

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

***“ESTUDIO Y MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN PAR
CON INSTRUMENTOS CONVENCIONALES”***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

***MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA EN
ELECTRÓNICA***

PRESENTA:

***ING. MOISÉS MIGUEL ANGEL NORIEGA
GARDEA***

DIRECTOR DE LA TESIS:

DR. LUIS FRANCISCO CORRAL MARTÍNEZ



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE
MÉXICO**



CHIHUAHUA, CHIH., DICIEMBRE 2018

Chihuahua, Chihuahua a 13 de diciembre de 2018

Dr. Enrique Cabrero Mendoza
Director de CONACYT.

Atn. Mtro. Pablo Rojo Calzada
Director de Becas

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.

A t e n t a m e n t e

Moisés Miguel Angel Noriega Gardea
Exbecario CONACYT

c.c.p. M.F. Luis Cardona Chacón

Jefe de la División de Posgrado e Investigación

RESUMEN

ESTUDIO Y MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN PAR CON INSTRUMENTOS CONVENCIONALES

Ing. Moisés Miguel Angel Noriega Gardea
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica
División de Estudios de Posgrado e Investigación del
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Chihuahua, Chih., 2018
Director de Tesis: Dr. Luis Francisco Corral Martínez

La radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) es la fracción del espectro electromagnético comprendida entre los 400 y 700 nanómetros que es aprovechada por algunos organismos como plantas y algas para llevar a cabo la fotosíntesis, por lo que su estudio es de vital importancia para el cultivo de plantas en ambientes naturales y controlados.

El presente trabajo tiene como objetivo la medición de la radiación PAR de manera indirecta, utilizando instrumentos fotométricos convencionales como el luxómetro. En este trabajo se muestra el proceso de caracterización de diversas fuentes de iluminación tipo LED, para las cuales se utilizaron un luxómetro, una esfera integradora y un detector cuántico, dichas caracterizaciones sirvieron como base para el desarrollo de un programa en el software LabVIEW del cual se obtuvieron dos constantes de calibración respectivas para cada una de las fuentes de iluminación analizadas. Al multiplicar la lectura obtenida con el luxómetro por las constantes de calibración se obtuvo el valor indirecto de la radiación PAR. Se muestra también el desarrollo de un luxómetro de bajo costo utilizando el detector fotométrico BH1750, el cual fue tratado para igualar sus lecturas con las de un luxómetro comercial. Se muestra la comparación entre los resultados de mediciones directas e indirectas. Las mediciones indirectas para niveles altos de operación con el luxómetro comercial tuvieron un error del 12% al 4.66%, mientras que para el de bajo costo los errores fueron de 5.31% a 0.79%. Los resultados mostrados demuestran que el método propuesto para la medición indirecta de la radiación PAR es de gran eficacia al prácticamente igualar las lecturas indirectas con las directas.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABLAS.....	x
INTRODUCCIÓN.....	xii
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.....	1
1.1 Fotosíntesis.....	1
1.2 Radiación fotosintéticamente activa.....	3
1.3 Radiometría y fotometría.....	5
1.4 Magnitudes radiométricas y fotométricas.....	8
1.4.1 Magnitudes radiométricas.....	8
1.4.2 Magnitudes fotométricas.....	9
1.5 Responsividad.....	11
1.6 Responsividad espectral.....	11
1.7 Medidores comerciales.....	11
1.8 Trabajos Realizados.....	13
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 Diodo Emisor de Luz.....	17
2.1.1 Ventajas de fuentes de iluminación led.....	19
2.1.2 Desventajas de fuentes de iluminación led.....	19
2.1.3 Uso de ledes en cultivo de plantas.....	20
2.2 Esfera integradora.....	20
2.2.1 Espectrorradiómetro.....	22
2.3 Luxómetro.....	23
2.4 Sensores fotónicos.....	24
2.5 Sensores cuánticos.....	25
2.6 Medición de la radiación.....	28
2.7 Sensor cuántico LI-190R.....	30
2.7.1 Características/Funcionamiento sensor LI-190R.....	31
2.8 Fotorresistencia.....	32
2.9 Arduino.....	33
2.9.1 Arduino Uno.....	34
CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LUMINARIAS EN EL RANGO PAR.....	36
3.1 Fuentes de iluminación led seleccionadas.....	36
3.1.1 ledes alta potencia led World base tipo estrella.....	37
3.1.2 Driver LED QH-20LP6-10X3W.....	38
3.1.3 Tira de ledes rojo-azul HCSOYES.....	38

3.2	Caracterización de fuentes de iluminación.....	40
3.2.1	Caracterización eléctrica.....	40
3.2.2	Caracterización fotométrica.....	42
3.3	Comportamiento de las fuentes de iluminación ante diferentes instrumentos de medición.....	43
3.4	Tablas de caracterización de las fuentes de iluminación.....	46
CAPÍTULO IV. DESARROLLO DEL MEDIDOR DE RADIACIÓN PAR.....		49
4.1	Desarrollo del modelo matemático.....	49
4.1.1	Medición del flujo fotónico.....	51
4.1.2	Medición del flujo luminoso.....	52
4.1.3	Relación entre flujo fotónico y flujo luminoso.....	53
4.1.4	Implementación completa en LabVIEW.....	54
4.2	Constantes obtenidas para el cálculo de la radiación PAR.....	55
4.2.1	Mediciones realizadas a partir de las ecuaciones obtenidas.....	56
4.3	Desarrollo luxómetro de bajo costo.....	57
4.4	Pruebas con luxómetro de bajo costo y esfera integradora.....	63
4.5	Pruebas realizadas fuera de la esfera integradora.....	63
4.6	Mediciones realizadas con cultivos iluminados artificialmente.....	65
4.7	Corrección de errores en mediciones fuera de la esfera integradora.....	68
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y VALIDACIÓN.....		71
5.1	Obtención de constantes de medición.....	71
5.2	Comparación de medición indirecta con luxómetro y constantes auxiliares con medición directa con sensor cuántico dentro de la esfera integradora.....	74
5.3	Comparación de medición indirecta con sensor BH1750 y constantes auxiliares con medición directa con sensor cuántico dentro de la esfera integradora.....	76
5.4	Comparación de medición indirecta con luxómetro y constantes auxiliares con medición directa con sensor cuántico fuera de la esfera integradora.....	78
5.5	Comparación de medición indirecta con sensor BH1750 y constantes auxiliares con medición directa con sensor cuántico fuera de la esfera integradora.....	79
5.6	Medición diferencial y comparación medición en estructura para germinación de plantas con los tres instrumentos de medición.....	80
5.7	Igualación de lecturas del sensor BH1750 con las lecturas del luxómetro comercial.....	81
5.8	Corrección de errores en mediciones fuera de la esfera integradora.....	82
5.9	Medición simultánea fuera de la esfera integradora.....	85
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....		88
	Trabajo a futuro.....	90
REFERENCIAS.....		91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Reacción general de la fotosíntesis.....	2
Figura 1.2	Representación gráfica del ciclo de Calvin.....	3
Figura 1.3	Espectro electromagnético y sus diferentes porciones en frecuencia y longitud de onda....	6
Figura 1.4	Función luminosa espectral $V(\lambda)$ para el estándar de 1924 de la CIE.....	7
Figura 2.1	Estructura básica de un led.....	18
Figura 2.2	Esfera integradora.....	21
Figura 2.3	Espectrorradiómetro.....	22
Figura 2.4	Luxómetro.....	23
Figura 2.5	Curva de respuesta cuántica espectral.....	27
Figura 2.6	Adquisición de señal de un detector.....	30
Figura 2.7	Sensor LI-COR LI-190R.....	31
Figura 2.8	Arduino Uno.....	34
Figura 3.1	Ledes tipo estrella marca led World.....	37
Figura 3.2	Tira de ledes rojo-azul marca HCSOYES.....	39
Figura 3.3	Fuente de voltaje DC marca Keysight modelo 6655.....	41
Figura 3.4	Ejemplo de obtención de características fotométricas para la tira de ledes.....	43
Figura 3.5	Sensores insertados en los puertos de la esfera integradora.....	45
Figura 3.6	Ejemplo de medición con diferentes instrumentos. a) Sensor cuántico. b) Luxómetro.....	45
Figura 4.1	Datos obtenidos de la esfera integradora.....	50
Figura 4.2	Obtención de datos y grafica de espectro de iluminación.....	50
Figura 4.3	Cálculos realizados en LabVIEW para la aproximación cuántica.....	52
Figura 4.4	Cálculos realizados en LabVIEW para la aproximación fotométrica.....	53
Figura 4.5	Cálculos realizados en LabVIEW para la aproximación fotométrica.....	54
Figura 4.6	Implementación en LabVIEW.....	55
Figura 4.7	Fotorresistencia y sensor BH1750.....	58
Figura 4.8	Arreglo practico para caracterización de fotorresistencia.....	58
Figura 4.9	Circuito experimental para caracterización eléctrica de la fotorresistencia.....	59
Figura 4.10	Conexión entre sensor BH1750 y tarjeta Arduino Uno.....	60
Figura 4.11	Ejemplo de medición con el luxómetro desarrollado.....	60
Figura 4.12	Espejo frio de 45°.....	61

Figura 4.13	Arreglo experimental para las pruebas con el espejo frío.....	62
Figura 4.14	Ejemplo de iluminación media de ambos instrumentos.....	62
Figura 4.15	Montaje practico para mediciones fuera de la esfera integradora.....	64
Figura 4.16	Distribución de lámparas en el laboratorio de sistemas de iluminación.....	66
Figura 4.17	Estructura para germinación de plantas con iluminación tipo led.....	66
Figura 4.18	a) Geometría de los instrumentos de medición. b) Puertos de esfera integradora.....	68
Figura 4.19	Calculo de dimensiones y triángulos semejantes.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Regiones del espectro electromagnético de acuerdo a la CIE.....	6
Tabla 2.1	Materiales utilizados para diferentes colores de ledes.....	19
Tabla 2.2	Características técnicas de Arduino Uno.....	35
Tabla 3.1	Características led rojo y led amarillo.....	38
Tabla 3.2	Características led verde y led rojo profundo.....	38
Tabla 3.3	Características driver led QH-20LP6-10X3W.	38
Tabla 3.4	Características tira de ledes.	40
Tabla 3.5	Características eléctricas fuentes de iluminación.	42
Tabla 3.6	Características fotométricas fuentes de iluminación.....	43
Tabla 3.7	Valores máximos y mínimos de operación.....	44
Tabla 3.8	Comportamiento del led rojo frente a los diferentes instrumentos de medición.....	46
Tabla 3.9	Comportamiento del led amarillo frente a los diferentes instrumentos de medición.....	47
Tabla 3.10	Comportamiento del led verde frente a los diferentes instrumentos de medición.....	47
Tabla 3.11	Comportamiento del led rojo profundo frente a los diferentes instrumentos de medición.....	47
Tabla 3.12	Comportamiento de la tira de ledes frente a los diferentes instrumentos de medición.....	48
Tabla 5.1	Datos utilizados para el cálculo de las constantes auxiliares del led rojo.....	71
Tabla 5.2	Datos utilizados para el cálculo de las constantes auxiliares del led amarillo.....	72
Tabla 5.3	Datos utilizados para el cálculo de las constantes auxiliares del led verde.....	72
Tabla 5.4	Datos utilizados para el cálculo de las constantes auxiliares del led rojo profundo.....	72
Tabla 5.5	Datos utilizados para el cálculo de las constantes auxiliares de la tira de ledes.....	73
Tabla 5.6	Constantes auxiliares obtenidas para cada fuente de iluminación.....	74
Tabla 5.7	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo dentro de la esfera integradora.....	75
Tabla 5.8	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo profundo dentro de la esfera integradora.....	75
Tabla 5.9	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para la tira de ledes dentro de la esfera integradora.....	76
Tabla 5.10	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo dentro de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.....	76
Tabla 5.11	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo profundo dentro de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.....	77
Tabla 5.12	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para la tira de ledes dentro de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.....	77
Tabla 5.13	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo fuera de la esfera integradora.....	78
Tabla 5.14	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo profundo fuera de la esfera integradora.....	78

Tabla 5.15	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para la tira de ledes fuera de la esfera integradora.....	79
Tabla 5.16	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo fuera de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.....	79
Tabla 5.17	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo profundo fuera de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.....	80
Tabla 5.18	Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para la tira de ledes fuera de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.....	80
Tabla 5.19	Promedios de las mediciones diferenciales dentro de la estructura con iluminación artificial.....	81
Tabla 5.20	Diferencias entre mediciones dentro de la estructura.....	81
Tabla 5.21	Adecuación de la salida del sensor BH1750.....	82
Tabla 5.22	Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para el led rojo usando el luxómetro.....	82
Tabla 5.23	Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para el led rojo profundo usando el luxómetro.....	83
Tabla 5.24	Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para la tira de ledes usando el luxómetro.....	83
Tabla 5.25	Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para el led rojo usando el sensor BH1750.....	83
Tabla 5.26	Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para el led rojo profundo usando el sensor BH1750.....	84
Tabla 5.27	Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para la tira de ledes usando el sensor BH1750.....	84
Tabla 5.28	Equivalencias entre lecturas de ambos luxómetros.....	85
Tabla 5.29	Comparación de medición simultanea de radiación PAR fuera de la esfera integradora para el led rojo profundo.....	85
Tabla 5.30	Comparación de medición simultanea de radiación PAR fuera de la esfera integradora para la tira de ledes.....	86
Tabla 5.31	Comparación de medición simultanea de radiación PAR fuera de la esfera integradora para la tira de ledes de la estructura.....	86
Tabla 6.1	Resumen de errores porcentuales obtenidos durante las mediciones de radiación PAR indirecta.....	89

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se describe el proceso llevado a cabo para medir de manera indirecta la radiación fotosintéticamente activa emitida por algunas de las fuentes de iluminación tipo led más utilizadas en la iluminación de cultivos en interiores. La tesis se divide en seis capítulos, los cuales se describen de manera breve a continuación.

En el capítulo I se hace una pequeña descripción de los conceptos y magnitudes utilizados a lo largo del desarrollo del presente trabajo; se mencionan de manera breve algunos de los medidores de radiación existentes en el mercado. Por último se mencionan algunos trabajos realizados con anterioridad de temática similar a este trabajo.

En el capítulo II se presenta de manera extendida la información referente a las fuentes de iluminación utilizadas para el desarrollo del trabajo. Se describen también una explicación detallada del funcionamiento de los instrumentos de medición utilizados durante el desarrollo de este trabajo de tesis como luxómetro, esfera integradora, detector cuántico, entre otros, con el fin de comprender de manera clara el uso que tuvieron durante el proceso de la investigación.

En el capítulo III se presenta la selección de las fuentes de iluminación seleccionadas para su caracterización. Se muestra también la metodología llevada a cabo con los instrumentos de medición para la caracterización de las fuentes de iluminación seleccionadas. Por último se muestra el comportamiento de las fuentes de iluminación seleccionadas ante los diferentes instrumentos de medición.

El capítulo IV contiene el proceso llevado a cabo para la implementación de un sistema de medición en LabVIEW con los datos de las mediciones descritas en el capítulo III, del cual se obtuvieron dos constantes de calibración para la medición indirecta de la radiación PAR. Se describe también el desarrollo de un luxómetro de bajo costo. También se hace una descripción de las mediciones indirectas de la radiación PAR en condiciones controladas y no controladas. Por último se muestran los cálculos llevados a cabo para la eliminación de los errores cometidos durante las mediciones en condiciones no controladas.

El capítulo V contiene los resultados obtenidos de las mediciones realizadas sobre las fuentes de iluminación seleccionadas. Se muestran en primer lugar los datos utilizados para la obtención de las constantes de calibración, después se muestran los resultados de la medición indirecta de la radiación PAR en condiciones controladas y no controladas. Por último se muestran las mediciones indirectas de la radiación PAR en condiciones no controladas luego de ser eliminados los errores.

En el capítulo VI se exponen las conclusiones a las que se llegó durante el desarrollo de este trabajo, así como una breve propuesta del trabajo a futuro a realizar.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

En este capítulo se presentan una pequeña introducción acerca de la metodología llevada a cabo en el presente trabajo, así como las bases teóricas que sirven como fundamento para este, con el fin de comprender el mismo de manera clara. Se describe el concepto de fotosíntesis, radiación PAR, así como algunos conceptos básicos de fotometría y radiometría, también se mencionan algunos medidores comerciales de radiación y algunos trabajos realizados con anterioridad que están relacionados con el presente trabajo.

1.1 Fotosíntesis

La fotosíntesis puede ser definida como un proceso físico-químico mediante el cual los organismos fotosintéticos, como las plantas, las algas y las bacterias fotosintéticas utilizan la radiación emitida por el sol para sintetizar compuestos orgánicos, a partir de los cuales se produce el alzamiento y acumulación de las diferentes partes de la planta, así como su mantenimiento.

En plantas, algas y algunos tipos de bacterias fotosintéticas este proceso implica la liberación de oxígeno molecular y la utilización de dióxido de carbono de la atmósfera para la síntesis de diversos compuestos orgánicos los cuales constituyen su alimento. Este proceso es conocido como fotosíntesis oxigénica.

Por otro lado, algunos tipos de bacterias utilizan la energía de la luz solar para formar compuestos orgánicos, pero no producen oxígeno. Este caso es conocido como fotosíntesis anoxigénica.

La fotosíntesis es un proceso endergónico ya que se necesita de la participación de la energía del sol para que comience la cadena de reacciones que llevan a la formación de los compuestos orgánicos que almacena el organismo [1, 2].

En la siguiente figura se muestra la reacción general de la fotosíntesis.

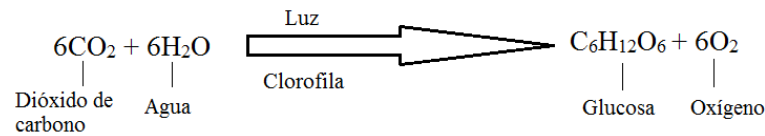
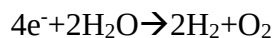


Figura 1.1 Reacción general de la fotosíntesis.

La fotosíntesis se ve afectada por múltiples factores medioambientales, por ejemplo la intensidad de la luz, la humedad del aire, la temperatura, la disponibilidad de agua, entre otros [2].

El proceso de la fotosíntesis puede ser separado en dos reacciones: luminosa y oscura.

Durante la reacción luminosa, la energía luminosa del sol o cualquier otra fuente de iluminación es capturada por la clorofila presente en los cloroplastos y es transportada a los fotosistemas. En los fotosistemas, con la energía capturada se crea una reacción química donde se forma ATP (adenosín trifosfato) y NADH (nicotinamida adenina dinucleótido) que son necesarias para la asimilación del CO_2 en la reacción oscura. Los electrones que se liberan al incidir la energía radiante se encargan de separar la molécula del agua de acuerdo a la siguiente reacción.



La reacción oscura o ciclo de Calvin se divide en tres etapas y se muestra de manera gráfica en la Figura 1.2.

1. Fijación del carbono. El CO_2 se combina con una molécula de ribulosa-1,5-bifosfato (RuBP), formando dos moléculas de 3-fosfoglicerato (3-PGA).
2. Reducción. En esta etapa, las moléculas ATP y NADH son utilizadas para convertir las moléculas de 3-PGA en moléculas de azúcar de tres carbonos gliceraldehído -3-fosfato (G3P). Esta etapa es llamada así porque la molécula NADH debe donar o reducir sus electrones para formar G3P.

3. Regeneración. En esta etapa, algunas moléculas son utilizadas para formar glucosa mientras que otras son utilizadas para regenerar la molécula RuBP. Esta regeneración utiliza nuevamente la molécula ATP [1, 2].

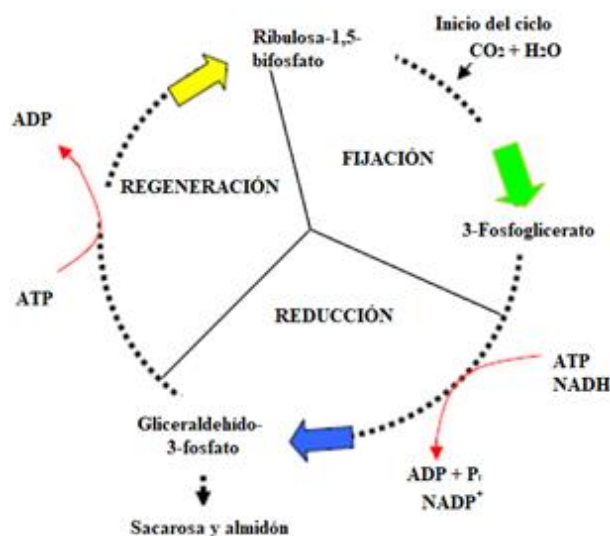


Figura 1.2 Representación gráfica del ciclo de Calvin.

1.2 Radiación fotosintéticamente activa

La radiación fotosintéticamente activa o PAR (por sus siglas en inglés *Photosynthetically Active Radiation*) es la fracción del espectro electromagnético comprendida en el rango de los 400 nm a los 700 nm la cual es capaz de producir actividad fotosintética en organismos fotosintéticos, siendo las plantas los organismos más comunes de este tipo. La radiación contenida en este rango puede ser utilizada para generar los electrones encargados de la disociación de la molécula del agua durante la reacción luminosa de la fotosíntesis.

