es de 18 V CC a 50 V CC. Este controlador está diseñado para ser utilizado con motores a pasos híbridos de dos fases de todo tipo con un diámetro exterior de 42 mm a 86 mm y una corriente de fase inferior a 4 A. Es similar al circuito de control de un servo, lo cual permite que el motor funcione sin problemas y prácticamente sin ruido ni vibraciones. Cuando el controlador DQ542MA funciona a alta velocidad

mantiene un par significativamente más alto que otros controladores de dos fases, además la precisión de posicionamiento también es mayor. Es ampliamente utilizado en dispositivos de control numérico como equipos CNC, maquinas bordadoras y máquinas de embalaje [27]. En el anexo 3 se muestra la tabla de las especificaciones eléctricas.

## 3.2.2.3 Motor a pasos 57BYGH115-003B

Como ya se mencionó en la parte mecánica, el motor utilizado para el giro de la luminaria es un motor tipo nema 23 de la marca Wantai modelo 57BYGH115-003B (Fig. 3.10). Este motor cuenta con características muy específicas tales como un paso angular de 1.8° (200 pasos/rev), una tasa de voltaje de 6.3 V y una tasa de corriente de 3.5 A. Es un motor que cuenta con un par de 3N y una inercia del rotor de 800 gr-cm<sup>2</sup>. Tiene cuatro cables codificados por colores con terminación en cables pelados, los cuales permiten conectarlo al controlador y configurarlo a micro pasos para cumplir con las necesidades de este proyecto.



Figura 3.1017 Motor a pasos 57BYGH115-003B.

#### 3.2.3 Eje del marco giratorio

Al igual que en el caso del eje de la base de la luminaria, para el control de movimiento del marco giratorio se cuenta con tres elementos: una fuente de 60 V, un controlador y un motor a pasos. Arduino toma las señales provenientes del software de control y las procesa para luego enviarlas al controlador, el cual genera las señales de potencia y por ende el giro del motor a pasos.

#### 3.2.3.1 Fuente de poder S-350-60

Es una fuente de alimentación comúnmente utilizada en la industria de la automatización en aplicaciones con servo y motores a pasos. Puede ser alimentada con 110/220 V seleccionando este voltaje por medio de un switch manual. Entrega un voltaje de salida de hasta 60 V de corriente directa, un amperaje de 5.9 A y una potencia de 350 W. Tiene un ventilador de enfriamiento para asegurar une buena eficiencia, además cuenta con protección por sobre corriente, sobre voltaje y sobre calentamiento. Es una fuente de bajo costo la cual hace que sea accesible para el uso del público en general. En el anexo 2 se muestran las especificaciones eléctricas.

### 3.2.3.2 Driver de motor del marco giratorio

El controlador DQ860MA es utilizado para el control de motores a pasos híbridos de dos fases de todo tipo con un diámetro exterior de 57 a 110 mm y una corriente de fase menor a 7.8 A. Una de sus mejores características es que cuando funciona a alta velocidad, el par de mantenimiento es más alto que en otros controladores del mismo tipo, además la precisión en el posicionamiento también es mayor que en otros dispositivos controladores. Debido a que el circuito es similar al circuito de control de servo, permite que el motor funcione prácticamente sin ruido ni vibraciones, lo cual lo hace muy adecuado para este proyecto. Es un circuito de alto rendimiento y bajo costo, lo cual beneficia en el costo final del desarrollo del proyecto. En el anexo 3 se muestran las principales características eléctricas de este controlador.

#### 3.2.3.3 Motor a pasos 85BYGH450C-012

Se trata de un motor tipo nema 34 de la marca Wantai el cual cuenta con pasos angulares de 1.8° (200 pasos/rev), sin embargo por medio del controlador descrito en el punto anterior se puede modificar esta característica, configurándolo a micro pasos y obteniendo una resolución de hasta 50000 pasos/ rev, lo cual quedaría muy por

encima del requerimiento mínimo para este proyecto. Tiene un par sostenido de 11.2 N-m, una corriente de fase de 3 A y una inercia del rotor de 3.6 kg-cm.

Al igual que el motor de giro de la luminaria, cuenta con cables codificados en colores para su conexión (Fig. 3.11). Tiene un peso de 5 kg y una longitud de 151 mm.



Figura 3.11 Motor a pasos 85BYGH450C-012.

#### 3.3 Software de control

Como ya se mencionó anteriormente, el software de control está basado en la plataforma LabVIEW en conjunto con el toolkit para LabVIEW LIFA (LabVIEW Interface For Arduino), el cual proporciona una serie de funciones para el manejo a alto nivel de la tarjeta arduino, lo cual nos permitirá en conjunto con las funciones de LabVIEW desarrollar el software de control para el giro de los motores de los ejes del goniofotómetro.

En esta sección se describen tanto el funcionamiento de LIFA como las rutinas de control desarrolladas en LabVIEW para el manejo de los motores.

#### 3.3.1 LabVIEW

LabVIEW es un lenguaje de programación grafico basado en el paradigma de flujo de datos con el cual se pueden desarrollar programas de manera rápida e intuitiva. Su nombre es el acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (Mesa de Trabajo de Laboratorio de Instrumentación Virtual para Ingeniería) [28], [29]. LabVIEW fue creado por National Instruments y en un principio estaba orientado para aplicaciones de control e instrumentación electrónica, sin embargo actualmente puede ser utilizado para realizar programas desde lo más simple hasta aplicaciones que involucren control remoto de equipos, adquisición y procesamiento de datos, etc.

Un programa desarrollado en LabVIEW recibe el nombre de VI (Virtual Instrument) y está conformado por dos partes principalmente, el diagrama a bloques y el panel frontal. El diagrama a bloques es el código fuente del programa, mientras que el panel frontal es la interfaz con la cual el usuario interactúa introduciendo datos al programa por medio de controles y visualizando los resultados en los diferentes indicadores [30].

Este software tiene características que lo hacen ser uno de los más utilizados en el ámbito científico para el desarrollo de proyectos y aplicaciones de alto nivel [20].

### 3.3.2 LIFA (LabVIEW Interfaz For Arduino)

La interfaz de LabVIEW para arduino es una herramienta que permite al usuario adquirir datos de la tablilla arduino y procesarlos en el entorno grafico que nos proporciona LabVIEW. Esta interfaz proporciona un gran número de funciones en LabVIEW para el manejo de las diferentes entradas y salidas de la tarjeta arduino [31].

Esta interfaz consta de dos partes, una es un firmware el cual gestiona la comunicación entre LabVIEW y arduino, desde la tarjeta, por lo cual es necesario grabarlo en la tarjeta para así poder utilizar las librerías de LabVIEW. La otra parte son estas librerías, las cuales permiten al usuario realizar tareas de alto nivel como manejo de motores a pasos o servos y lecturas de sensores de todo tipo [32].

Para la comprensión del software de control desarrollado en LabVIEW es necesario conocer cada uno de los elementos de la librería LIFA, los cuales fueron utilizados para el desarrollo del programa. En el anexo 4 se describen cada uno de estos elementos [20].

#### 3.3.3 Rutina de inicio

Para el desarrollo del software de control se implementó primeramente una rutina de inicio en donde el marco giratorio se desplaza 45° en relación al eje vertical, esto se hizo con la finalidad de evitar que al momento de colocar la luminaria bajo prueba, se vaya a caer provocando algún daño al espejo principal montado sobre el marco giratorio. Esta función se encuentra en el panel frontal del sistema de control de los ejes, presionando este botón el marco se desplaza quedando libre la parte de abajo de donde se coloca la luminaria. En la figura 3.12 se puede ver el botón "Rutina de inicio" en el panel frontal o interfaz de usuario.

El código fuente de esta función se puede ver en la figura 3.13. Primeramente se inicia la comunicación entre arduino y LabVIEW por medio de la función "Init" en la cual se selecciona el tipo de tarjeta arduino y el tipo de conexión que puede ser serial o USB, en nuestro caso se utiliza conexión USB.

Posteriormente se utiliza la función "stepper configure" en la cual se le asigna una referencia a cada motor y los pines de la tarjeta arduino que se utilizaran para el control de cada motor.

Configuracion	Generar reportes		
v S	ueltas D	Rutina de inicio OK	Steps Remaining?
Res may T	olucion eje or (Pasos/rev) D	Posicion inicial OK	Vueltas restantes
Resoluc	cion eje C (°) <0>	stop STOP	OK

Figura 3.12 Panel frontal del software de control.