Sin embargo, otras longitudes de onda y fotones fuera de este rango como las radiaciones ultravioleta e infrarroja pueden afectar los componentes celulares de estos organismos, lo cual trae como consecuencia la importancia de estudiar las condiciones de iluminación aplicadas a organismos fotosintéticos [3]. Debido a lo anterior, la radiación PAR es frecuentemente utilizada como variable de entrada en modelos de simulación del crecimiento y productividad de las plantas [4].

Los organismos fotosintéticos absorben la radiación PAR por medio de sus diferentes pigmentos foliares como la clorofila (a y b), xantofilas, carotenoides y antocianos. La clorofila, que es el pigmento más abundante de las plantas absorbe con mayor eficiencia las longitudes de onda correspondientes a los colores rojo y azul, mientras que los carotenos y xantofilas absorben algo de luz verde para el proceso fotosintético, pero la mayoría de estas longitudes de onda son reflejadas [2].

La radiación PAR está definida en términos de densidad de flujo de fotones fotosintéticos o PPFD por sus siglas en inglés. La irradiancia fotónica es expresada en moles por metro cuadrado por segundo ($\text{moles/m}^2\cdot\text{s}$). Para una longitud de onda dada de irradiación de luz monocromática en términos de $\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ y W/m^2 se puede hacer una conversión utilizando la ecuación de Planck:

$$P = \frac{N_A h n c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Donde P es la potencia electromagnética entregada, expresada en una superficie específica (W/m^2), N_A es el número de Avogadro ($6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), n es el número de moles de cuantos por segundo en una superficie específica ($\text{moles/m}^2\cdot\text{s}$), h es la constante de Planck ($6.262 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$), c es la velocidad de la luz en el vacío ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) y λ es la longitud de onda (m).

A menos que la longitud de onda se especifique no es posible convertir irradiancia PAR expresada en W/m^2 a PPFD en $\text{moles/m}^2\cdot\text{s}$ y viceversa [4, 5, 6].

La radiación PAR en la superficie terrestre tiene dos componentes principales, difusa y directa, que son significativamente afectadas por la cantidad de nubes en la atmósfera, estas dos componentes difieren en la manera en que transfieren energía a través del dosel arbóreo de zonas boscosas o selváticas, afectando así los procesos de fotosíntesis del dosel de las hojas de manera diferente de lo que ocurre a escala foliar (plantas de piso) [7].

La componente directa está formada por fotones que pasan a través de la atmósfera sin dispersarse, mientras que la componente difusa consiste de fotones que se han dispersado por

las moléculas del aire o las nubes. Mientras las dos componentes penetran el dosel arbóreo, los fotones que golpean las hojas y otras partes de las plantas son interceptados.

El flujo de fotones que golpea las plantas se conoce como radiación PAR interceptada y se denota como IPAR. Solo la fracción interceptada de la radiación constituye una fuente de energía potencial para la fotosíntesis, sin embargo, no todo este potencial se completa ya que una fracción de radiación siempre es reflejada o transmitida por el elemento o planta que la intercepta. Después de ser transmitidos o reflejados, los fotones pueden escapar de la vegetación sin contribuir a la fotosíntesis.

Solo los fotones que son absorbidos por el dosel arbóreo de las plantas constituyen el flujo de radiación PAR absorbida o APAR y pueden ser utilizados para la fotosíntesis. Regularmente se señala que la radiación PAR absorbida es menor que la radiación PAR interceptada de manera constante, así $APAR = 0.85 IPAR$ ha sido propuesta para cálculos de eficiencia de uso de radiación [8].

1.3 Radiometría y fotometría

La radiometría puede definirse como un sistema de conceptos, terminología, relaciones matemáticas, instrumentos de medición y unidades de medida empleados para describir y medir radiación y su interacción con la materia.

Es importante mencionar que aunque los conceptos de radiometría pueden ser utilizados para describir radiación nuclear, la cual incluye campos de flujo de partículas energéticas, estos se utilizan generalmente solo para describir radiación electromagnética.

En radiometría y fotometría, se debe tener en cuenta como se distribuye la radiación a lo largo del espectro electromagnético. Dicho espectro está dividido en diferentes secciones de interés o estudio, estas secciones se clasifican periódicamente de acuerdo ya sea a su longitud de onda λ o a su frecuencia ν . La Figura 1.3 muestra los intervalos de longitud de onda del espectro electromagnético.

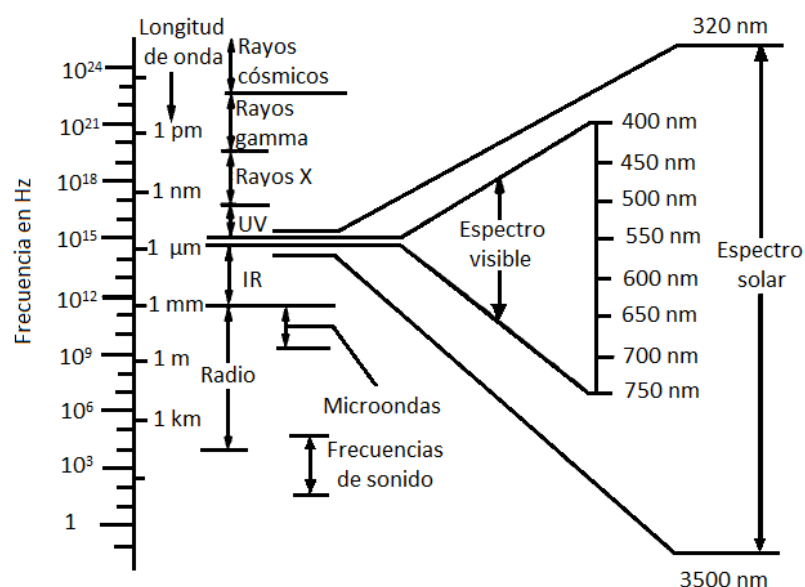


Figura 1.3 Espectro electromagnético y sus diferentes porciones en frecuencia y longitud de onda.

Estas secciones han sido estandarizadas por la Comisión Internacional de Iluminación (*Comission Internationale de l'Eclairage*, CIE), también ha estandarizado la terminología mostrada en la Tabla 1.1 para las porciones del espectro que contiene la parte visible más ocupada en radiometría y fotometría.

Tabla 1.1 Regiones del espectro electromagnético de acuerdo a la CIE.

Nombre	Rango de longitudes de onda
UV-C	100 a 280 nm
UV-B	280 a 315 nm
UV-A	315 a 400 nm
Visible	Aproximadamente 360-400 a 760-800 nm
IR-A	780 a 1400 nm
IR-B	1.4 a 3 μm
IR-C	3 μm a 1 mm

En la Figura 1.3 se muestra el rango visible dentro del espectro electromagnético, este rango es estudiado por la fotometría, la cual puede definirse o puede ser pensada como una

ramificación de la radiometría la cual se dedica al estudio de la parte del espectro electromagnético al cual es sensible el ojo humano.

Para comprender mejor la fotometría primero se debe estudiar la respuesta del ojo humano a diferentes longitudes de onda. Luego de que la luz pasa a través de la córnea, el humor vítreo, el iris y el cristalino, es recibida en la retina, la cual contiene receptores de dos tipos: conos y bastones, los cuales contienen foto pigmentos que absorben la radiación luminosa. Dicha radiación es convertida dentro de los receptores en señales electroquímicas que son transmitidas a las neuronas, el nervio óptico, y/o al cerebro.

Los conos son responsables de que podamos ver los colores, así como de la vista diurna; este tipo de visión es conocida como visión fotópica. Los bastones se encargan de la visión nocturna, cuando los niveles de iluminación son bajos, a este tipo de visión se le conoce como visión escotópica

La respuesta espectral de un observador humano bajo condiciones de visión fotópica fue estandarizada en 1924 por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), aunque la respuesta espectral humana varía un poco de persona a persona, se ha adoptado una curva de respuesta estándar como se muestra en la Figura 1.4.

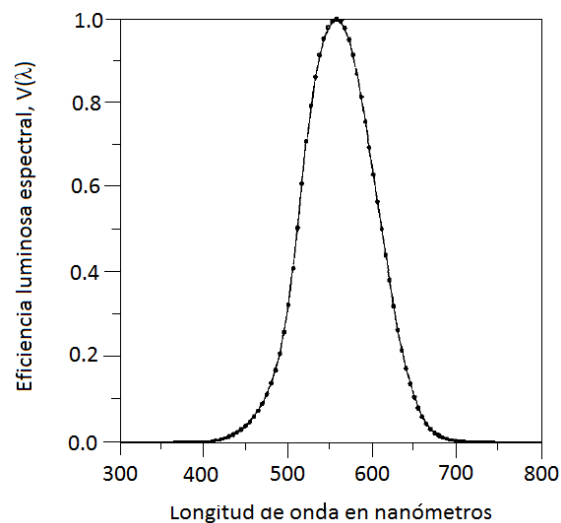


Figura 1.4 Función luminosa espectral $V(\lambda)$ para el estándar de 1924 de la CIE.

Como el símbolo $V(\lambda)$ es normalmente usado para representar esta respuesta espectral, la curva mostrada en la figura anterior es llamada comúnmente curva V de lambda [9].

Mientras que los dispositivos de medición fotométricos como el luxómetro responden a esta curva para tener una respuesta similar a la del ojo humano, los dispositivos utilizados para la medición de la radiación PAR responden a la llamada curva de respuesta cuántica espectral, esta curva es explicada en la sección 2.5 de este trabajo.

1.4 Magnitudes radiométricas y fotométricas

Algunas magnitudes fundamentales de la radiometría son comunes para ésta y para la fotometría, estas magnitudes se describen más adelante con sus símbolos y unidades en el sistema métrico. Primero se listan las magnitudes para cantidades radiométricas y después las magnitudes para cantidades fotométricas.

1.4.1 Magnitudes radiométricas

Las cantidades radiométricas miden el contenido de energía de la radiación. A estas magnitudes se les pone el adjetivo radiante (flujo radiante) para distinguirlas de las magnitudes fotométricas, también se les agrega el subíndice e (Q_e).

Energía radiante Q_e

Es la cantidad de energía propagándose dentro, a través, o emergiendo de una superficie o área dada en un periodo de tiempo dado. Las unidades de la energía radiante son los Joules (J).

Flujo radiante Φ_e

Es la cantidad de energía radiante Q_e emitida, transmitida o recibida por unidad de tiempo t . Las unidades del flujo radiante son los watts (W) (Un watt es un Joule por segundo: $1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$). La ecuación que define al flujo radiante es:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.2)$$

Intensidad radiante I_e

Es la cantidad de flujo radiante Φ_e por unidad de ángulo sólido emitido, propagado o incidido por un punto con una dirección dada. Las unidades de la intensidad radiante son los watt/estereorradián (W/sr). La ecuación que define la intensidad radiante es:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.3)$$

Irradiancia E_e

Es la cantidad de flujo radiante Φ_e que incide sobre un punto en una superficie dada. Las unidades de la irradiancia son los watt/m² (W·m⁻²). La ecuación que define la irradiancia es:

$$\Phi = \frac{dQ}{dS_0} \quad (1.4)$$

La irradiancia también puede ser definida como el flujo radiante que pasa a través de una superficie específica. Cuando la radiación es emitida por la superficie, a la irradiancia se le conoce como exitancia y se representa con la letra M .

Radiancia L_e

Se describe como el flujo radiante Φ_e por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación. Las unidades de la radiancia son W/m²·sr. La ecuación que define la radiancia es:

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega ds} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega ds_0 \cos\theta} \quad (1.5)$$

Donde $ds = ds_0 \cos\theta$ es el área proyectada con una dirección con ángulo θ .

1.4.2 Magnitudes fotométricas

Las cantidades fotométricas son las cantidades radiométricas descritas anteriormente que han sido normalizadas para indicar la respuesta al ojo humano. A estas magnitudes se les

agrega el adjetivo luminosa (intensidad luminosa) para distinguirlas de las magnitudes radiométricas, también se les agrega el subíndice v (Q_v). Las magnitudes fotométricas pueden ser definidas fácilmente en términos de las magnitudes radiométricas mediante la siguiente ecuación:

$$Q_v = 683 \int_{380}^{770} Q_\lambda V(\lambda) d\lambda \quad (1.6)$$

Donde el término 683 es la máxima eficacia luminosa espectral de la radiación para la visión fotópica y Q es cualquier magnitud radiométrica.

Flujo luminoso Φ_v

Es el equivalente al flujo radiante o potencia que provoca una sensación luminosa, es la magnitud básica de la fotometría. Las unidades del flujo luminoso son los lúmenes (lm).

Intensidad luminosa I_v

Es el equivalente a la intensidad radiante, es el flujo luminoso Φ_v que se propaga por unidad de ángulo sólido con una dirección dada. Las unidades de la intensidad luminosa son las candelas (cd) o lumen/estereorradián.

Iluminancia E_v

Es el equivalente a la irradiancia, es el flujo luminoso Φ_v por unidad de área que incide sobre una superficie. Las unidades de la iluminancia son los luxes (lx) o lumen/m². Igual que pasa con la irradiancia y la exitancia radiométricas, el flujo emitido por una superficie es llamado exitancia luminosa y es representada por M_v .

Luminancia L_v

Es el equivalente a la radiancia, también se le suele llamar brillo fotométrico, es el flujo luminoso Φ_v emitido desde una superficie por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación. Las unidades de la luminancia son el lumen/m²·estereorradián (lm/m²·sr) o candela/m² (cd/m²) [9 - 14].

1.5 Responsividad

La responsividad (S) puede ser definida como la relación entre la señal de salida Y de un detector (Volts o Amperes) y su señal de entrada X , por ejemplo, el flujo luminoso (W) o la irradiancia (W/m^2) [15].

$$S = \frac{Y}{X} \quad (1.7)$$

1.6 Responsividad espectral

La responsividad espectral, conocida también como respuesta espectral, se define como la relación de la señal de salida de un detector $dY(\lambda)$, y la señal de entrada del mismo detector $dX(\lambda)$ en función de la longitud de onda λ de la radiación medida [15].

$$S(\lambda) = \frac{dY(\lambda)}{dX(\lambda)} \quad (1.8)$$

1.7 Medidores comerciales

Actualmente existen 3 categorías de dispositivos comerciales que recolectan mediciones continuas de radiación directa y difusa: sistemas de rastreo solar, sombrillas estacionarias y bandas de sombra móviles. Ejemplos de los sistemas de rastreo solar incluyen el Kipp and Zonen 2AP y el Eppley SMT-3 [16].

El rastreador 2AP es un instrumento de seguimiento y posicionamiento confiable y de todo tipo de clima. Puede ser utilizado como un seguidor solar dedicado o como un posicionador basado en computadora. Este rastreador incorpora dos motores de pasos controlados por una microcomputadora. Después de ser configurado como rastreador solar mediante una computadora solo se requieren comprobaciones del reloj interno.

El rastreador 2AP cuenta con una batería de respaldo para reinicio automático después de cortes temporales de energía; si se equipa con un conjunto de puntas y sombreado opcional, el rastreador tiene la capacidad para montar hasta tres piranómetros sombreados [17].

El rastreador solar automático Eppley modelo SMT fue desarrollado para permitir el direccionamiento automático de la incidencia normal de los instrumentos de medición de la radiación solar. Eppley ofrece un kit de sombra que permite el sombreado y la ventilación de piranómetros y pirgeómetros. Este rastreador cuenta con la capacidad de montar sobre el hasta cuatro radiómetros de cavidad AHF [18].

Estos dos sistemas utilizan sistemas motorizados asistidos por computadora para colocar discos sombreados en el camino directo entre el sol y el sensor de medición. Estos dispositivos son muy efectivos, sin embargo tienen un costo de alrededor de \$15000 USD lo que resulta un inconveniente en algunos proyectos de investigación.

Algunos productos que incluyen sombrillas estacionarias incluyen la banda de sombras Eppley SBS y el piranómetro SPN1. La banda de sombras SBS usa una sola banda de sombras posicionada encima de un sensor de radiación para que la radiación directa sea bloqueada continuamente a lo largo del día. Este aparato requiere una construcción precisa y ajustes regulares para garantizar medidas apropiadas de radiación difusa, tiene un costo arriba de \$5000 USD.

El piranómetro SPN1 es un instrumento de medición de radiación solar con una cúpula de vidrio que está diseñado para exposición a largo plazo en exteriores. Es una alternativa barata y eficaz a los piranómetros de sombra y a los rastreadores tradicionales del sol. Este instrumento es muy sencillo de utilizar, no necesita ningún ajuste de rutina o alineación solar y funciona a cualquier latitud. Un calentador interno mantiene la cúpula del piranómetro libre de rocío, hielo y nieve en temperaturas de hasta -20°C , asegurando de esta manera lecturas fiables en condiciones climáticas difíciles.

El piranómetro SPN1 utiliza una matriz de siete sensores de termopila en miniatura y un patrón de sombreado generado por computadora para medir las componentes directas y difusas de la radiación solar incidente; el piranómetro SPN1 calcula la radiación directa restando la radiación difusa de la global. Este instrumento tiene un costo arriba de \$6000 USD [19].

Por último, Irradiance, Inc. produce un sistema de bandas de sombra móvil que bloquea periódicamente la radiación directa y puede medir radiación total incidente, difusa y directa a un precio inicial de \$8750 USD [16].

1.8 Trabajos realizados

La correcta medición de la radiación PAR es muy importante en el área de la biotecnología, ya que es muy utilizada para simular el crecimiento y productividad de las plantas; sin embargo, la medición de esta radiación no se da frecuentemente, esto debido al alto precio y especialización de los instrumentos encargados de medirla. Debido a esta problemática se han desarrollado herramientas y análisis que tienen como propósito estimar el valor de dicha radiación de manera indirecta. Algunas de las contribuciones realizadas se describen a continuación.

Botero et al. [3] desarrollaron una herramienta que utiliza un espectrómetro LR1 de bajo costo que cuenta con un sensor CCD desarrollado por TOSHIBA con una longitud de onda en el rango de 200 nm a 1100 nm para evaluar el alcance y la irradiancia en el rango de la radiación PAR que es de 400 nm a 700 nm. Este tipo de sensores entregan una lectura proporcional a la distribución espectral de potencia (SPD) de la fuente analizada. La distribución espectral de potencia se refiere a la concentración de cualquier cantidad fotométrica o radiométrica en un área en función de la longitud de onda.

El propósito del desarrollo de esta herramienta es mejorar la calidad de información que se puede obtener a partir de experimentos biológicos y también optimizar la adquisición de datos utilizando diversos softwares de computadora.

Para calibrar el espectrómetro se utilizaron dos diodos láser de He-Ne de 543.2 nm y 632.2 nm, las longitudes medidas por el espectrómetro fueron de 544.1 nm y 633.2 nm respectivamente, los datos obtenidos se ajustaron en el espectrómetro para normalizarlo.

Debido a que los espectrómetros de bajo costo no entregan los valores de salida escalados a unidades del Sistema Internacional (W/m^2) sino que entregan un valor de SPD ($\text{W/m}^2\cdot\lambda$) fue

necesario derivar un factor de escala integrando el área bajo la curva del SPD, con lo que se puede obtener un valor que puede ser escalado a la irradiancia proporcionada por el equipo de referencia mencionado más adelante.

Luego de calibrar el espectrómetro se midió la irradiancia de dos fuentes de luz artificiales (fuente halógena de 50 w y un led de 1.5 w). Se midió la irradiancia a 6 diferentes longitudes entre 0.13 m a 0.27 m con el medidor LP471RAD, los resultados se ajustaron en curvas de cuadrado inverso.

Paralelamente se midió la SPD de las dos fuentes con el LR1 en las mismas distancias. Se integró al área bajo la curva de la SPD entre 400 nm y 1050 nm (rango LP471RAD) para encontrar la escala entre los datos del LR1 y la irradiancia (W/m^2). Con los datos obtenidos de la SPD y haciendo uso de la ecuación de Planck se pudo obtener la medida PAR de las fuentes artificiales, para esto es necesario dividir la función de irradiancia (SPD) entre su valor respectivo de energía (E).

Una vez obtenidos los datos de la radiación PAR con el medidor LP471RAD y los datos estimados a partir de las mediciones del espectrómetro LR1 se hizo una comparación, la cual arrojó que el error relativo entre los datos estimados y los medidos fue menor al 2.25%.

Wu et al. [4] realizaron un estudio que buscó estimar la radiación fotosintéticamente activa diaria sobre la superficie terrestre dentro de la reserva natural nacional del lago Poyang en China comparando dos métodos de extrapolación y uno de interpolación. Para lograr el objetivo, se obtuvieron los registros diarios de la radiación global solar en la estación meteorológica de Nanchang y también las medidas diarias de la duración del sol en nueve estaciones meteorológicas ubicadas alrededor del lago Poyang (Xingzi, Yongxiu, Duchang, Jiujiang, Hukou, Boyang, Nanchang, Yugan y Jinxian). Para el primero de los métodos de extrapolación se recopilaban los registros diarios de la radiación global solar en la estación meteorológica de Nanchang, ya con estos datos se supuso la radiación PAR como el 45% del total de la radiación global solar y utilizaron esta proporción para estimar la radiación PAR en la estación de Nanchang con la siguiente ecuación.

$$PAR = R * 0.45 \quad (1.9)$$

En el segundo método de extrapolación se utilizaron las medidas diarias de la duración del sol en tres de las nueve estaciones meteorológicas alrededor del lago Poyang (Xingzi, Yongxiu y Duchang), con estos datos recopilados se utilizó el método de Cheng para estimar la radiación global solar.

$$R = R_{ext} * \left(0.0001 * \phi + 2.41 * 10^{-5} * H + 0.109 + 1.029 + \frac{S}{S_{ext}} - 1.216 * \left(\frac{S}{S_{ext}} \right)^2 + 0.787 * \left(\frac{S}{S_{ext}} \right)^3 \right) \quad (1.10)$$

Después de estimar la radiación global con la ec (1.10) se obtuvo la estimación de la radiación PAR en estas tres estaciones.

Finalmente, para el método de interpolación se estimó la radiación global solar, así con la radiación PAR en las nueve estaciones meteorológicas alrededor del lago Poyang utilizando respectivamente las ecuaciones (1.10) y (1.9). Luego, se creó una red irregular triangulada (TIN) con las nueve estaciones utilizando el software ArcGIS y se aplicó el método IDW (Inverse Distance Weighting) para estimar la radiación PAR (ec (1.11)) en una ubicación determinada dentro de cada triángulo de la radiación PAR estimada en cada una de las estaciones que forman el triángulo.

$$PAR_i = \left(\frac{PAR_1}{dis_{i1}^2} + \frac{PAR_2}{dis_{i2}^2} + \frac{PAR_3}{dis_{i3}^2} / \frac{1}{dis_{i1}^2} + \frac{2}{dis_{i2}^2} + \frac{3}{dis_{i3}^2} \right) \quad (1.11)$$

Una vez realizados los tres métodos se utilizó la radiación PAR medida en la estación de conservación de Dahuchi para comparar el desempeño de los tres métodos mencionados. Comparando y analizando los datos obtenidos con los tres métodos contra los datos obtenidos en la estación de Dahuchi, se llegó a la conclusión de que el método de interpolación fue el que alcanzó la mejor estimación de la radiación PAR, el método de extrapolación utilizado en la estación Nanchang mostró resultados imparciales mientras que el método de extrapolación utilizado en las estaciones de Xingzi, Yongxiu y Duchang fue el menos apropiado debido a sus resultados parciales.

A pesar de que la radiación PAR puede medirse de manera indirecta usando métodos alternativos de medición, estos no están muy documentados o han sido muy poco explorados, aun y cuando estos métodos pudieran ser más accesibles para el usuario promedio que no puede permitirse obtener un instrumento especializado debido a su costo. Debido a lo prohibitivo de los costos de los instrumentos especializados en muchos cultivos se utilizan luxómetros como instrumentos para estimar la radiación PAR, sin embargo su uso no es recomendable debido a su falta de precisión al ser instrumentos fotométricos y no cuánticos.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describe de manera extendida el concepto de diodo emisor de luz, su principio de funcionamiento, sus ventajas, desventajas, algunos de los más utilizados, así como algunas de sus aplicaciones. Todo esto debido a que su uso va en crecimiento día a día, reemplazando el uso de fuentes de iluminación tradicionales.

También se describen los instrumentos de medición convencionales que son empleados en la medición y caracterización de fuentes y sistemas de iluminación. Se describe también la manera en que un sensor detecta una señal. Por último se describe el concepto de sensor cuántico y de Arduino ya que estos servirán para el desarrollo del presente proyecto.

2.1 Diodo Emisor de Luz

Un diodo emisor de luz o led por sus siglas en inglés (*Light-Emitting Diode*) es en esencia un diodo semiconductor de unión p-n de estado sólido que emite luz cuando se aplica una corriente a través de él. El principio de funcionamiento de un led se basa en la electroluminiscencia la cual fue observada por primera vez en el carburo de silicio en 1907.

El led está formado por dos tipos de materiales los cuales son puestos en contacto directo para hacer una unión P-N, dichos materiales son semiconductores de tipo-P, los cuales son materiales que contienen una alta concentración de portadores positivos, llamados también huecos, y de semiconductores de tipo-N, los cuales son materiales que contienen una alta concentración de portadores negativos o electrones. La corriente solo fluye en una dirección, la cual es del ánodo (lado P) al cátodo (lado N). Los electrones y huecos fluyen a través de la unión de los electrodos cuando les es suministrado voltaje. Cuando un electrón se recombina con un hueco, se emite un fotón de energía igual a la diferencia de energía de los estados en los que se encuentran el electrón y el hueco, si estos se encuentran en los bordes de la banda de conducción y de valencia respectivamente, entonces el valor de la brecha de energía (gap) del material determinará la longitud de onda de la radiación emitida. A la luz producida por un proceso de estado sólido se le conoce como electroluminiscencia.

Los ledes tienen un polo positivo y uno negativo y pueden encender solo cuando se les aplica una corriente directa, debido a esto los ledes son fabricados con materiales semiconductores los cuales permiten que la corriente eléctrica fluya en una sola dirección; en una situación contraria los ledes no emitirán luz.

La estructura más común de un led consiste en un material semiconductor emisor de luz, un marco principal con ánodo y cátodo sobre el cual se coloca el molde, un encapsulado de epoxi cubre y protege el marco (Figura 2.1).

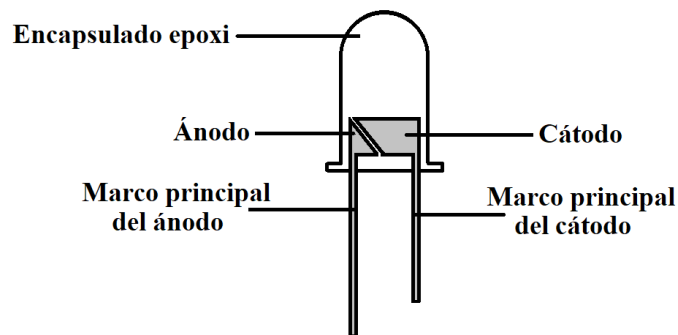


Figura 2.1 Estructura básica de un led.

Actualmente los ledes se utilizan en una gran cantidad de aplicaciones, entre las más populares se encuentra su uso como indicadores y como interruptores optoelectrónicos.

La longitud de onda de la luz emitida, o sea el color de la luz, depende de las propiedades del material del semiconductor; un led puede tener un pico de emisión desde el UV-C (~250 nm) hasta el infrarrojo (~1000 nm), y es la primera fuente de iluminación en tener la capacidad de verdadero control espectral; por ejemplo, en el cultivo de plantas, esto permite que las longitudes de onda coincidan con los fotorreceptores de las plantas para mejorar su crecimiento.

La fabricación de los ledes actualmente está basada en el compuesto de arseniuro de aluminio y galio (AlGaAs), en la Tabla 2.1 se muestran algunos tipos de los materiales con que se construyen los ledes actualmente [20, 21].

Tabla 2.1 Materiales utilizados para diferentes colores de ledes.

Color	Longitud de onda (nm)	Material
Ultravioleta	<400	AlN, AlGaInN, AlGaInN
Violeta	400-450	InGaInN
Azul	450-500	InGaInN, SiC
Verde	500-570	GaP, AlGaInP, AlGaP
Amarillo	570-590	GaAsP, AlGaInP, GaP
Naranja/Ámbar	590-610	GaAsP, AlGaInP, GaP
Rojo	610-760	GaAsP, AlGaInP, GaP, AlGaAs
Infrarrojo	>760	GaAs, AlGaAs

2.1.1 Ventajas de fuentes de iluminación led

Entre las ventajas de los ledes con respecto a otras fuentes de iluminación se encuentra su bajo consumo de energía ya que pueden ser operados utilizando una batería de voltaje simple. Otra ventaja es su larga vida útil y su alta eficiencia ya que su vida útil típica es de entre 25000 a 100000 horas, mientras que la mayor parte de la energía aplicada a un led es convertida en radiación, con mínimas pérdidas por calor, en comparación a una lámpara fluorescente cuya vida útil es de entre 10000 a 15000 horas en condiciones ideales y tienen una gran pérdida por calor. Los ledes pueden emitir luz de un color previsto sin necesidad de utilizar filtro de color como los utilizados en los métodos tradicionales de iluminación. Por último, el tamaño de los ledes es muy pequeño, siendo los tamaños más comunes de 2 a 5 cm lo que pueden ser fácilmente manipulados a la hora de utilizarlos en cualquier aplicación.

Estas son algunas de las ventajas por las cuales en tiempos recientes el uso de los ledes se ha extendido de gran manera desplazando poco a poco a las fuentes de iluminación comunes en una gran cantidad de aplicaciones de uso común.

2.1.2 Desventajas de fuentes de iluminación led

Una de las mayores desventajas con este tipo de fuentes de iluminación es el costo. Los altos precios iniciales pueden ser reducidos por la cantidad de energía ahorrada y esto puede

hacer que valga la pena su uso. Sin embargo, los altos precios iniciales van bajando rápidamente debido al avance de la tecnología de los ledes; uno de los mayores inconvenientes es que los elementos individuales dentro de un sistema de iluminación led no pueden ser reemplazados como en los sistemas de iluminación tradicionales, si un led deja de funcionar, la unidad entera debe ser reemplazada [22].

2.1.3 Uso de ledes en cultivo de plantas

En años recientes, con el gran avance de la tecnología led, se han realizado numerosos estudios que han investigado los efectos de los ledes como fuente de iluminación alterna en cultivos en interiores. Estos estudios se han realizado con el fin de investigar los efectos de ledes monocromáticos aplicados individualmente o ledes de diferentes colores combinados en el crecimiento de plantas in vitro. Después de la exposición a los ledes, las plantas mostraron mejoras significativas en su crecimiento. Especialmente, ledes rojos y azules, ya sea solos o en combinación, tuvieron una influencia significativa en el crecimiento de las plantas. Por un lado la luz azul estimula el crecimiento vegetativo y de las hojas y es importante durante la etapa temprana de las plantas ya que ayuda a reducir el estiramiento de las mismas; por el otro lado la luz roja es importante para la regulación del florecimiento y la producción de frutos, también estimula la ramificación y ayuda a aumentar el grosor del tallo [23].

2.2 Esfera integradora

El flujo luminoso determina la energía visible total emitida por una fuente de iluminación, para llevar a estas mediciones se utiliza el instrumento de medición conocido como esfera integradora. Con la esfera integradora se pueden realizar mediciones colorimétricas, fotométricas y eléctricas.

Una esfera integradora, también conocida como esfera de Ulbricht es un dispositivo hueco con forma de esfera cubierta comúnmente en su interior de sulfato de bario (BaSO_4) o Spectralon, la característica principal de estos elementos es que presentan una reflectancia difusa extremadamente alta constante a las diferentes longitudes de onda que son percibidas por el ojo humano. Para llevar a cabo mediciones se coloca la fuente de iluminación en el

centro o en algún punto dentro de la superficie interna de la esfera y se coloca un instrumento de medición en un puerto de esta, regularmente se utiliza un espectrorradiómetro para realizar mediciones. Enfrente del punto donde se coloca el instrumento de medición se coloca una placa (cubierta con el mismo material que la esfera), esto con la finalidad de evitar que la radiación que es emitida por la fuente de iluminación entre en contacto directo con el instrumento, de esta manera se asegura que todos los rayos medidos hayan sido reflejados al menos una vez antes de entrar al instrumento de medición.

Una esfera integradora deber ser lo suficientemente grande para contener la fuente de iluminación que se está midiendo, también como regla general, cuanto más grande sea la esfera, los errores en la medición del flujo luminoso serán más pequeños.

El tiempo de integración (tiempo de exposición del sensor a la incidencia de la luz) aumenta proporcionalmente al tamaño de la esfera y es inversamente proporcional a la potencia de radiación de la fuente de iluminación.



Figura 2.2 Esfera integradora.

Existen dos tipos de geometría en las esferas integradoras:

- Geometría 2π : La medición se realiza montando la fuente sobre uno de los costados de la esfera. Este tipo de esferas son adecuadas para fuentes de iluminación pequeñas y de baja potencia.

- Geometría 4 π : La medición se realiza en el centro de la esfera. Fuentes de iluminación medianas y grandes tanto en tamaño como en potencia son las más adecuadas para este tipo de esferas.

Si se asume la fuente de iluminación como puntual frente a la esfera, se puede asumir también que el flujo luminoso es proporcional a la intensidad luminosa, después, de acuerdo a la ley del cuadrado inverso se puede concluir que el flujo luminoso es proporcional a la intensidad luminosa de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\Phi = kE \quad (2.1)$$

K es la constante de la esfera, que depende de las dimensiones de la esfera, la composición del material con el cual está recubierto su interior, el envejecimiento de este y de la temperatura [24 - 28].

2.2.1 Espectrorradiómetro

Es un instrumento empleado en la medición de la distribución de la energía espectral de una fuente de iluminación, dicha energía determina las cantidades colorimétricas de la fuente de iluminación, además de sus cantidades fotométricas y radiométricas.

La dispersión de la luz en un espectrorradiómetro se realiza a través de un monocromador que utiliza rejillas de difracción, los valores de la curva $V(\lambda)$ de responsividad espectral y de color se almacenan en un software, el cual se utiliza para procesar los datos de la distribución de la energía espectral obtenida de la fuente de iluminación bajo análisis. De esta manera, se evita el error de medición asociado con fotómetros y colorímetros de filtro [29].

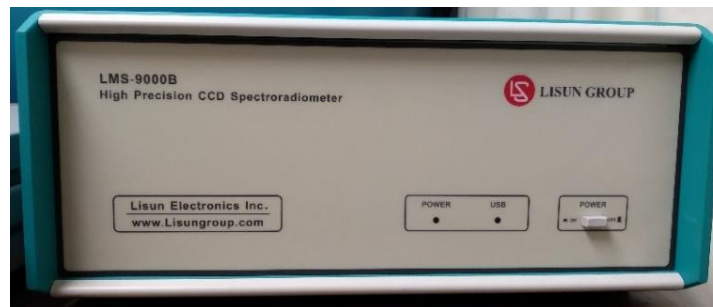


Figura 2.3 Espectrorradiómetro.

En este trabajo el espectrorradiómetro sirve para separar la radiación emitida por las fuentes de iluminación dentro de la esfera integradora en sus diferentes longitudes de onda para obtener los espectros de emisión.

2.3 Luxómetro

Los luxómetros son utilizados para la medición de la iluminancia en superficies horizontales y verticales. Sin embargo, la iluminancia no indica la impresión de brillo de una habitación porque esto depende en gran medida de las características reflectivas de dicha habitación. Un luxómetro es capaz de medir la iluminancia real y no subjetiva de un ambiente o habitación.

Los luxómetros utilizados en la actualidad funcionan de acuerdo al principio de la fotocelda, la cual al recibir una cantidad determinada de luz (fotones) esta es transformada en corriente eléctrica.



Figura 2.4 Luxómetro.

Los luxómetros son utilizados en la planeación, instalación, puesta a prueba y monitoreo de todo tipo de sistemas de iluminación, así como para determinar las condiciones de iluminación para razones higiénicas, psicológicas y/o de seguridad. Por ejemplo, una fotorresistencia debidamente caracterizada puede ser utilizada como base para la construcción de un luxómetro [29, 30].

2.4 Sensores fotónicos

El primer sensor óptico fue propuesto por I. Bergman en 1968, este era un detector para detección de oxígeno atmosférico basado en extinción de fluorescencia. A través de los años nuevos materiales y estructuras han sido desarrollados para fuentes ópticas y diversos fotodetectores los cuales cubren el rango de longitudes de onda que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. Los avances en el procesamiento óptico y eléctrico de todas las señales permiten desarrollar nuevas técnicas para obtener las señales de los sensores.

La evolución en la fabricación de circuitos integrados fotónicos proporciona un aumento en la sensibilidad e integración así como la reducción del precio en volúmenes altos de producción de sistemas de detección inteligentes. Hoy en día los estudios referentes a los sensores fotónicos se enfoca más a la integración de dispositivos fotónicos y eléctricos en uno solo.

Los sensores fotónicos pueden ser clasificados en dos grupos diferentes de acuerdo a su construcción.

El primer grupo está conformado por sensores fotónicos con un elemento de detección integrado en fibra monomodo estándar o SMF (*Standard single Mode Fiber*). El elemento de detección más común en SMF es rejillas de fibra Bragg o FBG (*Fiber Bragg Gratings*). Hoy en día existen varios tipos de FBG y también varias técnicas de fabricación para crear FBG en fibra óptica.

El segundo grupo está conformado por sensores cuyo elemento sensor se fabrica en diferentes plataformas de materiales como SMF. En este grupo de sensores, la SMF se utiliza solamente como medio de transmisión entre dispositivos de lectura y elementos de detección. La corriente principal en este grupo de sensores es la realización de elementos de detección en circuitos integrados de fotónica o PhIC (*Photonics Integrated Circuit*). El elemento de detección realizado en PhIC puede proporcionar una mejor sensibilidad, resolución, rango de medición y estabilidad [31].

2.5 Sensores cuánticos

Un sensor cuántico es un dispositivo electrónico que basa su funcionamiento en un fotodiodo, el cual ha sido adecuado para tener una respuesta lineal en el rango del espectro electromagnético comprendido entre los 400 y 700 nm, esto con el fin de poder medir la radiación fotosintéticamente activa; este tipo de sensores regularmente son de tamaño pequeño ya que de esta manera pueden ser fácilmente colocados debajo del dosel arbóreo de las plantas, también deben ser poco sensibles a los cambios de temperatura, deben tener una respuesta angular lambertiana, es decir, deben tener una buena corrección cosenoidal, por último, la precisión de estos sensores se determina dependiendo de la rapidez con la que responden a los cambios de la radiación PAR.

La determinación de las condiciones de iluminación en los cultivos de vegetales siempre ha sido un problema complejo debido a sus constantes cambios espaciales y temporales y por el desarrollo de tecnología apropiada para su medición. En un principio las condiciones de iluminación eran determinadas con mediciones realizadas con un fotómetro, pero la respuesta de este tipo de sensores a las longitudes de onda del espectro visible no es la más adecuada, ya que es necesario que éstos posean una respuesta lineal en el espectro de la radiación fotosintéticamente activa. Después, se decidió utilizar filtros ópticos y fotoceldas que aproximaran la respuesta requerida midiendo la irradiación en el espectro de la radiación PAR o la irradiación fotónica. Finalmente, se implementó un dispositivo que permitió medir la radiación PAR de manera adecuada, dicho dispositivo está conformado por una fotocelda azul de silicio, un filtro óptico que solo permite el paso de la radiación de 400 a 700 nm, una pieza de cristal absorbedor de calor y un filtro de gelatina Wratten 85A, los cuales fueron montados sobre un armazón metálico con corrección cosenoidal. Hoy en día, todos los sensores cuánticos comerciales se basan en dicho dispositivo [32].

Los sensores utilizados actualmente para la medición de la radiación PAR varían en su construcción y en el principio detrás de la conversión de radiación a voltaje o corriente. Estos sensores se pueden separar en dos clases generales: PPFD e irradiancia PAR. Por lo tanto, se pueden definir dos tipos de sensores ideales: el sensor cuántico PAR ideal, diseñado para

medir PPFD, y el sensor de energía PAR ideal, diseñado para medir irradiancia PAR. La definición de un sensor ideal no se basa en su calidad de construcción o en su principio de funcionamiento sino en su función de respuesta espectral $\varepsilon(\lambda)$. Esta función, similar al espectro de acción fotosintético, describe la salida de un instrumento cuando es iluminado por una fuente de radiación monocromática con una longitud de onda λ .

Para obtener la respuesta del sensor a cualquier fuente de radiación natural, la función de respuesta espectral debe ser integrada sobre su rango de sensibilidad espectral:

$$M_{PAR} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon(\lambda) I_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

La lectura arrojada por el sensor M_{PAR} es regularmente en términos eléctricos: voltaje o corriente. El sensor cuántico ideal mide el número de fotones incidentes independientemente de sus longitudes de onda. Para lograr esto, la ley de Planck señala que la función de sensibilidad espectral de un sensor ideal cuántico tiene que ser proporcional a la longitud de onda, $\varepsilon_Q(\lambda) \sim \lambda$, en el intervalo espectral de 400 a 700nm, fuera de este rango, $\varepsilon_Q \equiv \varepsilon_I \equiv 0$.

Los sensores cuánticos reales son por lo general sensores fotovoltaicos que basan su funcionamiento en el efecto fotoeléctrico. El uso del efecto fotoeléctrico hace que la respuesta del sensor al número de fotones, independientemente de sus longitudes de onda, sea casi lineal. Esto también hace que los sensores cuánticos sean muy sensibles, por lo cual, su respuesta a los cambios en la densidad de flujo de fotones fotosintéticos es casi instantánea.