Figura 3.13 Código fuente de la rutina de inicio.

Después de realizar la conexión entre arduino y LabVIEW y configurar los pines a usar para ambos motores, se realiza ahora si lo que es en si la rutina de inicio por medio de una estructura de eventos dentro de un ciclo while. La estructura de eventos nos permite controlar cada una de las funciones especificadas en el panel frontal, ya que en esta estructura se detecta un cambio de valor en la posición de los botones del panel frontal y al momento de detectar este cambio se ejecuta la rutina específica que controla ese botón, en este caso la rutina de inicio.

Dentro de la estructura de eventos se tiene la rutina para el movimiento del motor principal, y por ende del marco giratorio. Primeramente por medio de las funciones "Digital Write Pin" y "Digital Read Pin" se configuran dos salidas de la tablilla arduino una que controla la dirección de giro del motor y la otra para activar el motor.

Seguidamente se configura el número de pasos, aceleración y velocidad de giro del motor por medio de la función "Stepper Write", en este caso se toma el valor de la resolución del motor principal y se multiplica por 0.75 para desplazar el motor 45° con respecto a la posición inicial.

El ciclo while nos permite tener un ciclo continuo, es decir, mientras no se presione el botón "stop" el programa sigue esperando un cambio de valor de cualquiera de los botones del panel frontal, para ir a ejecutar la rutina de control relacionada al botón presionado.

La función "stop" del ciclo while está controlada por dos eventos por medio de una compuerta or, es decir, con cualquiera de las dos condiciones que se cumpla, el ciclo while se detiene y el programa deja de correr. Una de estas condiciones es que sea detectado un error en la terminal "error out" y la otra condición es que sea presionado el botón de "stop" en el panel frontal. Como se puede observar en la figura 3.14 a la salida de la estructura de eventos se tiene la función "Stepper ToGo" la cual nos indica los pasos que quedan pendientes.



Figura 3.14 Función "Stepper ToGo" y algoritmo de control de "Stop."

Después de que cualquiera de las dos condiciones se cumple y la función "stop" se activa, automáticamente se finaliza todo lo que está dentro del ciclo while, las señales son enviadas fuera del ciclo y se ejecuta lo que esta fuera, en este caso se finaliza la comunicación entre los motores y arduino por medio de la función Stepper Close, así mismo entre arduino y la computadora por medio de la función Close. En la figura 3.15 podemos ver la finalización de la comunicación entre arduino y los motores 1 y 2, y entre arduino y la PC.



Figura 3.15 Rutina de finalización de la comunicación.

## 3.3.5 Posición Inicial.

Esta rutina se generó con la finalidad de regresar el marco a su posición inicial, se realiza después de haber instalado la luminaria correctamente y que no haya ningún riesgo de que esta caiga y cause algún daño al espejo montado sobre el marco giratorio. Es exactamente igual a la rutina de inicio, solo que en este caso se escribe un uno en vez de un cero en la salida que controla la dirección de giro, por lo tanto el marco giratorio se mueve en sentido contrario regresando a su posición inicial para poder iniciar la prueba. En la figura 3.16 podemos ver el código para el botón "Posición Inicial".



Figura 3.16 Código "Posición Inicial"

## 3.3.6 Inicio

Es la parte principal del software de control, ya que el código fuente relacionado a este botón es el que genera la secuencia de giro de los motores (Fig. 3.17), para poder simular el giro del fotosensor alrededor de la luminaria hasta completar una esfera imaginaria alrededor de la fuente bajo prueba y así poder determinar las intensidades luminosas en cada uno de los puntos situados en la superficie de esta esfera imaginaria.

El código fuente está basado en una estructura de secuencia dentro de un ciclo for, el cual a su vez está dentro del evento que controla el botón de inicio. En la terminal de "control de iteraciones" del ciclo for se conecta un control numérico llamado "Vueltas" para indicar el número de veces que se repite la secuencia. Dentro del ciclo for se encuentra la estructura de secuencia con el código principal para el giro de los motores. Se tiene una estructura de secuencia extendida con cuatro cuadros de secuencia, dos para generar el movimiento de cada uno de los motores y dos para generar un retardo para cada motor y permitir que finalicen su movimiento.

En el primer y tercer cuadro de secuencia se configuran para ambos motores las terminales "Dirección" y "Enable" y se configura el número de pasos, velocidad y aceleración de cada uno de los motores. En este caso el número de pasos para el motor principal está relacionado con la resolución a la que está y por la relación de los engranes que es de 6:1. En el caso del segundo motor solo gira un paso para cambiar de meridiano.

En el segundo y cuarto cuadros de secuencia se utiliza la función "Wait Till Steps Complete" para dar lugar a que cada uno de los motores termine la cantidad de pasos y pueda continuar con el giro del siguiente motor.

En la figura 3.17 se puede observar el código fuente de la secuencia de giro de los motores que es una vuelta del marco giratorio y un cambio de meridiano de la base de la luminaria, hasta completar la esfera alrededor de la fuente luminosa.

Hasta aquí la descripción del desarrollo del software de control, en este punto ya se cuenta con un sistema constituido por el hardware y software descrito. Hasta este punto la secuencia de movimiento de los motores funciona de manera adecuada, en donde se realiza una vuelta completa del marco giratorio y posteriormente un cambio de meridiano de la base de la luminaria y así consecutivamente hasta completar la esfera virtual alrededor de la fuente luminosa bajo prueba.

En el siguiente capítulo se muestra el desarrollo del sistema de adquisición de datos, el cual en conjunto con el sistema de control nos permitirá obtener la matriz de intensidades, posteriormente se hará el procesamiento de datos necesario para generar un archivo fotométrico con formato IES el cual puede ser analizado con una amplia gama de softwares de iluminación disponibles en el mercado.



Figura 3.17 Código fuente secuencia de motores.

# CAPÍTULO IV SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS

La adquisición de datos es un proceso mediante el cual los fenómenos físicos del mundo real son transformados en señales eléctricas que son medidas y convertidas a formato digital para ser procesadas, analizados y guardados. En este capítulo se presentan las diferentes actividades llevadas a cabo para el desarrollo del sistema de adquisición de datos del goniofotómetro. Se hace una descripción de cada uno de los elementos que componen el sistema, como son el sensor fotométrico LI-210 R, el multímetro digital Keysight 3458A y el software de adquisición de datos desarrollado en LabVIEW por medio de los drivers instalados para el manejo del multímetro, todo esto utilizando una conexión con cable GPIB/USB.

## 4.1 Hardware

En esta sección se describen los principales componentes físicos del sistema de adquisición de datos como lo son el sensor fotométrico, el cable GPIB y el multímetro digital Keysight 3458A, sus características físicas y eléctricas, sus modos de funcionamiento y la configuración necesaria para su uso en este proyecto.

## 4.1.1 Sensor fotométrico LI-210R

Se trata del elemento principal del sistema de adquisición de datos. Es un fotosensor que tiene la capacidad de medir la luz con una sensibilidad típica a la del ser humano (400-700 nm), por medio de un fotodiodo de silicio montado debajo de un difusor de acrílico usado como corrector cosenoidal. Su respuesta espectral coincide con la curva V de lambda estándar del observador CIE la cual se explicó en el capítulo dos. Tiene una excelente respuesta al coseno, es decir, es sensible a la luz proveniente de todas direcciones, hasta un ángulo de incidencia de 82° [33].

La salida es una señal de corriente (uA) la cual es directamente proporcional a la luz incidente en el área del sensor fotométrico.

Por medio de una constante de calibración dada por el fabricante (25.5 uA por Klux) multiplicada por la corriente de salida del fotosensor se obtiene la iluminancia (Klux) medida. En la figura 4.1 se puede ver el sensor fotométrico LI-210R [33], [34].



Figura 4.1 Sensor fotométrico LI-210R.

En el caso de este proyecto se utilizó un sensor fotométrico LI-210R-BL. Un sensor tipo BL (Bare Leads) es un sensor que tiene terminación en cables desnudos (Fig. 4.2). Se trata de tres cables pelados, los cuales están codificados por colores y deben ser conectados a las terminales de entrada de algún dispositivo que mida corriente, en nuestro caso se trata del multímetro digital Keysight 3458A [33].



Figura 4.2 Sensor fotométrico LI-210R-BL.

El cable azul es la señal positiva, mientras que el café es la señal negativa. El cable desforrado debe ser conectado a tierra para reducir el ruido en la señal del sensor.