Los sensores fotovoltaicos comunes son, básicamente, fotodiodos que funcionan en régimen foto galvánico. Se logra un campo de visión hemisférico completo colocando un difusor, una pieza cuidadosamente formada de material difusamente transparente, enfrente del elemento receptor (diodo). La naturaleza espectralmente no selectiva del material difusor en el ancho de banda PAR hace que la superficie receptora se vea blanca. Un filtro adecuado bloquea las longitudes de onda fuera de la región PAR. La elección del filtro, junto con el diseño físico del instrumento, hace que la curva de respuesta espectral sea más cercana a la de un sensor ideal. Uno de los sensores cuánticos más utilizados es el LI-190R manufacturado

por LI-COR, Inc. que consiste en un fotodiodo de silicio cubierto por un filtro de interferencia pasa banda y un filtro de vidrio coloreado.

Todos los sensores cuánticos están diseñados para responder a la curva de respuesta cuántica espectral, conocida también como espectro de acción de la radiación fotosintética y es definida como la productividad fotosintética de una hoja trazada contra la longitud de onda de la irradiancia espectral incidente. En la Figura 2.5 se muestra esta curva [8, 33]. La forma de esta curva es casi universal, presentándose pequeñas variaciones debido a diferencias entre especies, lugar de crecimiento, suministro de agua, nutrientes, radiación incidente, entre otras condiciones variables [34].

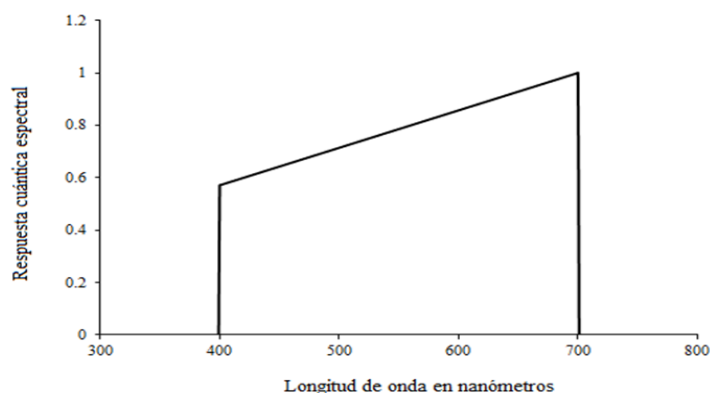


Figura 2.5 Curva de respuesta cuántica espectral.

La mejor manera para describir la radiación en el ancho de banda PAR es midiendo la composición espectral. Desafortunadamente, los instrumentos utilizados para realizar mediciones de radiación espectral, llamados espectrorradiómetros, son costosos y no muy adecuados para medidas de campo o monitoreo automático de larga duración. En años recientes, el desarrollo de tecnología más accesible en arreglos de fotodiodos ha hecho que la construcción de espectrorradiómetros con piezas movibles sea posible. Estos instrumentos regularmente miden radiación entre 350 y 1050 nm con un intervalo de muestreo de unos pocos nanómetros. Sin embargo, a juzgar por el número pequeño de resultados publicados, la simplicidad, la solidez y el bajo precio de los sensores cuánticos superan la mayor cantidad de datos y el precio más alto producido por un espectrorradiómetro [8].

2.6 Medición de la radiación

Cuando se habla de la respuesta de los detectores a radiación incidente, lo que más importa es la proporción entre la señal de salida y el flujo de entrada. En detectores de calidad, esta proporción, llamada *responsividad* o *sensitividad* del detector, es constante en un gran rango de niveles de flujo incidente. Se dice que tales detectores tienen una buena linealidad, lo que significa que tienen una respuesta lineal al flujo incidente. En estos casos, se puede utilizar la siguiente relación entre la radiación de entrada Φ y la señal de salida S :

$$S - S_0 = R\Phi \quad (2.3)$$

Donde R es la constante de calibración, o responsividad del detector. Si el detector produce un voltaje proporcional al flujo incidente y el flujo es medido en watts, entonces R tendrá unidades de volts/watt. Si produce corriente, R tendrá unidades de amperes/watt.

S_0 se refiere a la salida diferente de cero que tienen algunos detectores cuando el flujo incidente es cero. Esta salida es llamada *salida oscura*.

A pesar de que lo ideal es tener una señal de salida que es linealmente relacionada al flujo incidente en un detector, la mayoría de los detectores muestran alguna respuesta no lineal dependiendo de parámetros como temperatura, longitud de onda de la radiación incidente, y la magnitud del flujo incidente. Por lo tanto, se debería hablar más propiamente de la función de respuesta de un detector, una expresión matemática que relaciona la señal de salida con el flujo de entrada y los demás parámetros de los cuales depende la señal.

La función de respuesta de un detector es designada por el símbolo $R(\Phi, x, y, z, \dots)$, la cual se muestra aquí como dependiente del flujo incidente, así como de algunas otras variables, y teniendo unidades de volt, ampere u otra unidad de salida, por watt y/o por lumen. La ecuación de detección es

$$S = R(\Phi, x, y, z, \dots)\Phi + S_0 \quad (2.4)$$

Los detectores generalmente tienen respuestas variables en sus superficies sensibles, unos más que otros, esto debe ser considerado en el diseño de sensores de radiación. En algunos casos, como cuando el flujo incidente varía sobre un rango muy amplio y no se requieren circuitos de ganancia automática lenta variable, es deseable una respuesta no lineal.

En todos los casos, se debe tener cuidado al momento de determinar cualquier no linealidad en la respuesta de un detector sobre el rango previsto de su uso.

La mayoría de los detectores tienen también una respuesta variable a los ángulos de incidencia de la radiación. Siendo θ el ángulo de incidencia, la dependencia funcional en este ángulo puede ser mostrado en la función de respuesta como $R(\Phi, x, y, z, \dots)$. La irradiancia recibida por una superficie plana en un rayo incidente colimado disminuye con el coseno del ángulo de incidencia. Por esta razón, el flujo recibido por la superficie sensible de un detector ideal ubicado debería mostrar también una dependencia a $\cos(\theta)$. Las desviaciones de esta dependencia pueden indicarse en la ecuación de detección de la siguiente manera:

$$S = R(\Phi, \cos(\theta), x, y, z, \dots) \Phi + S_0 \quad (2.5)$$

La dependencia de la longitud de onda de la función de respuesta es de interés especial. Esta respuesta es mostrada como:

$$S = R(\lambda, \Phi_\lambda, \cos(\theta), x, y, z, \dots) \Phi_\lambda + S_0 \quad (2.6)$$

Si se considera que únicamente la radiación incidente normal $\theta = 0$ está envuelta, entonces R es una función solamente de longitud de onda y se escribe como $R(\lambda)$. Si $E_\lambda(\lambda)$ es la irradiancia espectral incidente sobre el área sensible A de dicho detector, entonces la señal de salida será dada por:

$$S = A \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) R(\lambda) d\lambda + S_0 \quad (2.7)$$

Si el flujo incidente espectral o la respuesta espectral del detector es cero fuera de un rango espectral dado, entonces los límites de la integral (2.7) pueden ser restringidos a este rango. Para evaluar esta integral se deben conocer las distribuciones espectrales de la respuesta del

detector y de la irradiancia incidente. Si hay una ventana o un sistema óptico entre la fuente de radiación y el detector, entonces se debe conocer también la transmitancia espectral $T(\lambda)$ de este sistema y se debe incluir en el integrando de la ecuación (2.7). De esta manera

$$S = A \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) T(\lambda) R(\lambda) d\lambda + S_0 \quad (2.8)$$

Esta situación de medición se diagrama esquemáticamente a continuación [9].

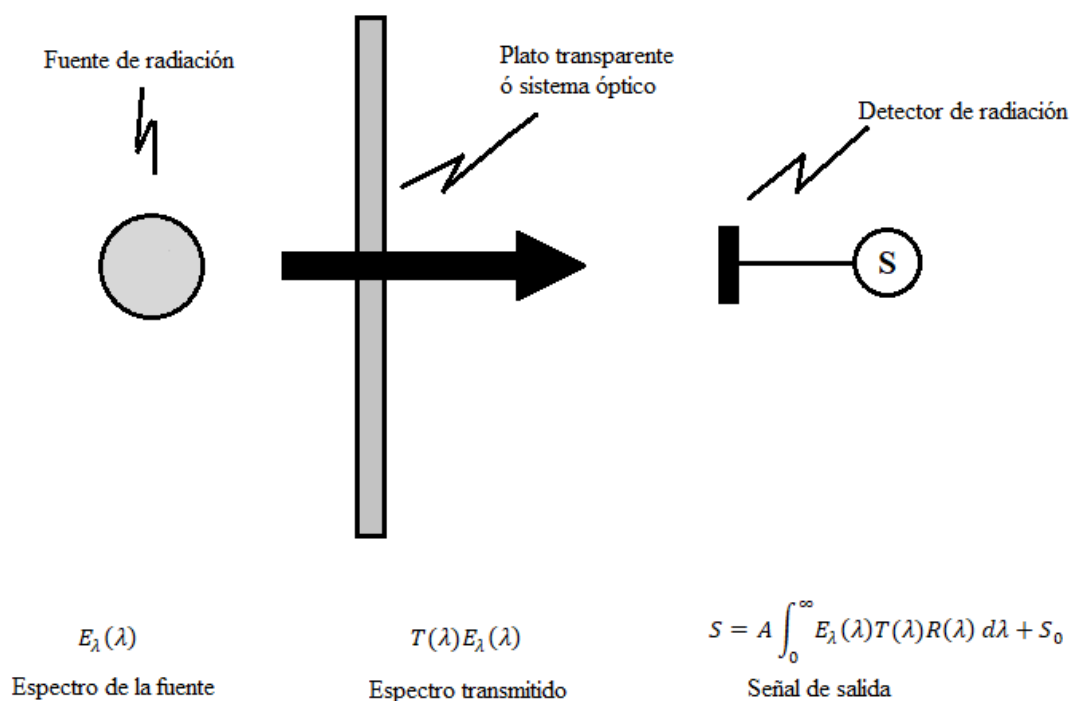


Figura 2.6 Adquisición de señal de un detector.

2.7 Sensor cuántico LI-190R

El sensor cuántico LI-190R mide la radiación fotosintéticamente activa con un sensor de silicio montado debajo de un corrector cosenoidal.

La salida del sensor es una señal de corriente (μA) que es directamente proporcional a la radiación fotosintéticamente activa hemisférica. Se utiliza un multiplicador para convertir la señal de corriente en unidades de radiación ($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$).

Algunas aplicaciones típicas de éste sensor incluye la agricultura, invernaderos, condiciones controladas de laboratorio, e investigación ambiental.

2.7.1 Características/Funcionamiento sensor LI-190R

El sensor LI-190R tiene una corrección cosenoidal total, con una sensibilidad a la luz casi igual en todos los ángulos de incidencia hasta alrededor de 82° de ángulo de incidencia. Típicamente los errores son menos de $\pm 5\%$ para ángulos menores de 82° con respecto al eje normal. A 90°, una respuesta perfecta del coseno sería cero, y cualquier error a ese ángulo es infinito.



Figura 2.7 Sensor LI-COR LI-190R.

La radiación es recibida en un disco de acrílico (difusor). Cuando la radiación llega o golpea con un mayor ángulo de incidencia, se recibe más por el borde del difusor. Esto compensa el aumento de la reflexión desde la superficie superior a medida que el ángulo de incidencia crece. Más allá de un ángulo de alrededor de 80°, el borde del sensor comienza a bloquear un poco la luz con la intención de mantener una respuesta correcta mientras se recibe más radiación por el borde del difusor. A un ángulo de incidencia de 90°, el borde bloquea completamente al difusor.

La señal de corriente producida por este modelo de sensores está relacionada a la intensidad de radiación con una constante de calibración única para cada sensor, la cual es expresada en unidades de μA por cada $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Generalmente, la constante de calibración se encuentra entre 5 y 10 μA por cada $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ [33].

2.8 Fotorresistencia

Existen muchos tipos de sensores fotoeléctricos, dependiendo de cuál sea la aplicación en la que serán utilizados. Existen diversas situaciones en las que un sensor fotoeléctrico es requerido, siendo una de las más comunes aquella en que el sensor deber variar entre dos posiciones diferentes: si está expuesto a la luz o a la oscuridad; otros en cambio son utilizados para medir cambios suaves o menos pronunciados en la intensidad luminosa, para estos casos el sensor más adecuado es la fotorresistencia.

Una fotorresistencia, como su nombre lo indica, es una resistencia en la cual su valor aumenta o disminuye de acuerdo a la energía luminosa que incide sobre ella. Más específicamente, es una resistencia cuya resistividad va disminuyendo a medida que aumenta la energía luminosa incidente sobre ella y viceversa. Una fotorresistencia está compuesta de un material semiconductor, cuya resistencia varía en función de la iluminación, es por ello que la fotorresistencia es conocida también como resistencia dependiente de la luz o LDR por sus siglas en inglés (*Light Dependent Resistor*) [35].

Una fotorresistencia es un sensor que está fabricado con una capa de semiconductor activo que se deposita sobre un sustrato aislante de alta resistencia, el semiconductor está ligeramente dopado para permitirle tener el nivel de conductividad requerido. Si la luz que incide sobre la fotorresistencia es de alta frecuencia los fotones son absorbidos por el semiconductor, dando la energía suficiente a los electrones para que salten de la banda de valencia a la banda de conducción, aumentando de este modo la conductividad del sensor y disminuyendo su resistencia. Las fotorresistencias son caracterizadas con la siguiente ecuación:

$$R = AE^{\alpha} \quad (2.9)$$

Donde R es la resistencia, A y α son constantes que depende del material semiconductor utilizado y E es la iluminancia, los valores típicos de α para fotorresistencias que trabajan en el espectro visible comúnmente varían entre 0.7 y 0.9. Existe una dependencia logarítmica

entre resistencia e iluminancia, la cual puede convertirse en dependencia lineal si se utiliza una escala logarítmica [36, 37].

Cuando estos dispositivos están en la oscuridad su resistencia es alta y va disminuyendo paulatinamente de acuerdo a la luz que recibe. Cuando la luz incide en el material fotoconductor se crean pares “electrón-hueco”. Al haber un mayor número de portadores el valor de la resistencia disminuye. La fotorresistencia es capaz de reaccionar a una gran variedad de frecuencias, incluyendo ultravioleta (UV), luz visible e infrarrojo (IR). Comúnmente las fotorresistencias están construidas con Sulfuro de Cadmio que actúa como elemento sensible al espectro visible o también con Sulfuro de Plomo que se usa como elemento sensible a la radiación infrarroja, estos materiales son colocados en un encapsulado de vidrio, resina o bajo un recubrimiento de laca transparente que permita la incidencia de la luz [38].

2.9 Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar.

Las tablillas electrónicas de Arduino se componen de un microcontrolador Atmel, un puerto USB-Serie el cual permite la comunicación entre la tablilla y una computadora, además de servir de alimentación, un conector tipo jack que permite alimentación externa, un botón de reset, así como la circuitería auxiliar para el microcontrolador que incluye resistencias, cristal de cuarzo, entre otros.

Los microcontroladores contenidos en las tablillas de Arduino cuentan con pines que pueden ser configurados como entradas o salidas digitales, en dichos pines se pueden conectar dispositivos que transmitan señales digitales de 0 y 5V. Las tablillas de Arduino cuentan también con diferentes pines que se utilizan como entrada o salida analógica, en dichos pines se pueden obtener datos de sensores en forma de señal continua variable [39].

Para programar una tablilla de Arduino la empresa provee un software de entorno de desarrollo integrado IDE (*Integrated Development Environment*) que es una multiplataforma que está programada en Java. Dicha plataforma incluye un editor de texto, botones para compilar y cargar los códigos en la tablilla, un área de mensajes y una barra de herramientas con los botones de uso común. El IDE de Arduino soporta los lenguajes de programación C y C++ utilizando reglas especiales en la estructuración del código [40].

2.9.1 Arduino Uno

El Arduino Uno es una tablilla electrónica que basa su funcionamiento en el microcontrolador ATmega328P de la marca Atmel. Este tiene catorce entradas/salidas digitales, de las cuales seis pueden usadas como salidas PWM y también cuenta con seis entradas analógicas.

Los puertos digitales del Arduino Uno trabajan a 5 volts, cada pin puede proveer o recibir 20 mA (recomendado) y tienen una resistencia pull-up interna de 20-50 k Ω que por esta desconectada por defecto a menos que se indique lo contrario. Un máximo de 40 mA es el valor que no debería ser excedido en ningún puerto digital para evitar un daño permanente en el microcontrolador.

Las entradas analógicas del Arduino Uno pueden proveer cada una 10 bits de resolución (1024 valores diferentes). Por defecto las salidas miden de 0 5 volts, sin embargo es posible cambiar el valor máximo [41].



Figura 2.8 Arduino Uno.

En la tabla mostrada a continuación se hace un resumen de las características técnicas más importantes del Arduino Uno.

Tabla 2.2 Características técnicas del Arduino Uno.

Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (Límite)	6-20V
Pines entrada/salida digital	14 (6 pueden usarse como salida PWM)
Pines entrada analógica	6
Corriente continua por pin I/O	20 mA
Corriente continua en el pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (0.5 Kb usados por el bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia del reloj	16 MHz

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LUMINARIAS EN EL RANGO PAR

En este capítulo se describe el procedimiento que fue llevado a cabo para caracterizar eléctricamente y fotométricamente las fuentes de iluminación que fueron auxiliares en el desarrollo del modelo matemático propuesto en el trabajo de tesis. Se describen las fuentes de iluminación analizadas, el porqué de su elección, su comportamiento ante diferentes voltajes y corrientes, así como las lecturas arrojadas por los diferentes instrumentos de medición ante dichas fuentes de iluminación. Por último, hay que señalar que todo el desarrollo mostrado en el presente capítulo y en los siguientes fue realizado dentro del laboratorio de sistemas de Iluminación de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua.

3.1 Fuentes de iluminación led seleccionadas

Como el modelo matemático desarrollado para la medición indirecta de la radiación fotosintéticamente activa se basa en el comportamiento de diferentes fuentes de iluminación fue necesario seleccionar algunas de ellas y conocer sus características eléctricas y fotométricas. Se optó por utilizar para las pruebas únicamente fuentes de iluminación de corriente directa, específicamente, fuentes de iluminación tipo led debido a las ventajas que tienen sobre las fuentes de iluminación comunes, como los focos incandescentes. Entre sus ventajas se encuentran su bajo consumo eléctrico, su ahorro en mantenimiento, así como su eficiencia y durabilidad [22].

Las fuentes de iluminación seleccionadas para su caracterización fueron cinco fuentes tipo led de alta potencia, cada una de un color diferente, así como una tira de ledes compuesta por ledes de color rojo y azul. Debido a que en el mercado comercial los ledes más comunes son los colores rojo, verde, amarillo, azul y rojo profundo, se optó por adquirir ledes de estos colores, además, se ha demostrado que las fuentes de iluminación de los colores rojo y azul son de gran ayuda para el crecimiento de las plantas en cultivos con luz artificial [42]. A continuación se describen las características de cada una de las fuentes de iluminación seleccionadas.

3.1.1 ledes alta potencia led World base tipo estrella

Las fuentes de iluminación tipo led de este tipo son de las más comunes y accesibles en el mercado, por lo que tienen una gran gama de aplicaciones, por ejemplo, y como ya se ha mencionado, su uso en el cultivo de plantas es muy amplio; debido a su pequeño tamaño son fácilmente manipulables y también son fáciles de instalar tanto en lugares de gran tamaño como en espacios pequeños.

Normalmente, debido a las aplicaciones donde se requiere su uso, estos ledes no se manipulan individualmente, sino que se utilizan varios conectados en serie, para lo cual se utilizan *drivers* o controladores con los cuales fácilmente se puede regular su corriente de alimentación; sin embargo, también pueden ser controlados individualmente utilizando una fuente de alimentación de corriente directa en conjunto con un *dimmer* o atenuador de luz. Para el presente trabajo se estudiaron los ledes de manera individual.

Estos ledes tienden a generar una gran cantidad de calor debido a la potencia a la que trabajan, por esto, comúnmente vienen soldados a una base tipo estrella para disipar el calor generado, aunque también pueden ser adquiridos sin dicha base.



Figura 3.1 Ledes tipo estrella marca led World.

En las tablas mostradas a continuación se listan las características proporcionadas por el vendedor para cada uno de los ledes seleccionados [43 - 47].

Tabla 3.1 Características led rojo y led amarillo.

led rojo		led amarillo	
Potencia	3 W	Potencia	3 W
Voltaje	2.3 V ~ 2.8 V	Voltaje	2 V ~ 2.6 V
Corriente	700 mA	Corriente	700 mA
Longitud de onda	620 nm ~ 630 nm	Longitud de onda	590 nm ~ 592 nm
Flujo luminoso	60 lm ~ 80 lm	Flujo luminoso	60 lm ~ 80 lm

Tabla 3.2 Características led verde y led rojo profundo.

led verde		led rojo profundo	
Potencia	3W	Potencia	3W
Voltaje	3.3 V ~ 4.2 V	Voltaje	2.2V ~ 2.6V
Corriente	750 mA	Corriente	800 mA
Longitud de onda	520 nm ~ 530 nm	Longitud de onda	660 nm
Flujo luminoso	100 lm ~ 150 lm	Flujo luminoso	60 lm ~ 80 lm

3.1.2 Driver LED QH-20LP6-10X3W

Como se mencionó anteriormente los ledes de potencia pueden ser controlados con un *driver*, el cual puede ser adquirido junto con estos. El *driver* más vendido comúnmente junto a estos ledes es el driver LED QH-20LP6-10X3W el cual es capaz de alimentar hasta 10 ledes con una potencia de 3W cada uno.

En esencia, las funciones de este *driver* son convertir el voltaje de corriente alterna a voltaje de corriente directa y adaptar el voltaje de salida según las necesidades de cada led a una corriente fija predeterminada.

A continuación se muestran las características eléctricas del *driver* [48].

Tabla 3.3 Características driver led QH-20LP6-10X3W.

Voltaje entrada	85-277 V ~ 50/60 Hz
Corriente máxima entrada	0.25 A
Voltaje salida	18-34 V DC
Corriente máxima salida	650 mA
Factor de potencia	>95%

3.1.3 Tira de ledes rojo-azul HCSOYES

Como alternativa a los ledes de potencia, fue adquirida una tira de ledes de colores rojo y azul, los cuales, al encenderse sus colores se combinan para formar luz color rojo profundo,

esta tira se adquirió con la finalidad de comprobar si se tiene una mejor lectura de radiación PAR al tener una fuente de iluminación de color rojo profundo o al tener el color rojo profundo formado por dos fuentes de iluminación de colores diferentes. Además, al poder aislar ya sea la luz roja o la azul se puede medir la radiación PAR emitida por cada una de ellas.

Esta tira, al igual que los ledes de potencia, puede ser controlada con un *driver* que convierta la corriente continua en directa. Los ledes que conforman esta tira son del tipo SMD5050, lo que quiere decir que sus dimensiones son de 5x5 mm, y en comparación a otros ledes del tipo SMD tienen un consumo de energía más alto, por lo que las tiras con este tipo de ledes son utilizadas en instalaciones que requieran un alto grado de iluminación.

El rollo de tira de ledes adquirido tiene una longitud de 5 metros la cual puede ser seccionada cada 3 ledes según la aplicación requerida. En este caso, para realizar la caracterización y las pruebas requeridas se trabajó con una longitud de 1 metro, donde se tienen 60 ledes, siendo su distribución de 10 azules y 50 rojos.

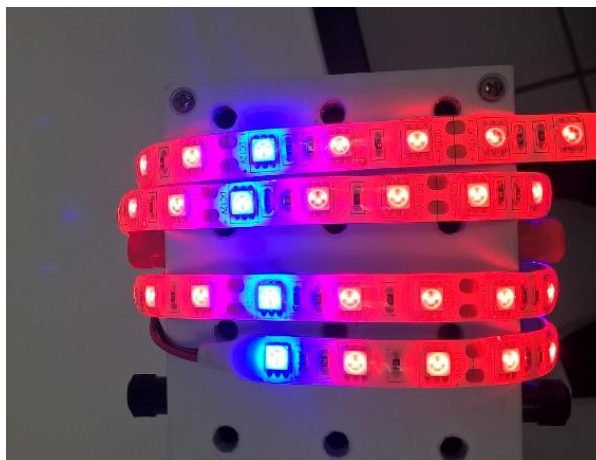


Figura 3.2 Tira de ledes rojo-azul marca HCSOYES.

Debido a que la tira fue proporcionada por medios externos no se pudo obtener la información del fabricante o vendedor, sin embargo se realizó una búsqueda en internet de proveedores de este tipo de fuente iluminación para obtener sus características, las cuales son mostradas a continuación [49].

Tabla 3.4 Características tira de ledes.

Relación rojo-azul	5:1
Potencia	14 W/m
Voltaje	12V
Longitud de onda rojo	625 nm ~ 660 nm
Longitud de onda azul	450 nm ~ 465 nm
Flujo luminoso	780 lm ~ 900 lm/m

3.2 Caracterización de fuentes de iluminación

Con el fin de conocer exactamente el funcionamiento de las fuentes de iluminación adquiridas se obtuvieron sus características eléctricas y fotométricas, esto sirvió también para tener un mayor control al momento de desarrollar el modelo matemático.

3.2.1 Caracterización eléctrica

A pesar de contar con los datos proporcionados por el fabricante, estos datos corresponden a un comportamiento ideal, el cual la mayoría de las veces difiere del valor real, por lo que se realizaron diversas pruebas preliminares para obtener el comportamiento real de las fuentes de iluminación, para ello se utilizó una fuente de voltaje DC modelo 6655A de la marca Keysight, la cual permite manejar de manera controlada tanto el voltaje como la corriente aplicados a un dispositivo electrónico [50].

Primero se realizaron pruebas sobre los ledes de potencia y después sobre la tira de ledes. En estas pruebas preliminares se pudo observar que los datos proporcionados por el fabricante no correspondieron con los valores arrojados de manera experimental con la fuente de voltaje, por lo tanto se realizaron pruebas para determinar los valores reales a los cuales trabajan de manera óptima cada uno de los ledes.

Para obtener los valores de operación, con condiciones de iluminación controladas en el área de trabajo, el voltaje y la corriente de la fuente de alimentación fueron aumentándose de manera gradual con el control análogo de esta mientras con un luxómetro se iba midiendo la exitancia luminosa de cada led, de esta manera, los valores máximos de operación registrados se obtuvieron cuando la lectura del luxómetro llegó a un punto máximo y se mantuvo

constante, sin embargo, como precaución para evitar el malfuncionamiento de las fuentes de iluminación se disminuyó la corriente y voltaje de alimentación hasta el límite del valor máximo de iluminancia registrado por el luxómetro, para cada caso el voltaje se disminuyó aproximadamente 0.5 volts.

Debido a que de una sola lectura no se puede obtener un valor confiable debido a los errores sistemáticos y aleatorios derivados de una mala lectura de los datos o a los producidos por la misma fuente de alimentación, las pruebas para obtener la caracterización eléctrica de los ledes se realizaron 15 veces para de esta manera minimizar el error en las mediciones. También, si se realiza una prueba al azar sobre cualquier luminaria se puede asegurar que los resultados de dicha prueba corresponderán o serán muy cercanos al valor promedio de comportamiento de la fuente de iluminación sobre la que se realizaron las pruebas.



Figura 3.3 Fuente de voltaje DC marca Keysight modelo 6655A.

Una vez que se obtuvieron los valores de voltaje y corriente máximos de operación para cada fuente de iluminación se calculó la potencia eléctrica de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$P = VI \quad (3.1)$$

Donde P es la potencia eléctrica en watts (W), V es el voltaje en volts (V) e I es la corriente eléctrica en amperes (A).

Los promedios de los valores máximos de operación registrados para cada fuente de iluminación se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Características eléctricas fuentes de iluminación.

led rojo	led amarillo	led verde	led rojo profundo	Tira de ledes
3.45 V	3.52 V	8 V	4.28 V	12.51 V
1.14 A	1.08 A	0.91 A	0.56 A	0.84 A
3.93 W	3.80 W	7.28 W	2.4 W	10.50 W

3.2.2 Caracterización fotométrica

Para la obtención de las características fotométricas de las fuentes de iluminación se utilizó la esfera integradora junto con el espectrorradiómetro y el luxómetro. La esfera integradora fue utilizada para obtener el flujo luminoso y el espectro emitido por las fuentes de iluminación, mientras que el luxómetro se utilizó para calcular su iluminancia.

Para realizar las pruebas de caracterización fotométrica se utilizaron los valores de operación obtenidos de la caracterización eléctrica, y al igual que con esta, se realizaron 15 pruebas para minimizar los errores sistemáticos y aleatorios presentes durante cualquier experimento, de estas pruebas se obtuvo un promedio de iluminación.

Primero se analizó la tira de ledes rojo-azul HCSOYES, para ello se colocó dicha tira dentro de la esfera integradora, una vez ahí se le aplicó el voltaje de operación y por medio del software de control de la esfera se obtuvieron sus parámetros fotométricos. El software arroja una gran cantidad de parámetros, sin embargo, para el presente proyecto de investigación los parámetros de importancia son el espectro emitido por las fuentes de iluminación, su flujo luminoso y en menor medida la temperatura de color correlacionada (CCT).

Después se procedió a analizar los ledes de alta potencia de la marca led World, para obtener sus parámetros fotométricos se siguió la misma metodología que para la tira de ledes.

En la Figura 3.4 se muestra una de las mediciones tomadas, mientras que en la Tabla 3.6 se muestran los promedios obtenidos para cada una de las mediciones.

Tabla 3.6 Características fotométricas fuentes de iluminación.

	led rojo	led amarillo	led verde	led rojo profundo	Tira de ledes
Flujo luminoso (lm)	108.2	85.10	338.86	37.68	58.71
Illuminancia (lx)	71.45	61.81	216.6	28.36	39.65
CCT (K)	1000	1457.75	7686.27	1437.07	1544.67

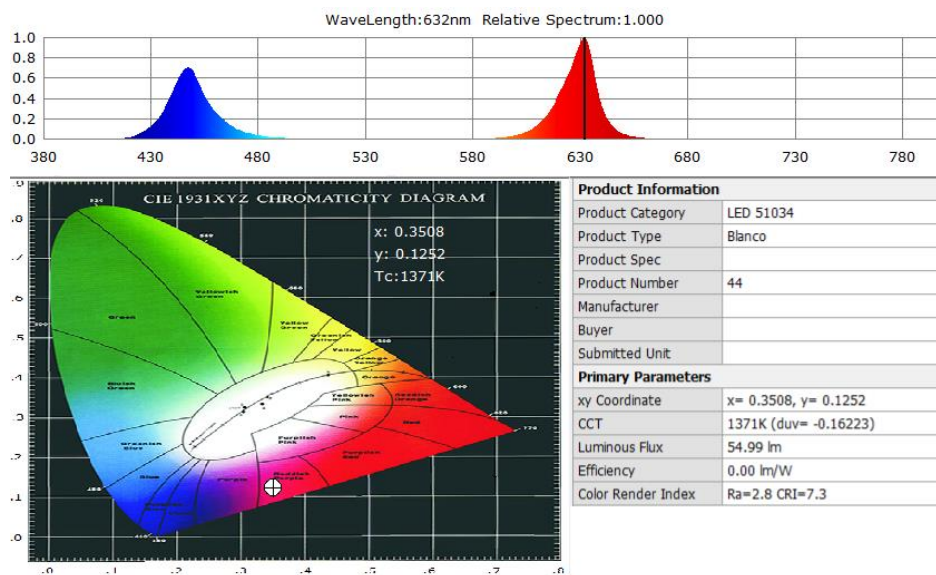


Figura 3.4 Ejemplo de obtención de características fotométricas para la tira de ledes.

3.3 Comportamiento de las fuentes de iluminación ante diferentes instrumentos de medición

Con el fin de analizar el comportamiento de los ledes ante los diferentes instrumentos de medición, se realizaron diversas pruebas suministrándoles diferentes niveles de voltaje y de corriente.

Uno de los objetivos de estas pruebas fue el comparar las mediciones obtenidas mediante los instrumentos de medición fotométricos con un instrumento de medición cuántico; en este caso se utilizaron el espectrorradiómetro y el luxómetro como instrumentos fotométricos y el instrumento cuántico utilizado es el sensor cuántico de la marca LI-COR modelo LI-190R.

Este sensor tiene una constante de calibración de $6.94 \mu\text{A}$ por cada $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, por lo que se utiliza un multímetro para la obtención de las lecturas, y después de manera manual se convierten a unidades de $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. El multímetro utilizado en este trabajo es un multímetro de la marca Keysight modelo 3458A [51].

El procedimiento para llevar a cabo las mediciones fue el mismo tanto para los ledes como para la tira de ledes, este proceso se describe a continuación.

Las mediciones se realizaron ante diferentes niveles de voltaje y corriente aplicados a las fuentes de iluminación, por lo que lo primero que se hizo con cada led fue encontrar sus valores mínimos de operación, utilizando para ello la fuente de alimentación DC.

Ya que se encontraron estos valores, y con los valores máximos encontrados con anterioridad, se obtuvo el intervalo de voltajes con el que se trabajó con cada fuente de iluminación. Este intervalo fue dividido en partes iguales para de esta manera saber que tanto ir aumentando el voltaje en la fuente de alimentación entre cada lectura. Los intervalos se dividieron en diez partes iguales para cada led excepto para la tira de ledes donde se dividió en catorce partes y el led rojo donde se dividió en 13.

Los valores de operación máximos y mínimos para cada fuente de iluminación, así como el aumento de voltaje entre cada medición se muestran a continuación.

Tabla 3.7 Valores máximos y mínimos de operación.

	led rojo	led amarillo	led verde	led rojo profundo	Tira de ledes
Máximo	3.5 V	3.5 V	8 V	4.3 V	12.5 V
Mínimo	1.75 V	1.8 V	5 V	2.5 V	5.5 V
Aumento	0.175 V	0.17 V	0.3 V	0.18 V	0.5 V

Ya con estos valores se procedió a tomar las mediciones con los instrumentos de medición, para ello se colocó al sensor cuántico y al luxómetro en los puertos contenidos en la esfera y los cuales sirven para este propósito.



Figura 3.5 Sensores insertados en los puertos de la esfera integradora.

Todas las mediciones fueron realizadas dentro de la esfera integradora debido a que al no permitir el paso de la luz externa cuando está cerrada permite el estudio de las fuentes de iluminación sin preocuparse por agentes externos.

Las mediciones se tomaron comenzando del nivel de operación mínimo y subiendo progresivamente hasta alcanzar el nivel máximo. A pesar de que la fuente de alimentación permite controlar el voltaje y la corriente de manera precisa hay ocasiones en las que no se puede subir o bajar exactamente la cantidad de voltaje deseada, en estos casos tomó el valor más cercano al valor buscado, ya fuera menor o mayor.

En cada una de las mediciones se registró primero la lectura de voltaje y corriente arrojada por la fuente de alimentación, después la corriente eléctrica medida con el sensor cuántico, seguido del flujo luminoso medido por el espectrorradiómetro, y por último la iluminancia medida con el luxómetro.



Figura 3.6 Ejemplo de medición con diferentes instrumentos. a) Sensor cuántico. b) Luxómetro.

Al igual que con las mediciones realizadas para la caracterización, el experimento para tomar estas mediciones se repitió 15 veces para de esta manera minimizar el error generado en las mismas.

Algo a destacar en el transcurso de las mediciones es que para niveles muy bajos de voltaje, el espectrorradiómetro no fue capaz de registrar ninguna lectura, esto debido a la baja emisión de las fuentes de iluminación y al gran tamaño de la esfera integradora (2 metros de diámetro).

Luego de realizar todas las pruebas descritas hasta el momento se obtuvo suficiente información para poder desarrollar el modelo matemático que permita la medición de la radiación PAR a partir de una medición hecha con un luxómetro.

3.4 Tablas de caracterización de las fuentes de iluminación

A continuación se muestran las tablas con los resultados de la caracterización eléctrica y fotométrica de las fuentes de iluminación descritas en la sección anterior, estos resultados son utilizados para la realización del modelo matemático descrito en el capítulo siguiente. En las tablas mostradas se muestran únicamente los promedios de las 15 mediciones para cada fuente de iluminación.

Tabla 3.8 Comportamiento del led rojo frente a los diferentes instrumentos de medición.

Led rojo					
Fuente		Sensor		Esfera	Luxómetro
V	A	nA	$\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$	lm	lx
1.778	0.033	0.994	0.143	-	4.220
2.041	0.168	4.997	0.720	19.696	13.987
2.299	0.328	9.856	1.420	37.464	26.013
2.567	0.508	14.956	2.155	55.378	37.873
2.799	0.674	19.550	2.817	70.865	46.987
3.060	0.866	24.607	3.546	87.266	57.500
3.316	1.060	29.458	4.245	102.359	67.313
3.447	1.145	31.573	4.549	108.902	71.453

Tabla 3.9 Comportamiento del led amarillo frente a los diferentes instrumentos de medición.

Led amarillo					
Fuente		Sensor		Esfera	Luxómetro
V	A	nA	$\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$	lm	lx
1.81	0.017	0.306	0.044	-	2
2.17	0.192	2.147	0.309	-	14.753
2.50	0.400	4.336	0.625	39.789	29.453
2.83	0.617	6.376	0.919	57.650	42.527
3.16	0.841	8.175	1.178	72.625	53.207
3.52	1.081	9.755	1.406	85.098	61.807

Tabla 3.10 Comportamiento del led verde frente a los diferentes instrumentos de medición.

Led verde					
Fuente		Sensor		Esfera	Luxómetro
V	A	nA	$\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$	lm	lx
5	0.0012	0.219	0.032	-	1.440
5.59	0.025	1.821	0.262	-	14.840
6.18	0.148	8.589	1.238	98.787	67.193
6.81	0.369	17.617	2.538	193.818	131.880
7.4	0.633	25.747	3.710	275.355	187.353
7.99	0.905	32.317	4.657	338.862	231.80

Tabla 3.11 Comportamiento del led rojo profundo frente a los diferentes instrumentos de medición.

Led rojo profundo					
Fuente		Sensor		Esfera	Luxómetro
V	A	nA	$\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$	lm	lx
2.5	0.001	0.199	0.029	-	1.093
2.86	0.077	3.333	0.480	-	5.580
3.22	0.202	7.991	1.151	-	12.580
3.59	0.333	12.177	1.755	26.247	19.427
3.95	0.457	15.586	2.246	34.403	25.627
4.28	0.563	18.117	2.610	40.627	30.420

Tabla 3.12 Comportamiento de la tira de ledes frente a los diferentes instrumentos de medición.

Tira de ledes					
Fuente		Sensor		Esfera	Luxómetro
V	A	nA	$\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$	lm	lx
5.522	0.008	0.287	0.041	-	1.293
6.521	0.069	1.791	0.258	-	4.420
7.508	0.176	5.111	0.737	15.263	10.353
8.508	0.300	8.915	1.285	24.845	16.820
9.514	0.432	12.851	1.852	34.340	23.233
10.507	0.569	16.711	2.408	43.095	29.267
11.514	0.708	20.436	2.945	51.236	34.720
12.512	0.844	23.989	3.457	58.713	39.647

CAPÍTULO IV. DESARROLLO DEL MEDIDOR DE RADIACIÓN PAR

En este capítulo se muestra el desarrollo del modelo matemático que sirvió como base para la medición indirecta de la radiación fotosintéticamente activa, dicho modelo fue desarrollado a partir de los datos y ecuaciones que fueron descritos en los capítulos anteriores. Se muestra también el proceso de desarrollo de un luxómetro de bajo costo realizado con un Arduino y un sensor digital de luz que servirá como reemplazo de un luxómetro comercial.

4.1 Desarrollo del modelo matemático

Para poder medir la radiación fotosintéticamente activa de manera indirecta fue necesario el desarrollo de una herramienta o modelo matemático el cual, al trabajar de manera conjunta con un luxómetro, arroje dicha medición. Para facilitar el desarrollo del modelo matemático se trabajó con el software de programación LabVIEW.

Para el desarrollo de dicho modelo se partió de la ecuación (2.8) del principio de funcionamiento de los detectores de radiación y de los datos de la caracterización de las fuentes de iluminación descritas en el capítulo anterior.

Como se explicó anteriormente, se tomaron lecturas con el luxómetro, la esfera integradora y el sensor cuántico a diferentes niveles de voltaje y corriente para cada fuente de iluminación. Luego de registrar todas las lecturas del comportamiento de las fuentes de iluminación, lo primero que se hizo para el desarrollo del modelo matemático fue obtener los datos de los espectros de iluminación de cada fuente de iluminación arrojados por la esfera integradora para cada una de las lecturas.

El software de la esfera integradora permite guardar los datos de cada medición en un archivo de texto, el cual contiene tres columnas de datos, en la primera aparecen las longitudes de onda desde 380 nm hasta 800 nm, en la segunda aparece el dato de Pupil Lumen o PL [52], y en la tercera aparece la potencia emitida por cada una de las longitudes de onda del espectro de iluminación. Fue con los datos de este archivo con lo que se comenzó el desarrollo del programa en LabVIEW.

WL (nm)	PL	PE (mW/nm)
380	0.0014	0.0049
381	0.0053	0.0192
382	0.0011	0.0041
798	0.0129	0.0465
799	0.0038	0.0138
800	0.0065	0.0234

Figura 4.1 Ejemplo de datos obtenidos de la esfera integradora.

Como observación, hay que señalar que para el desarrollo del programa en LabVIEW se utilizó como base la información obtenida de la medición número 9 del led rojo, sin embargo, la información de cualquier otra medición también podría haber sido utilizada y el funcionamiento resultante del programa sería el mismo.