En la figura 4.3 se muestra el código de colores del sensor fotométrico.



Figura 4.3 Código de colores del sensor fotométrico.

En el caso de este proyecto se pretende hacer un registro de las lecturas del fotosensor, sin embargo para convertir a luxes, la señal de corriente obtenida debe ser multiplicada por la constante de calibración antes de ser registrada. Esta constante se encuentra en el certificado de calibración otorgado por el fabricante al momento de adquirir el sensor fotométrico (Fig. 4.4).



Figura 4.4 Certificado de calibración.

El sensor fotométrico LI-210R cuenta con un corrector cosenoidal, lo cual le permite tener una sensibilidad a la luz casi igual a todos los ángulos de incidencia hasta alrededor de los 82°. Los errores son típicamente menores a  $\pm$ 5% para ángulos menores a 82° del eje normal. A 90° una respuesta perfecta al coseno sería cero, y cualquier error en ese ángulo es infinito. En la figura 4.5 se puede observar una gráfica de la respuesta al coseno del sensor LI-210R.



Figura 4.5 Respuesta cosenoidal del sensor LI-210R.

La respuesta espectral de un sensor fotométrico LI-210R típico, corresponde a la curva del observador estándar establecida por el CIE (Fig. 4.6).



Figura 4.6 Respuesta espectral del sensor LI-210R.

Para la comunicación entre la PC y el multímetro se utilizó un cable de comunicación GPIB (Fig. 4.7) el cual se utiliza para conectar y controlar instrumentos programables. GPIB es una interfaz digital de comunicación paralela de 8 bits con velocidades de transferencia de datos de 1 Mbyte/s o más, utilizando un protocolo de enlace de 3 cables. El bus admite un controlador de sistema, el cual es normalmente un ordenador, y hasta 14 instrumentos adicionales [35].



Figura 4.7 Cable GPIB-USB-HS.

#### 4.1.2 Multímetro digital Keysight 3458A

Como ya se mencionó anteriormente, para poder medir la salida de corriente del fotosensor, es necesario contar con un instrumento que sea capaz de medir señales de corriente directa tan pequeñas, las cuales estén en el rango incluso de los nano amperes.

Para el caso específico de este proyecto además de la capacidad de medir corrientes pequeñas, es necesario que pueda medirlas a alta velocidad. El multímetro digital Keysight 3458A cuenta con ambas características, ya que tiene capacidad para medir corrientes directas desde los 100 nA hasta 1 A a una velocidad de hasta 1350 lecturas/seg con una resolución de 5.5 dígitos. En la figura 4.8 se muestra el multímetro utilizado [36].

+10.0000001 V DC	Auto State	7 8 9 E	
		•	

Figura 4.8 Multímetro digital Keysight 3458A.

El multímetro mide la corriente colocando una resistencia de derivación interna en los terminales de entrada, midiendo el voltaje a través de la resistencia, y calculando la corriente (Corriente = Voltaje/ resistencia). Las terminales de entrada frontales y traseras están protegidas por fusibles de 1 A- 250V. En la figura 4.9 se muestra la conexión de las entradas frontales para cualquier tipo de medición de corriente [37].



Figura 4.9 Conexión para medición de corriente.

El multímetro mide la corriente en cualquiera de los ocho rangos. En la figura 4.1 Se muestra una tabla con cada uno de los rangos de DC y su escala completa de lectura, también se muestra la máxima resolución y el valor de la resistencia de derivación usada para cada rango.

DCI Range	Full Scale Reading	Maximum Resolution	Shunt Resistor
IOOnA	120.000nA	1pA	545.2kΩ
1µA	1.200000µA	1pA	45.2kΩ
10µA	12.000000µA	1pA	5.2 <b>k</b> Ω
100µA	120.00000µA	10pA	730Ω
1mA	1.200000mA	IOOpA	100Ω
10mA	12.00000mA	1nA	10Ω
100mA	120.0000mA	10nA	1Ω
1A	1.050000A	100nA	0.1Ω

Tabla 4.1 Rangos de corriente directa.

Es importante resaltar que, dependiendo del tipo de configuración del convertidor A/D se determina la velocidad de medición del multímetro, resolución, exactitud y rechazo de modo normal (NMR) para mediciones de DC y resistencia. Existen tres factores que afectan la configuración del convertidor A/D y son: la frecuencia de referencia, el tiempo de integración y la resolución [37].

## Frecuencia de referencia

Cuando se aplica energía, el multímetro automáticamente mide la frecuencia de la línea de alimentación, lo redondea a 50 o 60 Hz y establece la frecuencia de referencia del convertidor A/D al valor redondeado. Para la mayoría de las condiciones de operación, la frecuencia de referencia de encendido permite un excelente NMR (Normal Mode Rejection). Sin embargo, para un máximo NMR se debe configurar a la frecuencia exacta de la línea de alimentación.

## Tiempo de Integración

El tiempo de integración es el periodo de tiempo que el convertidor A/D mide la señal de entrada. Para mediciones de resistencia o DC, el tiempo de integración determina la velocidad de medición, exactitud, máximos dígitos de resolución, y la cantidad de NMR para el ruido a la frecuencia de referencia del convertidor A/D. Se puede especificar el tiempo de integración en términos de Power Line Cycles (PLCs).

#### Resolución

Para mediciones de resistencia o DC, la resolución es determinada indirectamente por medio del tiempo de integración del convertidor A/D.

#### 4.1.2.1 Modos de operación del multímetro

Existen tres eventos que deben de ocurrir en el orden correcto antes de que el multímetro inicie la toma de mediciones (Fig. 4.10). Estos eventos son: (1) Trigger arm event, (2) the trigger event, y (3) the sample event. Cuando los tres eventos han ocurrido en el orden indicado, entonces el multímetro realiza las mediciones especificadas [37].



Figura 4.10 Jerarquía de disparos.

#### Lecturas continuas

En estado de encendido, el multímetro está configurado para que realice las lecturas automáticamente, es decir, que los tres eventos están configurados en modo automático.

#### Lecturas individuales

Por medio del comando NRDGS se especifica el número de lecturas tomadas por evento de disparo y el evento de muestra que inicia cada lectura. En el estado de encendido, PRESET NORM, o PRESET FAST, el número de lecturas por disparo está configurado a 1 y el evento de muestra en automático (NRDGS 1, AUTO).

#### **Múltiples lecturas**

Se puede utilizar el comando NRDGS para especificar más de una lectura por evento de disparo. Así cada vez que se cumpla un evento de disparo, se realizará el número de lectura especificado. Para efectos de este proyecto este modo de operación es el más conveniente ya que en cada cambio de meridiano se realizaran múltiples lecturas (950) durante todo el giro del marco.

#### 4.2 Software de adquisición de datos

Se desarrolló el software de adquisición de datos en el entorno grafico de LabVIEW, haciendo uso principalmente de los drivers desarrollados por Agilent Technologies/Keysight Technologies (Agilent 3458 Instrument drivers) y de funciones y estructuras básicas, tales como: controles, constantes, estructuras for y secuencia, y elementos de la paleta de generación de reportes para la creación de la matriz de intensidades en excel. En la siguiente figura se muestran el menú de drivers 3458A.



Figura 4.11 Drivers 3458 para LabVIEW.
## 4.2.1 Drivers 3458 para LabVIEW

Al igual que LIFA para el uso de arduino con LabVIEW, se tienen controladores para diferentes instrumentos. Los drivers para el multímetro 3458A (Fig. 4.11) son funciones desarrolladas por los fabricantes (Agilent/ Keysight Technologies), las cuales están basadas principalmente en VISA (Virtual Instrument Software Architecture), para comunicarse con el Agilent 3458A a través de instrucciones básicas como abrir, cerrar, leer y escribir datos, etc.

VISA es un estándar para configuración, programación, y sistemas de instrumentación de solución de problemas que abarcan el uso de comunicación GPIB. VISA es el método preferido para programar el control de instrumentos en LabVIEW ya que abstrae el tipo de interfaz utilizada, es decir te permite programar a un nivel más alto. Muchos VIs de LabVIEW para el control de instrumentos usan la API (Application Programming Interface) VISA. En el anexo 5 se describen cada una de las funciones de los controladores para el 3458A.