Una vez dentro de LabVIEW lo primero que se hizo fue colocar una función que permitiera abrir el archivo de texto con los datos arrojados por la esfera, como en este trabajo solo se utilizan las columnas uno y tres para realizar los cálculos necesarios para el desarrollo del programa se excluyó la segunda columna (PL). Estas dos columnas se graficaron con el fin de observar el espectro de iluminación de cada fuente y así corroborar que los datos utilizados para los cálculos posteriores fueran los correctos al hacer una comparación con el espectro mostrado por el software de la esfera integradora.

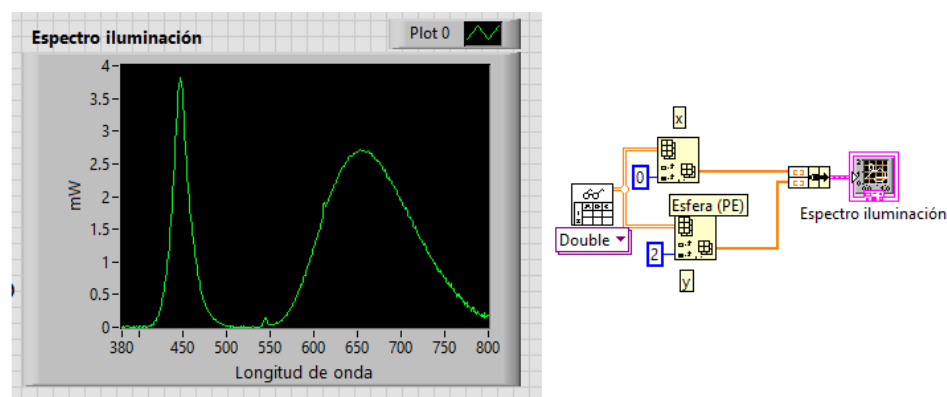


Figura 4.2 Obtención de datos y grafica de espectro de iluminación.

Una vez obtenidos y graficados los datos de la esfera integradora se procedió a realizar los cálculos necesarios para el desarrollo del modelo matemático, en el cual, uno de los objetivos

principales es el poder relacionar cantidades fotométricas (flujo luminoso) con cuánticas (flujo de fotones).

Para poder obtener una relación entre cantidades fotométricas y cuánticas primero fue necesario aplicar la ecuación (2.8) tomando dos aproximaciones diferentes, las cuales al ser independientes una de la otra no importa el orden en el que sean calculadas. Debido al paradigma de programación de LabVIEW, en el programa realizado estos cálculos son elaborados de manera simultánea.

A continuación se explica de manera detallada el proceso llevado a cabo para el cálculo de ambas aproximaciones.

4.1.1 Medición del flujo fotónico

Los datos de la tercera columna (potencia emitida) del archivo de texto arrojado por la esfera integradora fueron utilizados para calcular la energía de cada fotón, para este cálculo se utilizó la ecuación de energía de Planck.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.1)$$

Donde E es la energía del fotón, h es la constante de Planck (6.626×10^{-34} J·s), c es la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s) y λ es la longitud de onda. Al ser energía, la unidad resultante de esta operación está dada en Joules (J).

Después de calcular la energía de cada fotón, se dividió la potencia emitida por cada una de las longitudes de onda de la fuente de iluminación analizada entre la energía emitida por el fotón a esa misma longitud de onda para obtener de esta manera la cantidad de fotones por segundo en esa longitud de onda. Al sumar la cantidad de fotones de cada una de las longitudes de onda se obtuvo la cantidad total de fotones emitidos por segundo de cada una de las fuentes de iluminación analizadas. Finalmente, esta cantidad fue dividida entre el número de Avogadro (6.022×10^{23}) para obtener los moles de fotones por segundo emitidos por cada fuente de iluminación. Todo lo descrito se muestra en la siguiente ecuación y también en la Figura 4.3.

$$S = \frac{\sum_{400}^{700} \frac{Pe}{E}}{N_A} \quad (4.2)$$

En donde S es el total del flujo de fotones, Pe es la potencia emitida por cada longitud de onda del espectro de emisión de la fuente analizada, E es la energía del fotón y N_A es el número de Avogadro.

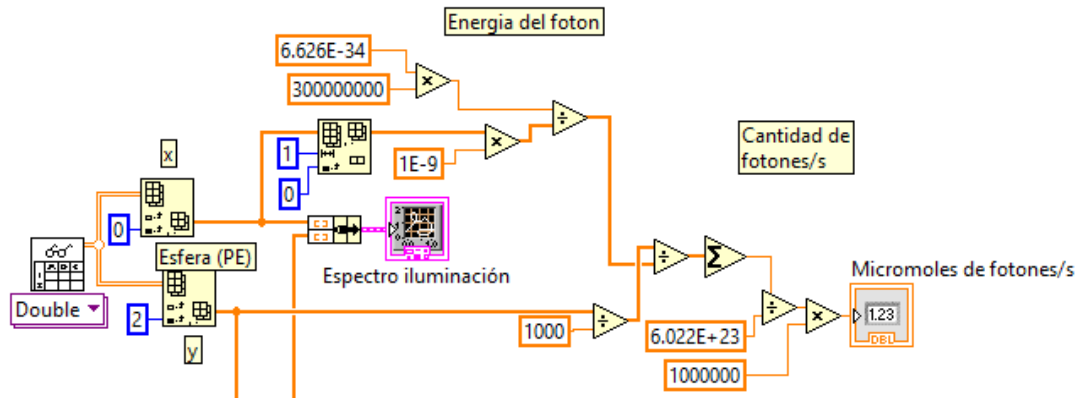


Figura 4.3 Cálculos realizados en LabVIEW para la aproximación cuántica.

4.1.2 Medición del flujo luminoso

Con los mismos datos arrojados por la esfera integradora se realizó el cálculo del flujo luminoso de cada fuente de iluminación. Para realizar este cálculo fue necesario utilizar también los datos de la curva espectral de eficiencia luminosa o curva $V(\lambda)$ [9].

El cálculo del flujo luminoso se realizó multiplicando punto a punto los valores de potencia emitida de la fuente analizada por el valor de respuesta de la curva $V(\lambda)$ para cada una de las longitudes de onda y también por 683 que es la máxima eficacia espectral de la radiación para la visión fotópica; finalmente se realizó la suma de cada operación para obtener el flujo luminoso total en lúmenes. En la siguiente ecuación se muestran todos los cálculos descritos para la medición del flujo luminoso, mientras que en la Figura 4.4 se muestra la implementación realizada en LabVIEW.

$$\Phi = \sum_{400}^{700} 683 \cdot Pe \cdot V(\lambda) \quad (4.3)$$

En donde Φ es el flujo luminoso, P_e es la potencia emitida por cada longitud de onda del espectro de emisión de la fuente analizada y $V(\lambda)$ es el valor de respuesta de la curva $V(\lambda)$.

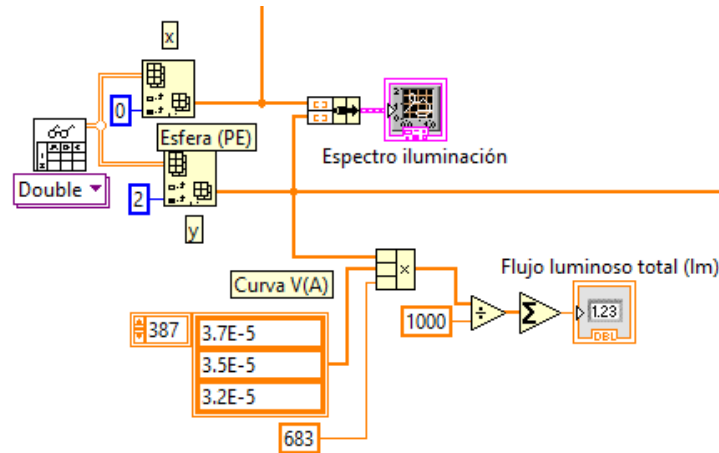


Figura 4.4 Cálculos realizados en LabVIEW para la aproximación fotométrica.

4.1.3 Relación entre flujo fotónico y flujo luminoso

Una vez obtenidas las dos mediciones se realizó la división del resultado de la medición del flujo fotónico ($\mu\text{moles fotones/s}$) entre el resultado de la medición del flujo luminoso (lúmenes), quedando las unidades de esta operación como ($\mu\text{moles fotones/s}$)/lumen; el resultado de esta división fue multiplicado a su vez por la lectura obtenida con el luxómetro para ese voltaje y corriente de operación; esto se hizo de esta manera debido a que las unidades de iluminancia (luxes) se derivan del flujo luminoso por unidad de área, por lo que al multiplicar esta lectura por el resultado de la división queda un resultado en las mismas unidades que la radiación PAR ($\mu\text{moles fotones/s}\cdot\text{m}^2$). Este resultado es un primer acercamiento a la medición indirecta de la radiación PAR, al cual a partir de este momento se le llamará PARI, el cual será utilizado más adelante. A continuación se muestra la ecuación que representa todo lo descrito con anterioridad y en la Figura 4.5 se muestra la implementación realizada en LabVIEW.

$$PARI = \left(\frac{S}{\Phi} \right) \cdot E \quad (4.4)$$

En donde $PARI$ es el valor preliminar de la radiación PAR indirecta, S es el flujo de fotones, Φ es el flujo luminoso, y E es el valor de la iluminancia medida con el luxómetro.

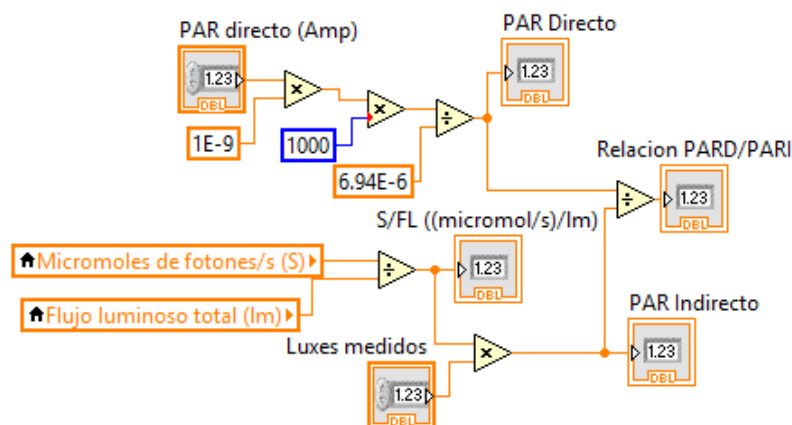


Figura 4.5 Relación entre aproximación cuántica y fotométrica y cálculo directo e indirecto de PAR.

4.1.4 Implementación completa en LabVIEW

A continuación se muestra el programa completo desarrollado en LabVIEW. En la Figura 4.6 se observa el panel frontal.

En el panel frontal se grafica el espectro de emisión de la fuente de iluminación analizada, se introducen los valores de voltaje y corriente con los que se alimenta la fuente de iluminación para poder calcular la potencia eléctrica, la cual también es mostrada en el panel, también se introducen los valores obtenidos con el luxómetro y el sensor cuántico, después se hace la conversión de micro amperes a micromoles para obtener la medición de la radiación PAR utilizando la constante de calibración del sensor LI-190R.

Debajo de la medición directa de la radiación PAR se muestran las mediciones del flujo fotonico y del flujo luminoso, las cuales ya fueron explicadas con anterioridad, así como la relación entre ambas, se muestra también el primer acercamiento a la medición indirecta de la radiación PAR. Por último se muestran dos relaciones, las cuales serán explicadas de manera extendida en la siguiente sección.

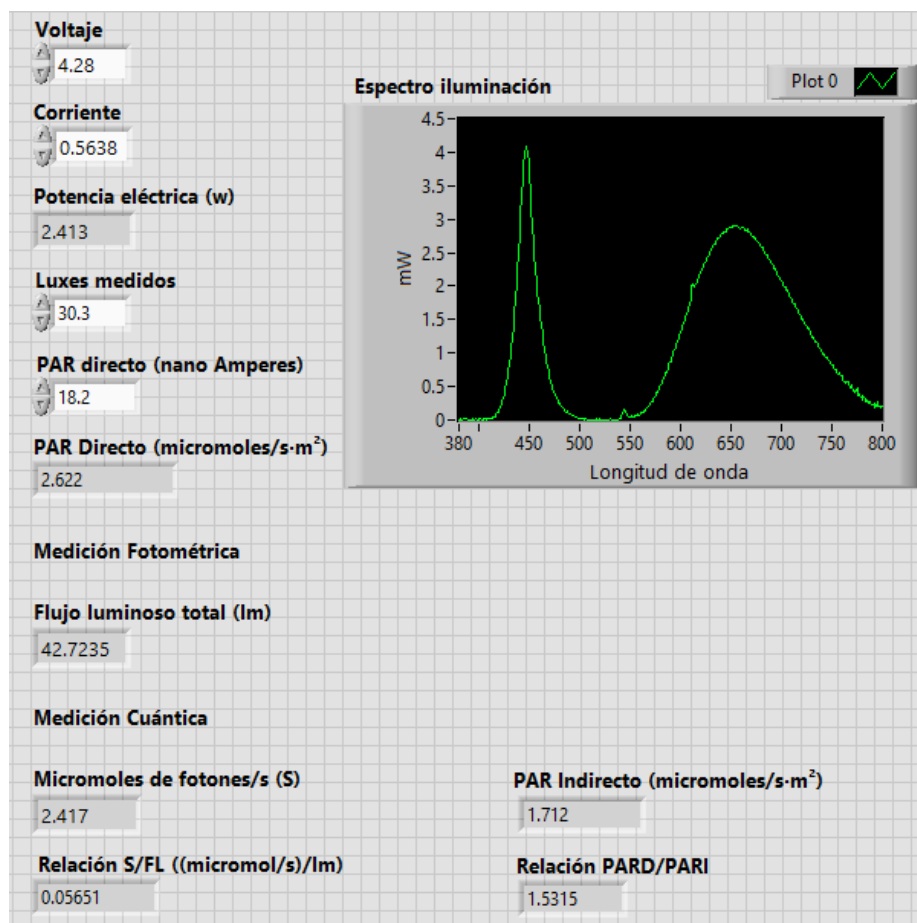


Figura 4.6 Implementación en LabVIEW.

4.2 Constantes obtenidas para el cálculo de la radiación PAR

Luego de los cálculos hechos hasta el momento y después de tener un primer acercamiento a la medición de la radiación PAR de manera indirecta, se realizó una comparación entre este resultado (PARI) con la lectura medida directamente con el sensor cuántico LI-190R (PAR Directo o PARD), observándose que existía una relación de aproximadamente 2 (PARD) a 1 (PARI) para el valor de voltaje y corriente con el que había estado trabajando hasta el momento. Para observar si dicha relación se mantenía constante o sufría cambios al subir o bajar los valores de voltaje y corriente aplicados a las fuentes de iluminación se realizó el cálculo de todos los valores de PARI y PARD.

Al hacer las comparaciones para cada una de las fuentes de iluminación se observó que si hubo un cambio en la relación PARD/PARI, el cual fue incrementando de manera progresiva conforme el nivel de voltaje y corriente fueron aumentando, sin embargo este cambio fue de muy baja magnitud.

Al hacer un promedio de todas las relaciones calculadas para cada nivel de voltaje y corriente suministrados a cada una de las fuentes de iluminación y calculando la diferencia entre los valores máximos y mínimos con respecto al valor promedio se observó que no fue una diferencia muy significativa por lo que fue omitida. De esta manera se determinó que el promedio de esta relación serviría como una constante auxiliar para el cálculo indirecto de la radiación PAR para cada fuente de iluminación.

Como se mencionó durante el cálculo de PARI, se hizo una relación entre la aproximación cuántica y la fotométrica, la cual al calcularla para cada fuente de iluminación se observó que mantenía un comportamiento similar al presentado por la primera constante descrita más arriba, por lo que el valor de esta relación fue tomado también como una constante auxiliar.

4.2.1 Mediciones realizadas a partir de las ecuaciones obtenidas

Con las dos constantes obtenidas, además de un luxómetro, se debería poder calcular la radiación PAR de manera indirecta, por lo que se realizaron diferentes mediciones para comprobar esta suposición. Para estas mediciones primero se alimentó la fuente de iluminación analizada con un valor al azar que estuviera dentro del rango de operación, después se midió la iluminancia con el luxómetro para posteriormente multiplicar este valor por la constante 1 (aproximación cuántica/fotométrica) y por la constante 2 (PARD/PARI), de esa manera se obtuvo indirectamente la radiación PAR. También se registró la lectura tomada con el detector cuántico con los mismos valores de alimentación, esto para comparar y observar las diferencias entre la lectura indirecta y la lectura directa. En la siguiente ecuación se muestra el procedimiento realizado para la medición de la radiación PAR indirecta.

$$PAR_{Ind} = E \cdot Cte_1 \cdot Cte_2 \quad (4.5)$$

Donde PAR_{Ind} es la lectura indirecta de la radiación PAR, Cte_1 y Cte_2 son las constantes obtenidas y E es el valor de la iluminancia medida con el luxómetro.

Se debe resaltar que las constantes utilizadas en cada medición dependen de la fuente de iluminación estudiada con la que se esté trabajando. También es importante señalar que estas mediciones se hicieron colocando las fuentes de iluminación dentro de la esfera integradora, esto con el fin de contar con condiciones controladas.

Se realizaron diversas mediciones con cada fuente de iluminación para comparar la radiación PAR medida directamente con el sensor cuántico y la medida indirectamente a través del luxómetro. Al comparar los resultados se pudo observar que las lecturas eran muy semejantes entre sí, con algunas excepciones las cuales pudieron deberse a los errores inherentes en una medición.

4.3 Desarrollo luxómetro de bajo costo

Para las mediciones descritas anteriormente se utilizó un luxómetro comercial de la marca Gossen modelo Mavolux 5032C, el cual tiene un precio que va de los 600 a 950 euros por lo que no es accesible al usuario promedio, debido a esto, se optó por desarrollar un dispositivo que sea accesible a cualquier persona y que sea capaz de emular el rendimiento de un luxómetro comercial. Para su desarrollo se optó por utilizar la plataforma Arduino por la simplicidad en su manejo, además se eligieron dos dispositivos electrónicos diferentes para el monitoreo de la luz: una fotorresistencia común y un sensor de luz modelo BH1750 para microcontrolador. El objetivo en la adquisición de estos dispositivos fue el comparar su desempeño para poder elegir el que mejor se adecuara para el propósito de este proyecto, ya que uno es analógico (fotorresistencia) y el otro es digital (sensor).

Mientras que el sensor de luz no necesita ningún arreglo o modificación extra para su funcionamiento, la fotorresistencia es un dispositivo analógico por lo que antes de ser utilizada con la tarjeta Arduino fue necesario obtener su ecuación de respuesta con respecto al voltaje.

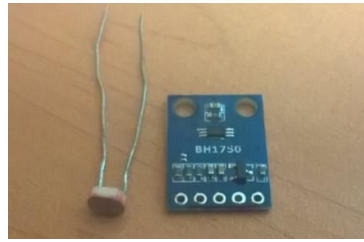


Figura 4.7 Fotorresistencia y sensor BH1750

Para obtener la ecuación de respuesta primero fue necesario conocer el comportamiento de la fotorresistencia ante diferentes condiciones de iluminación, para ello se llevó a cabo una prueba experimental la cual es utilizada para comprobar la ley de Malus [53] en este caso la prueba se utilizó para obtener la ecuación de respuesta de la fotorresistencia.

Se montó el arreglo mostrado en la Figura 4.8 para llevar a cabo la prueba experimental, la cual consistió en alinear un polarizador lineal y un analizador de estado de polarización en un mismo ángulo, después se pasó el haz del láser a través de estos dos elementos mientras el analizador se fue girando progresivamente, de esta manera se fueron registrando las lecturas obtenidas por el luxómetro ante los cambios de iluminación.

Luego de registrar las mediciones con el luxómetro, éste fue reemplazado por una fotorresistencia y se repitió el procedimiento anterior obteniendo así el cambio en el valor de la fotorresistencia ante los cambios progresivos de iluminación.

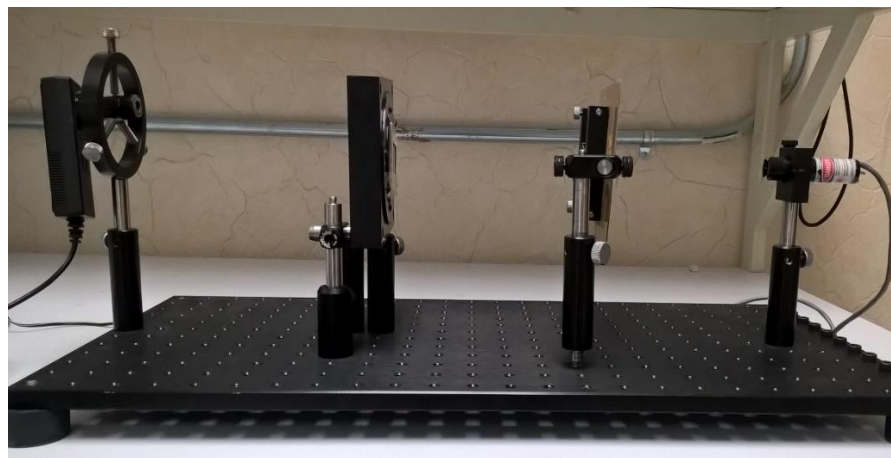


Figura 4.8 Arreglo practico para caracterización de fotorresistencia.