### 4.2.2 Muestreo de intensidades

Para generar el software de adquisición de datos, se debe tomar en cuenta que el muestreo de las intensidades del fotosensor, se debe realizar mientras el marco giratorio esta en movimiento. Posteriormente la base de la luminaria avanza un meridiano, se detiene y el marco vuelve a iniciar otro giro. Entonces podemos darnos cuenta que la parte de adquisición de datos debe ir en el mismo cuadro de secuencia en el cual el marco giratorio esta en movimiento.

Ya definido el primer punto, que es, donde debe ir la parte de adquisición de datos, se inicia con la programación del software de adquisición. Primeramente se selecciona la función "Initialize" para iniciar la comunicación entre la PC y el multímetro, en esta función se conecta un control para seleccionar el "VISA resource name" que es el puerto de la computadora donde va conectado el cable GPIB/USB del multímetro.

Después de iniciar la comunicación entre PC y multímetro, se utiliza la función "Configure Measurement" por medio de la cual, se configura el tipo de medición, en este caso es corriente directa y se establece la resolución y el rango de la medición. Se conecta un control o constante en cada una de estas variables para poder definirlas.

Posteriormente se utiliza la función "Configure Integration" por medio de la cual se establece el tiempo de integración en PLCs (Power Line Cycles), en este caso el valor por default es cero, por lo cual se deja desconectada esta entrada para poder obtener la mayor velocidad de medición.

Seguidamente se utiliza la función "Configure Multipoint" en la cual se establece la cantidad de muestras por disparo y el tipo de disparo que se utiliza para iniciar la toma de mediciones. En este caso se establecen 1950 mediciones por disparo y el tipo de disparo es automático.

Finalmente se utiliza la función "Read Measurement" en la que únicamente se configura la cantidad de disparos y el tiempo (ms) en el cual el multímetro realizara cada una de las mediciones especificadas. En la fig. 4.12 se muestra el diagrama.



Figura 4.12 Diagrama a bloques software de adquisición de datos.

Como ya se ha explicado anteriormente, para poder convertir la corriente de salida del fotosensor a luxes, es necesario multiplicar esa corriente por la constante de calibración del fotosensor otorgado por el fabricante en el certificado de calibración al momento de adquirirlo. Sin embargo a la salida de la función "Read Measurement (Multiple Points)" se obtiene un arreglo unidimensional, por lo tanto para poder separar cada una de las mediciones y poderlas multiplicar por la constante de calibración, es necesario utilizar un ciclo for en el cual en cada iteración entra una lectura y dentro de la misma estructura se hace la conversión a luxes. En la figura 4.13 se muestra la conversión de corriente a luxes.

A la salida del ciclo for se tiene igualmente un arreglo unidimensional, sin embargo ya son unidades de luxes y pueden ser utilizadas para obtener gráficos isolux o isocandela.



Figura 4.13 Conversión de corriente a luxes.

Con cada vuelta del marco giratorio se obtiene un arreglo unidimensional de 950 mediciones (luxes), por lo tanto al final de la prueba, después de realizar toda la exploración alrededor de la fuente de iluminación, se obtiene una matriz de intensidades. Posteriormente se hace la transpuesta de esta matriz por medio de la función "Transpose 2D Array" y se envía a un arreglo matricial para así posteriormente enviarla a un archivo de excel y al archivo IES (Fig. 4.14).



Figura 4.14 Obtención de la matriz de intensidades.

### 4.2.3 Generación de reporte en excel.

Después de obtener la matriz de intensidades y mostrarla en el panel frontal, se tiene la opción de generar un reporte en excel, por medio del botón "Generar reporte" ubicado en el panel frontal. Al momento de que el programa detecta un cambio de valor en el botón de generar reporte, la estructura de eventos se va al evento "Generar reporte" el cual se muestra en la figura 4.15.

Se utilizan tres funciones de la paleta "Report generation". La primera "New report" la cual crea un nuevo reporte, luego "Excel easy table" la cual genera una tabla en excel, y por ultimo "Dispose report" la cual cierra y guarda el reporte.



Figura 4.15 Generación de reporte en excel.

En el archivo de excel se tienen cuatro columnas, la primera indica el número de lectura, la segunda el tiempo en el que se tomó la lectura, la tercera indica la posición en pasos y la cuarta la posición en grados. A partir de la quinta columna se muestran los valores de las lecturas en cada meridiano (Coordenada C), el número de columnas a partir de ahí dependerá de la resolución seleccionada por el usuario, es decir si se selecciona una resolución de 9°, tomando en cuenta que la base de la luminaria gira solo 180°, se tendrían un total de 21 lecturas que van desde la posición 0° hasta la 180° con avances de 9°.

En los renglones están organizadas las lecturas relacionadas a la coordenada gama, por lo cual se tienen 950 renglones correspondientes a cada lectura de las diferentes posiciones del marco giratorio, obteniendo así con las lecturas una esfera virtual alrededor de la fuente bajo prueba.

Hasta este punto se han descrito cada uno de los elementos del sistema de adquisición de datos, como lo es el fotosensor, el multímetro, el cable GPIB y el funcionamiento de cada uno de estos en conjunto con el software de adquisición de datos. En el siguiente capítulo se describe el desarrollo del software de procesamiento de datos, que es en sí convertir la matriz de intensidades en un archivo fotométrico que cumpla con el formato IES tal como lo marca la norma ANSI/IESNA LM-63-02. Dicho archivo puede ser interpretado y analizado por diferentes softwares existentes en el mercado utilizados en la industria de la iluminación.

# CAPÍTULO V SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS

En este capítulo se describe el desarrollo del software de procesamiento de datos. Ya que la matriz de intensidades no nos da una idea clara de la distribución del flujo luminoso de la fuente bajo prueba, es necesario convertir dicha matriz a un gráfico de distribución luminosa. Esto se hace por medio de un estándar en la industria de la iluminación, que es el formato IES, el cual es un archivo fotométrico descrito en la norma ANSI/IES LM-63-02 el cual se explica detalladamente a lo largo de este capítulo.

### 5.1 Formato de Archivo .IES

Por sus siglas en inglés (Illuminating Engineering Society) el formato de archivo .IES responde a un estándar creado para la transferencia electrónica de datos fotométricos, el cual se describe en la norma ANSI/IESNA LM-63-2002. En dicha norma se especifica la secuencia y el formato de los datos que conforman el archivo .IES. Es importante aclarar que todos los archivos creados bajo esta norma deben tener terminación .IES [38].

En estos archivos se encuentra toda la información de la prueba y características de la luminaria, como lo es: tipo de fotometría, numero de lámparas, lúmenes por lámpara, potencia, etc. Además de esto contiene también la información fotométrica obtenida por medio del goniofotómetro como lo es la matriz de intensidades y la resolución en grados de ambos ejes en los cuales fueron tomadas dichas lecturas [20].

Este tipo de archivos son portátiles y pueden ser evaluados o utilizados para cálculos de espacios de iluminación. En el mercado existe una gran variedad de software que puede ser utilizado para abrir y analizar los archivos con formato IES tales como Dialux, Relux, IES Viewer, etc.

La información se presenta de manera organizada en líneas de texto y tiene un orden específico como se muestra a continuación:

```
IESNA:LM-63-2002
[Keyword 1]
[Keyword 2]
[Keyword 3]
TILT=NONE
<numero de lámparas><lúmenes por lámpara>multiplicador de candelas><nº ángulos</pre>
verticales><nº ángulos horizontales><tipo de fotometría><tipo de
unidades><anchura><longitud><altura>
<factor de balasto><uso futuro><potencia de entrada>
<ángulos verticales>
<ángulos horizontales>
<valores de candelas de todos los ángulos verticales del primer ángulo
horizontal>
. . .
<valores de candelas de todos los ángulos verticales del último ángulo
horizontal>
```

Como se puede observar el archivo inicia con la línea IESNA: LM-63-2002 ya que es la norma que describe dicho formato. En las siguientes líneas se escriben campos denominados "Keywords" estos campos contienen información acerca de la luminaria y la prueba que se está realizando. A continuación se describen cada uno de ellos:

```
[TEST] numero que referencia el informe
[TESTLAB] laboratorio que realiza el informe
[ISSUEDATE] fecha de creación del archivo
[MANUFAC] Fabricante de la luminaria bajo test
```

Todos los archivos .IES deben contener al menos estos cuatro "Keywords", cualquier otro "keyword" es opcional. Además de los "Keywords" requeridos se sugieren los siguientes:

```
[LUMCAT] Numero de catalago de la luminaria
[LUMINARIE] Descripcion de la luminaria
[LAMPCAT] Numero de catalago de la lampara
[LAMP] Descricpion de la lampara (tipo, watage, tamaño, etc)
```

Cabe mencionar que la información proporcionada en estos campos no es relevante a la hora de interpretar los datos fotométricos contenidos en el archivo y solo se utilizan para presentar información tanto de la prueba como de la luminaria, con la finalidad de que cualquiera que abra el archivo pueda conocer el lugar y las condiciones bajo las cuales se realizó la prueba.