Luego de lo anterior se conectó la fotorresistencia a la tarjeta Arduino de acuerdo al circuito mostrado en la Figura 4.9 y se repitió una vez más el experimento registrando ahora los cambios en el voltaje a través de la fotorresistencia.

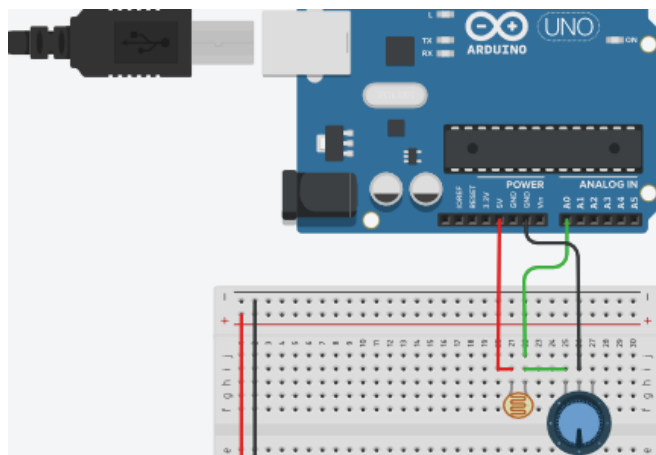


Figura 4.9 Circuito experimental para caracterización eléctrica de la fotorresistencia.

Los datos obtenidos fueron graficados en Excel para poder calcular de manera rápida la ecuación de respuesta de la fotorresistencia. La ecuación obtenida fue incluida en un código implementado en Arduino el cual calcula la iluminancia por medio de una entrada analógica y de la fotorresistencia.

Al realizar diversas pruebas de lectura se observó que el comportamiento de la fotorresistencia era deficiente, ya que las lecturas mostraron muy poca variación a los cambios de iluminación, el comportamiento más notorio fue que al tapar por completo la fotorresistencia las lecturas registradas estaban muy por encima del cero.

Debido a su comportamiento inadecuado, la fotorresistencia fue descartada para el desarrollo del luxómetro, por lo que se comenzó a trabajar en la otra alternativa que es el sensor BH1750.

Como ya se mencionó este sensor no requiere ninguna modificación o cálculo extra para su funcionamiento, debido a que cuenta con una interfaz I²C únicamente hizo falta conectarlo a los puertos que contienen dicha interfaz en la tarjeta Arduino y trabajar en el código de

programación [54]. Para que el código de programación trabaje de manera correcta es necesario agregar al IDE de Arduino una librería con el código objeto del sensor. En este caso se utilizó la librería creada por Cristopher Laws [55].

Después de terminar el código de programación se procedió conectar el sensor a la tarjeta Arduino de acuerdo a la siguiente figura.

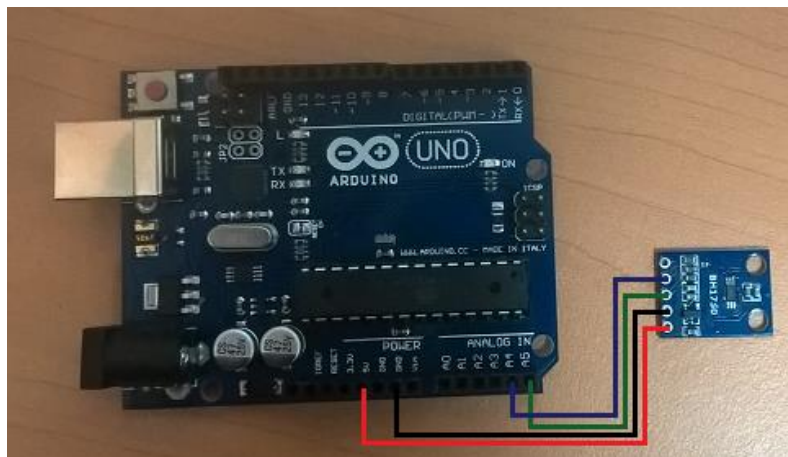


Figura 4.10 Conexión entre sensor BH1750 y tarjeta Arduino Uno.

Ya con todo integrado se compiló el código para corroborar el correcto funcionamiento del circuito y se tomaron algunas lecturas con la iluminación normal del laboratorio.

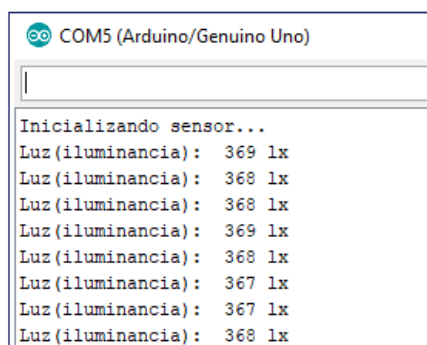


Figura 4.11 Ejemplo de medición con el luxómetro desarrollado.

Una vez que se comprobó que tanto el código de programación como el circuito armado funcionaran de manera adecuada, a pesar de que la hoja de datos menciona que el sensor tiene

una respuesta a la luz similar a la del ojo humano se hicieron pruebas para corroborar esta información. Estas pruebas se realizaron utilizando un espejo frío de 45°, el cual es un espejo que al colocarse a 45° con respecto a una fuente de iluminación refleja las longitudes de onda pertenecientes al espectro visible (400 – 700 nm) mientras que transmite las pertenecientes al infrarrojo (> 700 nm), por lo que, de ser cierta la información de la hoja de datos, al tomar lecturas con el sensor y el luxómetro con luz filtrada a través del reflejo y transmisión del espejo estas deberían ser similares.



Figura 4.12 Espejo frío de 45°.

Para impedir que otras fuentes de iluminación afectaran las mediciones se cubrió el sensor y el luxómetro con un cilindro hueco negro recubierto con cinta aislante negra, esto permite también que el paso de la luz hacia el sensor sea solamente de manera normal; por otro lado, para las pruebas se utilizaron tres tipos de fuentes de iluminación: la iluminación normal del laboratorio, una lámpara incandescente de 30 w y la luz del sol a mediodía. Las dos últimas se seleccionaron ya que también cuentan con una parte infrarroja en su espectro de emisión.

La primera parte de las pruebas consistió en registrar cuantos luxes marcaban tanto el luxómetro como el sensor al exponerlos directamente a las diferentes fuentes de iluminación (sin tener el cilindro puesto). Después se cubrió el sensor y el luxómetro con el cilindro y se registraron nuevamente las lecturas de ambos elementos. La tercera parte consistió en colocar el espejo sobre el cilindro protector a 45° para que reflejara la parte visible de las fuentes de iluminación y transmitiera la parte infrarroja, de esta manera únicamente la parte visible fue

captada por los dos elementos de medición. Cabe resaltar que las lecturas obtenidas sufrieron variaciones dependiendo de la distancia a la que fuera colocado el espejo del cilindro.

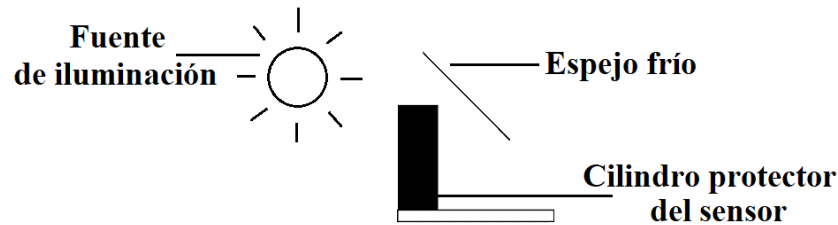


Figura 4.13 Arreglo experimental para las pruebas con el espejo frío.

Por último se realizó la comparación de los datos registrados del sensor y el luxómetro para observar sus diferencias, las cuales se mantuvieron prácticamente idénticas para cada fuente de iluminación, por lo que se puede decir que el sensor BH1750 responde solamente a la radiación en el intervalo visible del espectro electromagnético.

Ya con el conocimiento del funcionamiento del sensor BH1750 se realizaron varias mediciones a través del laboratorio en diferentes puntos y diferentes alturas para comparar las lecturas obtenidas con el sensor y con el luxómetro.

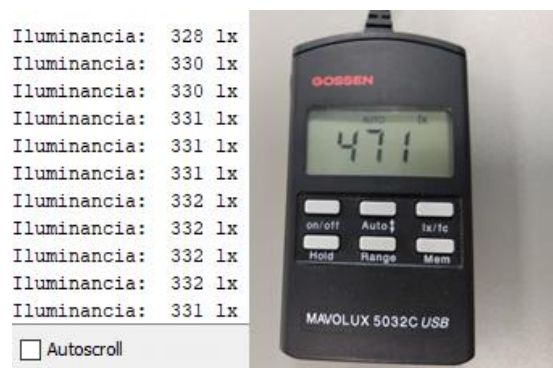


Figura 4.14 Ejemplo de iluminación media de ambos instrumentos.

Las lecturas obtenidas con el luxómetro en promedio fueron 1.43 veces más grandes que las obtenidas con el sensor BH1750. Debido a la simplicidad en su diseño y a su bajo costo, además de las condiciones no controladas en las que se hicieron las mediciones se esperaba

que las lecturas obtenidas con el sensor tuvieran un cierto error con respecto a las obtenidas con el luxómetro. En la sección 4.7 se explican de manera detallada las diferencias de las lecturas obtenidas con cada uno de los instrumentos de medición.

4.4 Pruebas con luxómetro de bajo costo y esfera integradora

A pesar de las diferencias entre las lecturas de ambos instrumentos de medición se realizaron pruebas similares a las mencionadas en la sección 4.2.1 de este capítulo, intercambiando el luxómetro comercial por el sensor BH1750 para observar en primer lugar las diferencias entre las lecturas obtenidas con este y las obtenidas con el luxómetro en condiciones controladas, y también para observar las diferencias entre la radiación PAR medida directamente con el sensor cuántico y la medida indirectamente a través de la lectura obtenida con el luxómetro de bajo costo y las constantes obtenidas mediante cálculos matemáticos.

Al hacer una relación entre las mediciones tomadas directamente con el sensor cuántico y las realizadas a partir de la lectura obtenida con el sensor BH1750 se observó que el error de la medición indirecta fue un poco mayor en comparación a la medición indirecta realizada a partir de la medición con el luxómetro comercial, lo cual era un resultado esperado.

Por otro lado, al hacer una relación para cada led entre las lecturas tomadas con el luxómetro y el sensor BH1750 dentro de la esfera integradora se observó que dicha relación fue disminuyendo conforme se aumentó el voltaje y corriente de alimentación de las fuentes de iluminación y por lo tanto también la iluminancia. De estas relaciones se obtuvieron ecuaciones para cada led, las cuales al ser integradas en el código de programación permitieron igualar el comportamiento del sensor BH1750 con el luxómetro comercial.

4.5 Pruebas realizadas fuera de la esfera integradora

Para observar el comportamiento de los instrumentos de medición en condiciones no controladas se realizaron algunas mediciones fuera de la esfera integradora utilizando las mismas fuentes de iluminación.

Estas mediciones se hicieron en base al montaje mostrado en la Figura 4.14 y con las luces del laboratorio apagadas para evitar tener lecturas diferentes a las fuentes de iluminación analizadas. Para estas mediciones, al igual que para las realizadas anteriormente dentro de la esfera integradora, se fueron aumentando de manera progresiva el voltaje y la corriente de alimentación de cada fuente de iluminación hasta llegar a los valores máximos de operación.

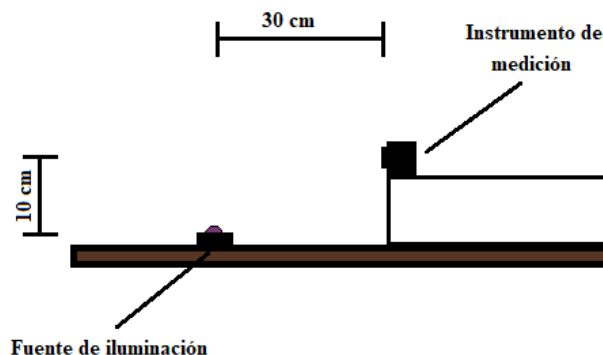


Figura 4.15 Montaje práctico para mediciones fuera de la esfera integradora.

Se hicieron dos mediciones: una a 30 cm de distancia entre la fuente de iluminación y el instrumento de medición respectivo, esta distancia fue elegida por ser una de las distancias promedio utilizadas en cultivos iluminados con ledes [56], y la otra a un metro de distancia, esta distancia fue elegida debido a que es la misma separación que se tiene entre el instrumento de medición y la fuente de iluminación dentro de la esfera integradora.

Esta toma de mediciones fue dividida en dos partes, en la primera se utilizaron el luxómetro y el sensor cuántico, mientras que en la segunda se reemplazó el luxómetro por el sensor BH1750. Para la toma de mediciones se fueron intercalando los instrumentos de medición para poder tomar las mediciones desde la misma posición.

Para las mediciones hechas a 30 cm de distancia en ambos casos la relación entre la medición directa e indirecta fue aumentando muy lentamente de manera progresiva, manteniéndose constante en algunos casos. Por otro lado, para las mediciones hechas a un metro de distancia, el comportamiento fue similar en las lecturas tomadas con el luxómetro comercial, pero el luxómetro de bajo costo no fue capaz de registrar lecturas a esta distancia o

las lecturas marcadas no fueron constantes por lo que no fue posible observar el comportamiento de la relación entre medición directa e indirecta de manera clara.

De las mediciones tomadas a 30 cm de distancia en ambos casos se observó que las mediciones indirectas fueron en promedio alrededor de 0.5 veces el valor de la medición tomada directamente con el sensor cuántico; la solución a esta problemática se presenta un poco más adelante en este mismo capítulo.

4.6 Mediciones realizadas con cultivos iluminados artificialmente

Aparte de las mediciones mencionadas con anterioridad se tomaron otra serie de mediciones dentro de una estructura adecuada con iluminación artificial para la germinación de plantas. Estas mediciones fueron realizadas con los tres instrumentos de medición utilizados en las mediciones anteriores; cabe resaltar que la iluminación es proporcionada por tiras de ledes.

El objetivo principal de estas mediciones fue realizar una medición diferencial para observar las diferencias entre las mediciones tomadas con las luces del laboratorio encendidas y con las luces apagadas. Por otro lado también se buscó la manera de poder igualar las mediciones hechas indirectamente con las hechas directamente con el sensor cuántico, hablando únicamente de las mediciones fuera de la esfera integradora. En otras palabras encontrar o calcular una ecuación o una constante que ayude a disminuir el error en las mediciones indirectas como las descritas en la sección anterior.

El laboratorio sistemas de iluminación cuenta con seis sistemas de lámparas repartidos de forma que quedan distribuidos tres en un lado y tres en el otro. Al momento de hacer las mediciones la estructura se colocó en un lado del laboratorio quedando expuesta de manera más directa a las lámparas situadas encima de esta.

En la Figura 4.16 se muestra un esquema sencillo del laboratorio donde se aprecia la distribución de las lámparas y el lugar donde fue colocada la estructura con la tira de ledes.

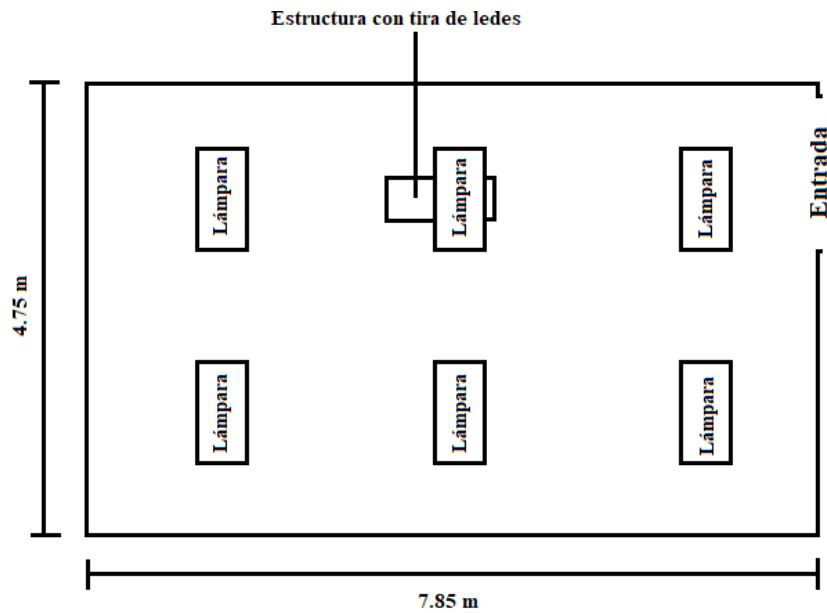


Figura 4.16 Distribución de lámparas en el laboratorio de sistemas de iluminación.

La toma de mediciones se hizo siguiendo una serie de combinaciones de iluminación para poder observar de manera clara las diferencias entre cada una. Las combinaciones fueron las siguientes: luz encendida con las tiras encendidas, luz encendida con las tiras apagadas, luz apagada con las tiras encendidas, luz de arriba encendida con las tiras encendidas, luz de arriba encendida con las tiras apagadas, luz opuesta encendida con las tiras encendidas y finalmente luz opuesta encendida con las tiras apagadas.



Figura 4.17 Estructura para germinación de plantas con iluminación tipo led.

Se tomaron mediciones en cinco días diferentes para observar si había cambios significativos entre cada día. De estas mediciones se pudo observar que no hubo un cambio

muy significativo entre las mediciones con la luz apagada con las mediciones con la luz encendida, esto debido a que la estructura donde se colocaron las tiras de ledes permite que el paso de luz exterior sea mínimo.

A pesar de que las tiras de ledes sobre las que se hicieron las mediciones eran del mismo tipo que las utilizadas para las pruebas hechas dentro de la esfera integradora, estas no iluminaban de la misma manera debido al uso dado con anterioridad, por lo que se realizaron pruebas sobre estas tiras para obtener sus constantes de medición siguiendo un procedimiento similar al hecho para las fuentes de iluminación mencionadas anteriormente.

Al observar las mediciones tomadas con ambos luxómetros dentro de la estructura se observó que había una diferencia significativa entre ambas, por lo que, con el fin de igualar las mediciones entre ambos luxómetros se tomaron una serie de mediciones aplicando diferentes niveles de voltaje a las tiras de ledes para poder obtener una relación entre ambas mediciones. Ya con la relación obtenida se repitió esta parte del experimento y se pudo observar que la diferencia de las mediciones disminuyó de manera notoria, yendo ésta de 1 lux hasta 15 luxes, a diferencia de las mediciones anteriores donde había diferencias de hasta 130 luxes.

Ya que se igualaron las lecturas de los luxómetros y se obtuvieron las constantes de medición de las tiras de ledes se procedió a tomar las mediciones con los tres instrumentos de medición sobre las tiras de ledes. Para la toma de estas mediciones se fue aumentando progresivamente el voltaje de alimentación conforme se fueron registrando las diferentes lecturas; hay que señalar que la distancia entre las tiras y los instrumentos de medición fue de aproximadamente 23 centímetros.

Una vez registradas todas las lecturas se procedió a calcular la radiación PAR de manera indirecta para después ser comparada con la radiación PAR medida de manera directa con el sensor cuántico.

Al comparar las mediciones indirectas con las directas se observó que las mediciones directas fueron en promedio un poco mayores de 2 con respecto a las mediciones indirectas,

este comportamiento es similar al mostrado en las mediciones tomadas con las otras tres fuentes de iluminación, a continuación se muestra como fue corregido este error.

4.7 Corrección de errores en mediciones fuera de la esfera integradora

Como se mencionó anteriormente, las mediciones realizadas fuera de la esfera integradora mostraron que las mediciones tomadas de manera indirecta a través de las constantes de medición tenían una amplitud 0.5 veces menor que las tomadas directamente con el sensor cuántico.

Al analizar el proceso de las mediciones dentro y fuera de la esfera se pudo observar que en las mediciones fuera de esta los instrumentos de medición fueron colocados a la misma altura, por lo que recibieron la misma cantidad de iluminación; por otro lado, en las mediciones dentro de la esfera integradora se observó que al colocar el sensor cuántico en uno de los puertos este queda al nivel de la superficie debido a que por su forma puede ser introducido en su totalidad, mientras que al colocar el luxómetro en uno de los puertos de la esfera este no puede ser introducido debido a su geometría, en la siguiente figura se muestra la geometría de los instrumentos de medición así como de los puertos de la esfera integradora.