Después de los "Keywords" viene la información importante la cual inicia con "TILT", esta línea indica si la salida de la lámpara varía como una función del ángulo de inclinación de la luminaria, y si es así, la ubicación de la información del multiplicador de inclinación.

Si la salida de la lámpara no varía como función del ángulo de inclinación de la luminaria entonces deberá ser **TILT=NONE**.

Si la salida de la lámpara varía como función del ángulo de inclinación de la luminaria entonces deberá ser **TILT=INCLUDE** o **TILT=<filename>**, dependiendo si la información de la inclinación está incluida en el archivo fotométrico o en un archivo separado.

Los campos siguientes son datos referentes a la fotometría de la luminaria bajo prueba, los cuales son interpretados y tratados para realizar cálculos por medio de los programas de simulación y visualización.

### Numero de lámparas.

Este campo debe contener un número indicando la cantidad de lámparas de la luminaria.

#### Lúmenes por lámpara.

Este campo debe contener flujo luminoso de cada lámpara de la luminaria. En el caso de fotometrías absolutas este campo deberá contener un valor de -1.

### Multiplicador.

Este campo debe contener un número indicando el factor de multiplicación que se aplicará a todos los valores en candelas del archivo. Habitualmente es 1 pero puede ser cualquier valor.

### Número de ángulos verticales.

Este campo debe contener un número indicando el total de ángulos verticales en el reporte.

### Número de ángulos horizontales.

Este campo debe contener un número indicando el total de ángulos horizontales en el reporte.

### Tipo de fotometría.

Este campo debe contener un número indicando el tipo de fotometría que se está realizando a la luminaria bajo prueba puede ser 1, 2 o 3, dependiendo si es fotometría tipo A, B o C.

### Unidades.

Este campo debe contener un número entero indicando las unidades utilizadas en las dimensiones de la luminaria. Para utilizar unidades de pies deberá ser 1 y para unidades de metros deberá ser 2.

### Anchura.

Este campo debe contener un número indicando la anchura de la luminaria.

## Longitud.

Este campo debe contener un número indicando la longitud de la luminaria.

### Altura.

Este campo debe contener un número indicando la altura de la luminaria.

### Factor de balastro.

Este campo debe contener el factor de balastro de la luminaria.

Este valor describe las características de aplicación de la luminaria. Si el valor de balastro es desconocido, su valor por defecto deberá ser 1.

### Uso futuro.

Este elemento está reservado para uso futuro. Debe contener un uno para tener compatibilidad con versiones anteriores de la norma.

### Potencia de entrada.

Este campo debe contener un número indicando la potencia de entrada de la luminaria.

## Ángulos verticales.

Indica los ángulos verticales en forma ascendente en los cuales se realizaron las mediciones. Para fotometría tipo C el primer valor deberá ser 0 o 90 y el último valor 90 o 180.

## Ángulos horizontales.

Debe contener los ángulos horizontales en forma ascendente en los cuales se realizaron mediciones. Para fotometría tipo C el primer ángulo siempre es 0 y el último valor deberá ser: 0 si la luminaria es simétrica en todos los planos, 90 si la luminaria es simétrica en cada cuadrante, 180 si la luminaria es simétrica en el plano 0-180 y finalmente si la luminaria no tiene ninguna simetría, el último ángulo deberá ser 360.

## Valores en candelas.

Este campo debe contener todos los valores en candelas medidos. El primer renglón debe contener los valores en candelas para todos los ángulos verticales en el primer ángulo horizontal. Los siguientes renglones deberán contener los valores en candelas de todos los ángulos verticales en cada eje horizontal. Los valores son colectados por el goniofotómetro y deben ser reportados bajo este estándar. El software de procesamiento de datos deberá ordenarlos en este formato.

### 5.2 Rutina para obtener resolución del eje gama.

Analizando la parte de control del eje gama, podemos recordar del capítulo tres que éste eje está controlado por el motor principal, el cual a su vez es controlado por la función "Stepper Write" a la cual se le programó una rampa de aceleración de 50 pasos por segundo cuadrado, esto quiere decir que la velocidad no es constante durante todo el giro del marco. Debido a que las lecturas del multímetro se realizan a una velocidad constante de 25 muestras/s durante todo el giro del marco, es necesario realizar una rutina para correlacionar cada una de las lecturas con la posición del marco giratorio.

Para calcular la posición del marco se utilizan tres fórmulas; una para la rampa de aceleración, otra para la velocidad constante y la tercera para la rampa de desaceleración, en la figura 5.1 se muestra la fórmula usada en cada intervalo.

A ésta tasa de adquisición del multímetro (25 muestras/s), se obtendría una resolución máxima de 0.378 grados, sin embargo al momento de generar el archivo IES el usuario tiene la opción de seleccionar resoluciones más grandes.



Figura 5.1 Formulas para cálculo de posición del marco giratorio.

Para la rampa de aceleración la fórmula es un medio de la aceleración angular en pasos/s<sup>2</sup> por el tiempo al cuadrado (s<sup>2</sup>), esto nos da como resultado la posición en pasos.

Para la velocidad constante la fórmula es posición inicial mas la velocidad angular en pasos/s por el tiempo en s y como resultado nos da la posición en pasos.

Para la rampa de desaceleración la fórmula es posición inicial más velocidad angular por tiempo mas un medio de la aceleración por el tiempo al cuadrado y como resultado nos da la posición en pasos.

En la figura 5.2 se muestra el código fuente de la rutina desarrollada para relacionar la posición del marco con la lectura (número de muestra).

La rutina está conformada por un ciclo for, en el cual para definir el número de iteraciones se dividen los 360 grados que abarcan el giro completo del marco entre la resolución seleccionada por el usuario y se le suma uno para incluir el ángulo 0.



Figura 5.2 Rutina para resolución del eje gama.

Para obtener cada una de las posiciones de las lecturas, se multiplican cada una de las iteraciones por la resolución seleccionada, es decir, si el usuario selecciona una resolución de 10 grados, se haría el cálculo 360 entre 10 y se le suma 1, obteniendo un total de 37 iteraciones que irían de 0 a 360 grados.

Posteriormente cada uno de esos valores se compara con dos ángulos que son 33.75 y 326.25 los cuales corresponden al intervalo en el cual se encuentra la velocidad constante, cualquier ángulo menor correspondería a la rampa de aceleración y cualquier ángulo mayor a ese intervalo correspondería a la rampa de desaceleración.

Seguidamente con las salidas de las funciones de comparación se hace un arreglo booleano para obtener un valor binario el cual se convierte a un número entero y se utiliza como selector para una estructura "case" y así poder aplicar la fórmula adecuada dependiendo si se trata de la rampa de aceleración, velocidad constante o rampa de desaceleración.

Finalmente a todos los valores mayores a uno se les resta uno y se redondean al valor más cercano, el resultado sería el valor del número de muestra que corresponde a cada uno de los ángulos de las posiciones del marco de acuerdo a la resolución seleccionada por el usuario.

Después de obtener la relación entre posición y número de muestra, es necesario convertir los valores de los ángulos de las posiciones del marco a texto para poder ingresarlos al bloc de notas e ir formando la estructura del archivo .IES. En la siguiente imagen se muestra el código del programa que realiza esta conversión.



Figura 5.3 Código para convertir valores de ángulos a texto.

En esta parte se obtiene el tamaño del arreglo de los valores de ángulos por medio de la función "Array Size", se le suma uno, se divide entre dos y así obtenemos el número de iteraciones. Posteriormente se usa la función "Number to fractional string" la cual convierte un numero fraccionario a formato de texto (string) y así obtenemos un arreglo unidimensional de los valores de ángulos en formato de texto (Eje gama salida).

## 5.3 VI para generación de archivo IES.

La base principal de este VI es la función "Concatenate strings" la cual como su nombre lo indica, concatena cadenas de caracteres en una sola cadena de salida. La única función de éste VI es ordenar los datos de la matriz de intensidades de tal forma que se apeguen al formato IES y puedan ser interpretados por medio de software especializado.

Se va organizando la información línea por línea de acuerdo a lo especificado en la norma ANSI/IESNA LM-63-02. Se agrega la primera línea de texto, que es el nombre de la norma que especifica el formato de un archivo IES, los datos que no cambian como lo es el nombre de la norma se agregan como constantes de string y esos son "transparentes" para el usuario, es decir siempre que se genere un archivo IES van a aparecer en el mismo orden y posición en el archivo.

Los siguientes "keywords" son: Lumcat, Luminarie y Testlab, los cuales ya fueron explicados en la sección 5.1 y es información que el usuario introduce en el panel frontal antes de generar el archivo IES. Luego tenemos Issuedate que se agrega de manera automática por medio de la función "Get Date/Time string"

Para la generación del número de ángulos verticales y horizontales simplemente se realiza una división de 180 entre la resolución del eje gama y 360 entre la resolución del eje C y se les suma uno para incluir el ángulo 0.

Finalmente tenemos todos los campos correspondientes a la información de la luminaria como lo son: Potencia, número de lámparas, y las dimensiones de la lámpara. Todos estos campos son información que es proporcionada por el usuario.

La demás información como tipo de fotometría, unidades, factor de balastro etc. Se quedan como constantes de string ya que es información que no cambia. A continuación se muestran el panel de control y el código desarrollado para la creación del archivo IES.

Configuracion Generar report	es		
Referencia de luminaria Descripcion	Numero de lamparas Lumenes por lampara	Altura Longitud	Resolucion eje gamma (°) $\frac{r}{7}$ 0 Resolucion eje C (°) $\frac{r}{7}$ 0
Laboratorio	Potencia de lampara	Anchura	<i>J</i>
Reporte excel	Generar reporte excel		Crear archivo IES

Figura 5.4 Panel de control para la creación de archivo IES.



Figura 5.5 Código para generar archivo IES.

Después de generar el encabezado del archivo IES se deben agregar las posiciones de ambos ejes en las cuales se tomaron las lecturas, es decir los ángulos verticales y horizontales. Para el eje gama ésto se hace por medio de la rutina "obtener resolución del eje gama" explicada en la sección 5.2 y para el eje C se realiza por medio de un ciclo for en el cual se multiplica la resolución seleccionada por el usuario por cada una de las iteraciones y finalmente se convierte a formato string para obtener un arreglo unidimensional de todas las posiciones.

Finalmente y la parte más importante del archivo IES es la que corresponde a los valores de la matriz de intensidades. Para generar la matriz de intensidades con la resolución seleccionada por el usuario se toman los valores de número de muestra generados en la rutina "obtener resolución del eje gama" y son los que se toman de la matriz "Master" que es la que contiene la mayor resolución que puede obtener el equipo. Estos datos se van seleccionando renglón por renglón por medio de un ciclo for en base al número de muestra, hasta que finalmente se obtiene la matriz con la resolución deseada. Los datos se dividen en dos partes, una de 0 a 180 y otra de 180 a 360, ya que es la forma en la que lo indica la norma. Finalmente estos datos se transponen y así cada renglón corresponde a todas las lecturas verticales del primer ángulo horizontal y así consecutivamente hasta completar la nueva matriz.

#### 5.4 Visor de archivos IES.

Como ya se mencionó anteriormente en la sección 5.1, existe una gran cantidad de programas para la visualización y análisis de archivos fotométricos con formato IES. Para propósitos de visualización de los archivos IES generados por el goniofotómetro, en esta ocasión se decidió utilizar el software IES Viewer, el cual es una herramienta muy práctica e interactiva para la visualización de archivos fotométricos. Esta herramienta permite al usuario rápidamente ver, encontrar y convertir archivos fotométricos. Es muy útil cuando se requiere visualizar la distribución del flujo luminoso de una luminaria antes de agregarla al modelo con el que se está trabajando.



Figura 5.6 Visor de archivos IES.

Esta herramienta permite también visualizar toda la información relacionada con el tipo de prueba y características de la luminaria, tales como; fabricante de la luminaria, numero de catálogo de la luminaria, numero de catálogo de la lámpara, descripción de la lámpara, tipo de fotometría, etc.

En la parte izquierda de la ventana principal podemos observar el gráfico polar en el cual se puede visualizar la distribución del flujo luminoso. Directamente sobre este grafico en la parte izquierda se pueden observar cinco iconos, los tres primeros nos permiten acceder a características del grafico que se encuentran ocultas, como ajustar goniograma, visualizar el plano ortogonal y el render. Las dos últimas opciones nos permiten imprimir y guardar el grafico.

Al momento de presionar la opción de render aparece una nueva ventana con una imagen más realista de la distribución del flujo luminoso (Fig. 5.6). En ambas ventanas, tanto en la del grafico polar como en la del render, por medio de la barra de deslizamiento que aparece en la parte de arriba, se puede ir cambiando el ángulo vertical (coordenada C) y visualizar la distribución del flujo en cada uno de los meridianos.



Figura 5.7 Ventana de render.

En la ventana de render se tienen tres barras de deslizamiento para modificar el brillo, zoom y distancia, tiene además cuatro botones, uno para centrar la imagen, otro para cerrar la ventana, un tercero para seleccionar el color de la luz y el ultimo para la actualización automática del render al momento de cambiar el ángulo vertical.

En el siguiente capítulo se hace una descripción de los resultados finales del desarrollo de este proyecto que impactan directamente en el Laboratorio de Análisis de Sistemas de Iluminación del área de posgrado del ITCH, el cual gracias al desarrollo de este proyecto ya cuenta con un goniofotómetro que cumple con las normas oficiales para la caracterización de luminarias.

Se utiliza el sistema completo de control, adquisición y procesamiento de datos del goniofotómetro para caracterizar diferentes luminarias y se hace una descripción completa de los resultados obtenidos como son, los gráficos polares de la distribución luminosa de cada una de las luminarias caracterizadas y su respectivo patrón de emisión, visualizados por medio del software de iluminación IESVIEWER.

# CAPÍTULO VI RESULTADOS

Durante el desarrollo de éste proyecto se ha visto la gran importancia que tienen los sistemas de iluminación en la sociedad actual, ya sea en interiores o exteriores se requiere de iluminación para poder llevar a cabo nuestras actividades diarias de forma eficiente.

Uno de los grandes retos de la industria de la iluminación, es hacer luminarias más eficientes, las cuales brinden una alta calidad de iluminación con un mínimo gasto de energía eléctrica. Debido a esto se hace necesario el diseño y caracterización de luminarias.

Uno de los equipos más utilizados para el diseño y caracterización de luminarias es el goniofotómetro, el cual su uso se encuentra marcado como obligatorio para la caracterización de luminarias en las normas oficiales nacionales e internacionales que rigen el mundo de la iluminación.

Según una publicación del 2012 en la revista online "iluminet" a la fecha solamente existían cuatro goniofotómetros en México, de los cuales dos eran propiedad del gobierno federal y se utilizaban para alumbrado público y los otros dos pertenecían a empresas privadas.

Uno de los principales objetivos de éste proyecto fue el poder contar con un goniofotómetro que se adaptara a las medidas del laboratorio de sistemas de iluminación del área de posgrado del ITCH, fue por eso que se diseñó desde la parte óptica y mecánica, hasta la parte de control, adquisición y procesamiento de datos.

Como resultado se obtuvo un software completo de control adquisición y procesamiento de datos, el cual en conjunto con la estructura mecánica y componentes ópticos forman el goniofotómetro, hasta el momento es capaz de obtener un archivo fotométrico de la luminaria bajo prueba.

### 6.1 Resultados.

Gracias al desarrollo de éste proyecto ya se cuenta con un goniofotómetro tipo C con dimensiones adecuadas para el área disponible en el laboratorio de análisis de sistemas de iluminación del área de posgrado del ITCH y es uno de los primeros en una institución de educación pública. Este equipo tiene capacidad de realizar mediciones con una resolución de 0.45° en el eje gama y de 0.9° en el eje C.

El equipo genera una matriz de intensidades con la mayor resolución del eje gama (matriz master) y cuenta con una interfaz para el usuario desarrollada en LabVIEW, en la cual el usuario introduce toda la información de la luminaria así como la resolución deseada para la creación del archivo IES. El software automáticamente selecciona las mediciones y genera la nueva matriz con la resolución seleccionada por el usuario.

Al finalizar la prueba el usuario puede generar un archivo de excel con la matriz de intensidades master, así como generar un archivo IES en el cual aparece toda la información de la luminaria junto con la matriz de intensidades con la cual se generan las gráficas de distribución luminosa.

Para evaluar el funcionamiento del goniofotómetro se realizaron pruebas con tres diferentes luminarias. La primera prueba se realizó con un foco incandescente de 100 W de la marca OSRAM con un flujo luminoso de 1560 lm.



Figura 6.1 Foco clásico OSRAM 125 V 100 W.



Figura 6.2 Diagrama polar foco OSRAM 100 W.





Para la segunda prueba se utilizó el mismo foco OSRAM de 100 W pero en esta ocasión se le colocó una barrera óptica para simular una lámpara que emite flujo luminoso en una dirección específica, a continuación se muestra la imagen de cómo se colocó la barrera óptica.



Figura 6.4 Foco OSRAM 100 W con barrera óptica.



Figura 6.5 Diagrama polar foco OSRAM 100 W con barrera óptica.



Figura 6.6 Render foco OSRAM 100 W con barrera óptica.

La tercera prueba se realizó con un foco led marca ADIR de 120 V, potencia eléctrica de 5 W y un flujo luminoso de 250 lm.



Figura 6.7 Foco led ADIR 5 W.



Figura 6.8 Diagrama polar foco led ADIR 5 W.





# CAPÍTULO VII CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### 7.1 Conclusiones.

Como puede observarse en las imágenes de la sección anterior, los resultados obtenidos mediante las pruebas realizadas con el goniofotómetro pueden definirse como satisfactorios ya que se cumple con el objetivo de obtener la distribución del flujo luminoso alrededor de las diferentes fuentes luminosas bajo prueba, por medio de las gráficas polares o curvas de distribución luminosa en conjunto con la función render, la cual nos permite obtener una imagen foto realista desde un modelo 3D de la luminaria.

En comparación con un equipo comercial los cuales generalmente ofrecen una resolución de 0.1° en el eje gama y 1 en el eje C, este equipo como ya se mencionó, ofrece una resolución de 0.45° en el eje gama y 0.9° en el eje C, las cuales pueden ser aumentadas por medio de la configuración de la resolución de los drivers de los motores a pasos, sin embargo por cuestiones de optimización de tiempo de prueba y exactitud de las mediciones se optó por manejar esas resoluciones.

El equipo automáticamente al finalizar la prueba genera la matriz de intensidades "master" que es la matriz con la mayor resolución. El usuario tiene la opción de seleccionar cualquier resolución igual o mayor a la de la matriz master para la creación del archivo IES. Al finalizar se presiona el botón generar archivo IES y el software nos genera el archivo que posteriormente puede ser interpretado y analizado en cualquier tipo de software destinado para el análisis de datos fotométricos.

La sensibilidad y exactitud de las mediciones están determinadas por el sensor fotométrico el cual tiene una sensibilidad de 30 uA por 100 klux y una máxima desviación de 1% a 100 klux.

### 7.2 Recomendaciones y trabajo futuro.

Debido a que el equipo no se encuentra debidamente aislado del resto del laboratorio, al momento de realizar las pruebas el sensor capta algunas señales de luz intrusa provenientes de las reflexiones generadas en las paredes [39], las cuales se presentan como señales muy pequeñas y que al momento de generar el archivo IES fue necesario eliminarlas para poder obtener un gráfico más uniforme. Esto no es inherente al diseño del equipo, sino que es una situación que se presentaría en cualquier equipo que no se encuentre debidamente aislado. Por lo tanto una de las principales recomendaciones es adecuar el área del laboratorio destinada al uso del goniofotómetro, de tal manera que quede aislado completamente del resto del laboratorio y así poder evitar totalmente reflexiones o señales de ruido que puedan afectar al desempeño del equipo.

Como trabajo futuro se recomienda también la adición de encoders a cada uno de los ejes del goniofotómetro para poder tener retroalimentación acerca de la posición, el ángulo y las revoluciones de ambos motores a pasos, ya que de momento la posición se calcula de manera teórica y puede haber mayor margen de error debido a las vibraciones y juego mecánico de los engranes y la polea.

Como última recomendación se propone hacer una modificación en el sistema de adquisición de datos, ya que de momento se utiliza el multímetro digital Keysight 3458A para la adquisición de la señal del sensor. Debido a que en el laboratorio se utiliza el multímetro en otras muchas actividades, y las pruebas con el goniofotómetro son de larga duración, esto limitaría la disponibilidad del multímetro para otro tipo de pruebas, por lo tanto se propone utilizar ya sea una tarjeta de adquisición de datos o incluso la tarjeta arduino mega que ya está siendo utilizada en la parte de control, la cual en conjunto con un hardware de acondicionamiento de señal podría suprimir el uso del multímetro y hacer el equipo más eficiente.

### REFERENCIAS

- [1] "NOM-007-ENER-2014.".
- [2] A. Exteriores, P. Especificaciones, and Y. M. D. E. Prueba, "NOM-031-ENER-2012," 2012.
- [3] D. Oficial *et al.*, "NOM-013-ENER-2013," vol. 10, pp. 6–28, 2003.
- [4] R. C. Paz, "NORMALIZACIÓN Serie Normas ISO 9000."
- [5] V. F. Muñoz, AN AUTOMATED GONIOPHOTOMETER FOR LUMINAIRE, vol. 35, no. 1. IFAC, 2002.
- [6] R. Echazú, "DISEÑO Y ENSAYOS PRELIMINARES DE UN PROTOTIPO DE FOTOGONIÓMETRO PARA LÁMPARAS DE BAJA POTENCIA," vol. 4, pp. 9– 18, 2016.
- [7] M. M. Barraza, "DESARROLLO DE UN GONIOFOTÓMETRO PARA ANALISIS DE SISTEMAS DE ILUMINACION," 2018.
- [8] V. F. Muñoz, J. G. de G. Gabriel, J. F. Lozano., R. M. Mesa., and J. S. Barba, "MODELO CINEMATICO DE UN GONIOFOTOMETRO DE DOBLE REFLEXION."
- [9] J. David, C. Torres, W. Fernando, R. Rodríguez, H. Armando, and C. Franco,
   "Diseño y construcción de un fotogoniómetro para el laboratorio de iluminacion de la Universidad Distrital, Sede tecnológica.," pp. 173–187, 2014.
- [10] V. Muñoz, G. de G. J, J. Fernández, R. Molina, and J. Serón, "Desarrollo de un Goniofotómetro para caracterización de luminarias."
- [11] A. H. Ghazali, N. H. M. Rahim, Y. S. Harmin, T. S. Jalal, and S. S. Lip, "Control System Development for Goniophotometer," 2007 5th Student Conf. Res. Dev. SCORED, no. December, pp. 1–4, 2007.

- [12] P. Singh, C. Singh, and R. R. Singh, "LabVIEW-based cost effective multi-axis motion control system," *Proc. - 2011 Annu. IEEE India Conf. Eng. Sustain. Solut. INDICON-2011*, no. Idc, 2011.
- [13] F. Sametoglu, "Construction of two-axis goniophotometer for measurement of spatial distribution of a light source and calculation of luminous flux," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 119, no. 6, pp. 783–791, 2011.
- [14] A. Arias, J. L. Ealo-cuello, and E. Caicedo, "Diseño, construcción y calibración de un fotogoniómetro para la empresa colombiana de luminarias Roy Alpha S. A.," *Ing. y Compet.*, vol. 9, no. 1, pp. 45–56, 2007.
- [15] R. McCluney, "Ross McCluney-Introduction to radiometry and photometry-Artech House (1994).pdf.".
- [16] M. P. E. Tinoco, "Propuesta de un Laboratorio para Pruebas Fotometricas a Luminarios LED," 2013.
- [17] E. Y. Pineda, "Diseño de Instalaciones Luminicas Mediante el Software Visual," 2008.
- [18] D. Madrid, "Guía Técnica de Iluminación Eficiente Sector Residencial y Terciario."
- [19] C. Guaman, M. Paul, P. Murillo, and N. Christos, "Diseño de iluminación con luminarias tipo LED," 2015.
- [20] J. J. S. Rodriguez, "Desarrollo de Software de control y medida para Goniofotómetro de tipo B," 2015.
- [21] C. Laszlo, "Luminotecnia para interiores."
- [22] H. B. S. Segundo, "Luminarias: conceptos basicos y caracterización."
- [23] M. Rivero, Nicolás; Cardozo, Andrés; Pérez, Guzmán; Sellanes, "Medida de Flujo Luminoso en Esfera de Ulbricht. Estudio de Incertidumbres. Intercomparación con Cálculo por Integración.," Inst. Ing. Eléctrica. Univ. Ia

República, pp. 1-9.

- [24] N. F. Rivero Rodríguez, "Evaluación de performance de un sistema de posicionado angular de bajo costo," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 4, no. 3, pp. 184– 191, 2006.
- [25] M. M. Barraza, "Anteproyecto de Tesis," Instituto Tecnologico de Chihuahua, 2015.
- [26] J. P. Gutiérrez, "Registrador de datos de bajo coste," 2013.
- [27] S. Yang and X. Xiang, "Position Control System Design Based on LabVIEW," pp. 1–3, 2011.
- [28] R. W. Larsen, LabVIEW for Engineers. .
- [29] N. Instruments, "LabVIEW User Manual," no. 320999, 2003.
- [30] J. Jerome, VIRTUAL INSTRUMENTATION USING LabVIEW. .
- [31] S. Valera, J. Eduardo, G. Enríquez, and J. Guillermo, "Instrumentación Proyecto Final ITVER," 2013.
- [32] J. Manuel and R. Gutiérrez, "Utillizacion de Labview para la Visualizacion y Control de la Plataforma Open Hardware Arduino."
- [33] I. Manual, *LI-210R Photometric Sensor*. Lincoln, Nebraska, 2015.
- [34] LI\_COR, "certificado de calibracion del sensor.pdf.".
- [35] N. Instruments, "GPIB Tutorial," pp. 11–18, 1987.
- [36] Q. Xuewu and C. Tijing, "Design and Implementation of Data Acquisition System Based on Agilent 3458A," pp. 5–8, 2013.
- [37] K. Technologies, "3458A Multimeter User's Guide."
- [38] I. Lm- *et al.*, "Standard File Format for the Electronic Transfer of Photometric Data," pp. 1–17, 2002.

[39] C. Andr, E. Energ, F. V. Esp, E. Energ, F. Recepci, and F. Aprobaci, "Metodología para cuantificación de luz intrusa en fotometrías obtenidas en un goniofotómetro," pp. 43–46, 2016.

# CARACTERISTICAS TARJETA ARDUINO MEGA 2560

Arduino es una plataforma de hardware libre para el desarrollo de proyectos, desde los más pequeños hasta los más elaborados. Una amplia comunidad de estudiantes, programadores y profesionales se han reunido alrededor de esta plataforma de código abierto y han añadido una gran cantidad de conocimiento accesible, el cual puede ser de gran utilidad tanto para principiantes como para expertos.

El lenguaje de programación utilizado en arduino está basado en C++ lo cual facilita la programación del microcontrolador debido a que se trata de un lenguaje de alto nivel, es por esto que se ha hecho tan popular entre programadores y electrónicos para el desarrollo de proyectos.

A continuación se muestra una tabla con las principales características técnicas de la placa Arduino Mega, la cual es proporcionada por la página web del fabricante:

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 КВ
Clock Speed	16 MHz

Tabla de Características técnicas Arduino Mega 2560

# TABLAS DE DATOS DE FUENTES DE ALIMENTACION

Power Supply Specification	
Output Voltage(V)	36
Power(W)	350
Max. Output Current(A)	9.8
Input Voltage(V)	115/230
Physical Specification	
Weight(g)	1100

Tabla de datos técnicos fuente S-350-36

#### Tabla de datos técnicos fuente S-350-60

Power Supply Specification	
Output Voltage(V)	60
Power(W)	350
Max. Output Current(A)	5.9
Input Voltage(V)	115/230

# TABLAS DE DATOS DE LOS CONTROLADORES

Input voltage	18-50VDC
Input current	< 4A
Output current	1.0A~4.2A
Consumption	Consumption : 80W ; Internal Insurance : 6A
Temperature	Working Temperature -10 ~ 45°C;
Temperature	Stocking temperature -40°C ~ 70°C
Humidity	Not condensation, no water droplets
gas	Prohibition of combustible gases and conductive dust
weight	200G

### Tabla de especificaciones eléctricas controlador DQ542MA

### Tabla de especificaciones eléctricas DQ860MA

Input voltage	24-80VDC
Input current	< 6A
Output current	2.8A ~ 7.8A
Consumption	Consumption : 80W ; Internal Insurance : 10A
Temperature	Working Temperature -10 ~ 45°C ; Stocking temperature -40°C ~ 70°C
Humidity	Not condensation, no water droplets
gas	Prohibition of combustible gases and conductive dust
weight	500G

# **DESCRIPCION DE LIBRERÍA LIFA**

### Init

Esta función inicia la conexión con la tarjeta arduino y permite configurar algunas de sus características, viene con parámetros definidos por defecto, sin embargo es posible modificarlos. Este módulo es imprescindible para cualquier programa con arduino.

Context Help	
[C:\tional Instruments\LabVIEW 2	Init 2015\vi.lib\LabVIEW Interface for Arduino\Init.vi]
VISA resource Baud Rate (115200) Board Type (Uno) Bytes Per Packet (15) Connection Type (USB/Serial) error in	Arduino Resource

### Close

Este módulo finaliza la conexión con la tarjeta arduino



## Digital write pin

Por medio de esta función se escribe el valor especificado en la salida digital seleccionada (D0-D13).

Context Help
Digital Write Pin [C:\IEW 2015\vi.lib\LabVIEW Interface for Arduino\Low Level\Digital Write Pin.vi]
Arduino Resource Digital I/O Pin (0) Value (0) error in

### **Digital read pin**

Lee el valor de una entrada digital designada mediante el parámetro "Digital I/O" y saca el valor en la salida "Value"

Context Help
Digital Read Pin [C:\VIEW 2015\vi.lib\LabVIEW Interface for Arduino\Low Level\Digital Read Pin.vi]
Arduino Resource Digital I/O Pin (0)

### **Stepper configure**

Por medio de esta función se especifica una salida para conectar un motor



### **Stepper close**

Cierra la conexión entre arduino y el motor

Context Help
Stepper Close [C:\s\LabVIEW 2015\vi.lib\LabVIEW Interface for Arduino\Sensors\Stepper Close.vi
Stepper # Arduino Resource error in error out
### Stepper write

Escribe la cantidad de pasos a girar, la velocidad de generación de los pasos y el motor a activar

Context Help	
Stepper Write [C:\s\LabVIEW 2015\vi.lib\LabVIEW Interface for Arduino\S	Sensors\Stepper Write.v
Stepper # Arduino Resource # of Steps to Move Set Speed (Steps per Second) error in Set Acceleration (0 to disa	ource Out

## Stepper ToGo

Esta función indica en su salida la cantidad de pasos que faltan para cumplir con la cantidad indicada



### Stepper wait till steps complete

Espera hasta que el motor termine el movimiento de todos los pasos indicados para girar



# **ANEXO 5**

# **DESCRIPCION DE DRIVERS PARA MULTIMETRO 3458A**

### Initialize

Esta función sirve para establecer comunicación entre la PC y el instrumento.

Context Help		
Initialize.vi		
VISA resource name under the second s		

#### Close

Esta función hace una verificación de errores y posteriormente finaliza la comunicación con el instrumento.

Context Help			
Close.vi			
VISA resource name			
error in (no error)			

#### **Read Measurement**

Con esta función se manda la instrucción para que el multímetro realice una o más mediciones.

Context Help		
Read Measurement.vi		
VISA resource name WISA resource name out error in (no error)		
Reads one or more measurements from the DMM.		

## **Configure Measurement**

Por medio de esta función se configura el tipo de medición que se va a realizar, la resolución, el rango y la frecuencia.

Context Help	
Configure Mea	surement.vi
Manual Resolution (2: 6.5 VISA resource name Function (0: DC Voltage) Frequency Source (3: AC Vol Auto Range (1:ON) error in (no error) Manual Range (1.00)	3365 3665 47 47 47 47 47 47 47 47 47 47 47 47 47

## **Configure Multipoint**

Por medio de esta función se configura el número de mediciones a tomar y el tipo de disparo.



## **Configure Integration**

Context Help				
Configure Integration.vi				
VISA resource name	resource name out out			

Con esta función se configura el tiempo de integración por medio del número de PLCs (Power Line Cycles), entre menor sea el tiempo de integración, mayor será la velocidad de las mediciones.