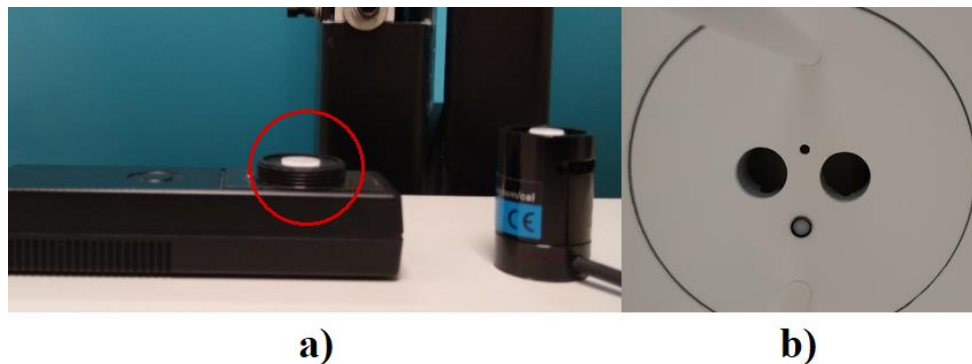


Figura 4.18 a) Geometría de los instrumentos de medición. b) Puertos de esfera integradora.

Como se puede observar, la parte del luxómetro señalada en la figura anterior es la única que puede ser colocada en el puerto de la esfera, quedando un hueco en forma de cilindro entre el luxómetro y la superficie interior de la esfera, el cual impide la captación total de la luz emitida por la fuente de iluminación analizada.

Debido a que este problema no se presenta fuera de la esfera integradora es que se tiene el error en las mediciones indirectas, para solucionarlo fue necesario calcular el ángulo sólido con el cual el luxómetro es capaz de captar la luz dentro de la esfera integradora y aplicar el valor encontrado a las mediciones tomadas fuera de la esfera integradora.

Lo primero que se hizo fue tomar las mediciones del puerto y del luxómetro, después se hizo una relación de triángulos como se muestra en la figura para calcular el ángulo que da forma al cono de luz que es captado por el luxómetro.

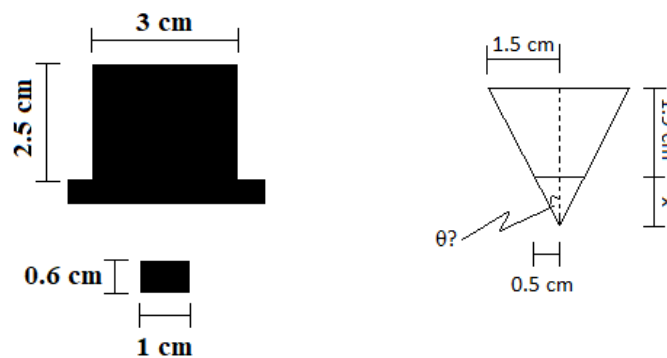


Figura 4.19 Cálculo de dimensiones y triángulos semejantes.

Para calcular el ángulo θ primero se obtuvo el valor de x , el cual fue de 0.95 cm, con este valor encontrado se tiene la información de los dos catetos del triángulo rectángulo, por lo que para calcular θ solamente se calculó la tangente inversa del ángulo, quedando un resultado de 27.758° .

De acuerdo a la ley del coseno de Lambert [9] cuando un rayo incide de manera normal en la superficie de un detector se tiene una lectura máxima, la cual disminuye conforme el ángulo de incidencia del rayo varía, como es el caso del luxómetro y la esfera integradora.

Para encontrar el ángulo sólido en el cual el luxómetro capta la luz emitida por la fuente de iluminación dentro de la esfera integradora se calculó la integral definida del ángulo θ dentro del intervalo de los 0° a los 27.758° ; el resultado de esta ecuación fue de 0.4657 estereorradianes, resolviéndose de esta manera el ángulo sólido en el cual el luxómetro capta la luz dentro de la esfera integradora.

En el caso del sensor BH1750 se siguió un procedimiento similar, donde se utilizaron las dimensiones propias del sensor, las cuales fueron de 2 milímetros de anchura y 1 milímetro de altura; con estos datos se calculó el ángulo θ , obteniéndose un valor de 30.256° , mientras que el ángulo sólido obtenido fue de 0.5039 estereorradianes.

Estos dos valores fueron añadidos a las mediciones fuera de la esfera integradora que era en donde se presentaba el error en las mismas, al multiplicar el valor de las mediciones por los valores respectivos de los ángulos sólidos se encontró que la relación entre mediciones directas e indirectas pasó de ser de 0.5 a ser un valor muy cercano a uno, eliminando así el error en las mediciones.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y VALIDACIÓN

En este capítulo se muestran los resultados de los cálculos realizados en LabVIEW que sirvieron para la obtención de las constantes de calibración para las fuentes de iluminación analizadas, se muestran también los valores de las constantes obtenidos para cada fuente de iluminación, se exponen también los resultados de las comparaciones hechas entre las mediciones directas de la radiación PAR y las mediciones indirectas dentro y fuera de la esfera integradora tanto con el luxómetro comercial como con el de bajo costo, se señalan los factores de conversión utilizados para igualar las lecturas del luxómetro de bajo costo con las del luxómetro comercial. Por último se muestra la corrección de errores así como los resultados de mediciones luego de corregirlos.

5.1 Obtención de constantes de medición

En las tablas mostradas a continuación se expresan los resultados promedio de los cálculos realizados en el programa implementado en LabVIEW a partir de los cuales se obtuvieron las constantes de medición auxiliares para el cálculo de la radiación PAR de manera indirecta para cada una de las fuentes de iluminación.

Tabla 5.1 Datos utilizados para el cálculo de las constantes auxiliares del led rojo.

Led rojo promedio				
S/FL	luxes	(S/FL)(luxes) PARI	PAR Directo (PARD)	PARD/PARI
0.025	14.347	0.363	0.741	2.039
0.026	20.6	0.526	1.074	2.040
0.026	26.313	0.677	1.437	2.122
0.026	32.16	0.834	1.810	2.169
0.026	38.273	1.003	2.180	2.173
0.027	47.353	1.264	2.661	2.105
0.027	57.873	1.576	3.574	2.267
0.028	67.580	1.875	4.265	2.275
0.028	71.707	2.001	4.571	2.284

Tabla 5.2 Datos utilizados para el cálculo de las constantes auxiliares del led amarillo.

led amarillo promedio				
S/FL	luxes	(S/FL)(luxes) PARI	PAR Directo (PARD)	PARD/PARI
0.011	20.827	0.246	0.470	1.916
0.011	27.507	0.322	0.625	1.941
0.011	33.721	0.396	0.776	1.959
0.011	39.634	0.467	0.888	1.902
0.011	45.007	0.534	1.058	1.980
0.011	54.354	0.654	1.300	1.987
0.011	57.634	0.700	1.406	2.009

Tabla 5.3 Datos utilizados para el cálculo de las constantes auxiliares del led verde.

Led verde promedio				
S/FL	luxes	(S/FL)(luxes) PARI	PAR Directo (PARD)	PARD/PARI
0.008	37.593	0.308	0.674	2.193
0.008	67.193	0.553	1.238	2.239
0.008	101.127	0.847	1.959	2.311
0.009	131.88	1.126	2.538	2.255
0.009	160.700	1.392	3.146	2.260
0.009	187.353	1.641	3.710	2.261
0.009	211.533	1.875	4.222	2.252
0.009	231.800	2.068	4.657	2.252

Tabla 5.4 Datos utilizados para el cálculo de las constantes auxiliares del led rojo profundo.

Led rojo profundo				
S/FL	luxes	(S/FL)(luxes) PARI	PAR Directo (PARD)	PARD/PARI
0.060	19.427	1.171	1.755	1.499
0.059	22.260	1.321	1.984	1.502
0.058	25.627	1.492	2.246	1.505
0.057	28.127	1.610	2.434	1.511
0.057	30.420	1.720	2.610	1.518

Tabla 5.5 Datos utilizados para el cálculo de las constantes auxiliares de la tira de ledes.

Tira de ledes promedio				
S/FL	luxes	(S/FL)(luxes) PARI	PAR Directo (PARD)	PARD/PARI
0.037	10.344	0.381	0.739	1.938
0.038	13.633	0.519	1.014	1.954
0.039	16.733	0.650	1.284	1.975
0.039	20.044	0.785	1.571	2.002
0.040	23.089	0.920	1.847	2.009
0.040	26.122	1.042	2.119	2.033
0.040	29.089	1.175	2.401	2.043
0.041	31.833	1.300	2.667	2.051
0.041	34.533	1.425	2.935	2.059
0.042	37.067	1.548	3.194	2.064
0.042	39.656	1.663	3.447	2.073

De los datos de la primera columna (FL) se obtuvo un promedio el cual fue tomado como la constante auxiliar 1 para la medición indirecta de la radiación PAR. Hay que recordar que los datos de esta columna provienen de la relación entre la medición cuántica con la fotométrica.

Los datos obtenidos de la última columna (PARD/PARI), los cuales provienen de la relación entre la radiación PAR medida directamente (PARD) con el primer acercamiento a la medición indirecta por medio de LabVIEW (PARI) fueron promediados y el resultado fue tomado como la constante auxiliar 2.

Al tener ya calculados ambos promedios se hizo una resta del valor menor contra el valor promedio así como del valor mayor contra el promedio, esto con la finalidad de saber que tan grande es la diferencia entre los valores y saber que tanto error generaría una lectura que esté en los límites de operación de la fuente de iluminación con la que se esté trabajando.

Para el led rojo la diferencia entre el promedio y el valor menor para la constante 1 fue de 4.72% mientras que la diferencia entre el promedio y el valor mayor fue de 4.95%, en cuanto a la constante 2 las diferencias fueron de 6.68% y 4.51% respectivamente. Para el led amarillo

las diferencias en la constante 1 fueron de 0.56% y 2.19% y para la constante 2 fueron de 2.25% y 2.48%. Para la constante 1 del led verde las diferencias fueron de 2.64% y 0.04%, mientras que las diferencias para la constante 2 fueron de 4.5% y 4.16%. Las diferencias para la constante 1 del led rojo profundo fueron de 3.33% y 3.09% y para la constante 2 fueron de 0.53% y 0.71%. Por último, para la tira de ledes las diferencias en la constante 1 fueron de 7.66% y de 5.09% y las diferencias para la constante 2 fueron de 3.96% y 2.72%.

Como se puede observar, en algunos casos la diferencia del valor promedio y el valor menor rebasa el 7%, sin embargo, al ser ese un nivel bajo de voltaje no debería haber problema en las mediciones ya que regularmente este tipo de fuentes iluminación trabajan en su valor nominal y si se observan las diferencias entre el promedio y el valor máximo son de 5%, lo cual entra en un rango aceptable.

Teniendo en cuenta toda esta información a continuación se muestran los valores de ambas constantes calculadas para cada fuente de iluminación.

Tabla 5.6 Constantes auxiliares obtenidas para cada fuente de iluminación.

	Led rojo	Led amarillo	Led verde	Led rojo profundo	Tira de ledes
Constante 1	2.185	1.960	2.253	1.507	2.018
Constante 2	0.027	0.011	0.009	0.058	0.040

Aunque fueron caracterizados y calculadas sus constantes, los ledes amarillo y verde no fueron utilizados para las mediciones posteriores debido a su poco uso en cultivos con iluminación artificial, por lo que de aquí en adelante las mediciones solo se concentrarán en el led rojo, rojo profundo y la tira de ledes.

5.2 Comparación de medición indirecta con luxómetro y constantes auxiliares con medición directa con sensor cuántico dentro de la esfera integradora

En las tablas que son mostradas a continuación se observan los resultados de las mediciones hechas directa e indirectamente de la radiación PAR dentro de la esfera integradora.

Se muestran las lecturas tomadas con el luxómetro comercial, las mediciones tomadas directamente con el detector cuántico, las mediciones calculadas a partir de las lecturas tomadas con el luxómetro y las constantes de calibración calculadas, así como la relación entre medida directa e indirecta para observar las diferencias entre ambas lecturas. Al igual que en la sección anterior el orden mostrado en las tablas es: led rojo, led rojo profundo y finalmente la tira de ledes.

Tabla 5.7 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo dentro de la esfera integradora.

Led rojo			
Luxómetro	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
10.7	0.575	0.622	0.925
25.9	1.450	1.505	0.963
38.2	2.196	2.220	0.989
48.3	2.852	2.807	1.016
55.6	3.376	3.231	1.045
63.5	3.954	3.690	1.072

Tabla 5.8 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo profundo dentro de la esfera integradora.

Led rojo profundo			
Luxómetro	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
5.7	0.493	0.501	0.983
9.6	0.856	0.844	1.014
13.4	1.192	1.178	1.011
16.6	1.467	1.460	1.005
20.3	1.736	1.785	0.973
21.3	1.797	1.873	0.959

Tabla 5.9 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para la tira de ledes dentro de la esfera integradora.

Tira de ledes			
Luxómetro	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
15.8	1.128	1.273	0.886
21	1.552	1.692	0.917
26.5	2.003	2.135	0.938
31.4	2.422	2.530	0.958
36.1	2.895	2.908	0.995
40	3.284	3.222	1.019

Se observa que el error en las mediciones va del 0.5% al 11%, el cual a pesar de ser un error alto no es un valor relevante dado que este error se presentó en un nivel de voltaje bajo por lo que su iluminancia es baja y este tipo de fuentes de iluminación no se usan regularmente bajo estas condiciones.

5.3 Comparación de medición indirecta con sensor BH1750 y constantes auxiliares con medición directa con sensor cuántico dentro de la esfera integradora

Las siguientes tablas muestran el resultado de las mediciones hechas dentro de la esfera integradora utilizando el luxómetro de bajo costo desarrollado con el sensor BH1750, también se muestra en las tablas la comparación entre la medición directa hecha con el sensor cuántico con la indirecta hecha a partir de la lectura tomada con el luxómetro.

Tabla 5.10 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo dentro de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.

Led rojo			
BH1750	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
7	0.365	0.407	0.896
17	0.854	0.988	0.865
27	1.366	1.569	0.871
36	1.829	2.092	0.874
47	2.383	2.731	0.873
54	2.774	3.138	0.884

Tabla 5.11 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo profundo dentro de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.

Led rojo profundo			
BH1750	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
5	0.488	0.440	1.111
9	0.862	0.791	1.089
13	1.212	1.143	1.060
16	1.503	1.407	1.068
20	1.794	1.759	1.020
21	1.867	1.847	1.011

Tabla 5.12 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para la tira de ledes dentro de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.

Tira de ledes			
BH1750	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
14	0.947	1.128	0.839
19	1.324	1.531	0.865
24	1.719	1.933	0.889
29	2.076	2.336	0.889
36	2.504	2.9	0.864
40	2.847	3.222	0.884

De estas mediciones puede observarse que existe un error mayor comparado al de las mediciones anteriores, esto era de esperarse debido a la naturaleza más sencilla del sensor BH1750 en comparación al luxómetro comercial. El error más grande registrado se dio en la tira de ledes que fue de 12% a 19% mientras que el más bajo fue para el led rojo profundo que fue de 1% a 10%, mientras que para el led rojo el error en promedio fue de 14%. Estos errores pueden deberse también a que debido a sus geometrías incompatibles, la adaptación del sensor BH1750 al puerto de la esfera es más compleja que la adaptación del luxómetro comercial al mismo puerto.

5.4 Comparación de medición indirecta con luxómetro y constantes auxiliares con medición directa con sensor cuántico fuera de la esfera integradora

Siguiendo los resultados de las secciones anteriores, a continuación se muestran las tablas con los resultados de las comparaciones entre medición directa e indirecta de la radiación PAR fuera de la esfera integradora utilizando el luxómetro comercial con las constantes auxiliares de medición y el sensor cuántico.

Tabla 5.13 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo fuera de la esfera integradora.

Led rojo			
Luxómetro	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
10	0.244	0.581	0.42
23	0.569	1.337	0.43
35.6	0.896	2.069	0.43
48.3	1.213	2.807	0.43
60.1	1.553	3.492	0.44
69	1.807	4.010	0.45

Tabla 5.14 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo profundo fuera de la esfera integradora.

Led rojo profundo			
Luxómetro	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
10.4	0.461	0.914	0.504
18.5	0.807	1.627	0.496
26.7	1.111	2.348	0.473
33.4	1.349	2.937	0.459
39.7	1.536	3.491	0.440
41	1.578	3.605	0.438

Tabla 5.15 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para la tira de ledes fuera de la esfera integradora.

Tira de ledes			
Luxómetro	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
15.4	0.601	1.241	0.484
24.6	1.007	1.982	0.508
33.9	1.405	2.731	0.514
43	1.807	3.464	0.522
51	2.156	4.109	0.525
59.6	2.599	4.801	0.541
66.6	2.915	5.365	0.543

En estas tablas se observa claramente que la relación entre medición directa e indirecta es de alrededor de 0.5 veces como se menciona en la sección 4.5 del capítulo anterior, más adelante se muestra el resultado de algunas mediciones ya con la corrección de este error.

5.5 Comparación de medición indirecta con sensor BH1750 y constantes auxiliares con medición directa con sensor cuántico fuera de la esfera integradora

A continuación se muestran los resultados de las mediciones directas e indirectas fuera de la esfera integradora para cada uno de los ledes utilizados, para estas mediciones se utilizaron el luxómetro de bajo costo con las constantes auxiliares de medición y el sensor cuántico.

Tabla 5.16 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo fuera de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.

Led rojo			
BH1750	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
8	0.184	0.465	0.396
20	0.411	1.162	0.354
33	0.650	1.918	0.339
43	0.902	2.499	0.361
58	1.171	3.370	0.347
62	1.357	3.603	0.377

Tabla 5.17 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para el led rojo profundo fuera de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.

Led rojo profundo			
BH1750	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
5	0.264	0.440	0.600
12	0.487	1.055	0.462
17	0.669	1.495	0.447
21	0.829	1.847	0.449
26	0.971	2.286	0.425
28	1.098	2.462	0.446

Tabla 5.18 Comparación entre medición directa e indirecta de radiación PAR para la tira de ledes fuera de la esfera integradora utilizando el sensor BH1750.

Tira de ledes			
BH1750	Med. Directa μmol	Med. Con ctes. Mmol	Directa/Med. Ctes.
9	0.294	0.725	0.406
15	0.520	1.208	0.430
20	0.722	1.611	0.448
28	0.937	2.256	0.415
33	1.125	2.658	0.423
40	1.362	3.222	0.423
45	1.522	3.625	0.420

Al igual que en las mediciones anteriores se puede observar que la relación entre medición directa e indirecta está muy por debajo de uno, como se mencionó anteriormente más adelante se muestran otras mediciones con este error ya corregido.

5.6 Medición diferencial y comparación medición en estructura para germinación de plantas con los tres instrumentos de medición

En la siguiente tabla se muestran los promedios de las mediciones hechas dentro de la estructura adecuada con iluminación artificial para la germinación de plantas. Hay que recordar que se tomaron mediciones durante cinco días diferentes.

Tabla 5.19 Promedios de las mediciones diferenciales dentro de la estructura con iluminación artificial.

	Lectura original			Conversión a micromoles		
	Gossen	BH1750	190R	Gossen	BH1750	190R
Luz apagada + Tiras	570.6	705	1.18E-07	33.264	41.099	16.975
Luz prendida	210	116	1.87E-08	12.242	6.762	2.687
Luz prendida + Tiras	754.8	762.4	1.34E-07	44.003	44.446	19.337
Luz arriba	167.64	68.8	1.50E-08	9.773	4.011	2.159
Luz arriba + Tiras	722.6	760.8	1.32E-07	42.125	44.352	18.991
Luz opuesta	42.94	24.2	3.57E-09	2.503	1.411	0.515
Luz opuesta + Tiras	614.8	733	1.22E-07	35.841	42.732	17.579

Para observar las diferencias entre las mediciones se tomó como referencia la medición con las luces del laboratorio apagadas y las tiras encendidas, esto debido a que en esta medición no se tienen otras luces que interfieran.

Tabla 5.20 Diferencias entre mediciones dentro de la estructura.

	Micromoles		
	Gossen	BH1750	190R
Referencia (luz apagada)	33.264	41.099	16.975
(Luz prendida + tiras) – (Luz prendida)	31.761	37.684	16.65
(Luz arriba + tiras) – (Luz arriba)	32.352	40.341	16.832
(Luz opuesta + tiras) – (Luz opuesta)	33.338	41.321	17.064

Se puede observar que las diferencias entre las mediciones entregan un valor que se acerca de gran manera al valor original de la referencia.

5.7 Igualación de lecturas del sensor BH1750 con las lecturas del luxómetro comercial

En la siguiente tabla se muestran las ecuaciones utilizadas para poder igualar las lecturas del sensor BH1750 con las lecturas del luxómetro comercial. Estas ecuaciones se calcularon en Excel graficando ambas lecturas para poder obtener la ecuación que las relacionara, se obtuvo una ecuación diferente para cada una de las fuentes de iluminación utilizadas.

Tabla 5.21 Adecuación de la salida del sensor BH1750.

Fuente iluminación	Equivalencias
Led rojo	La salida del BH1750 se adecuó a $y = -0.0011x^2 + 1.147x$
Led rojo profundo	La salida del BH1750 se adecuó a $y = -0.0104x^2 + 1.7758x$
Tira de ledes	La salida del BH1750 se adecuó a $y = -0.0063x^2 + 1.7526x$

5.8 Corrección de errores en mediciones fuera de la esfera integradora

En las tablas mostradas a continuación se expresan los resultados de las mediciones realizadas fuera de la esfera integradora luego de aplicarles los valores respectivos de los ángulos sólidos calculados en el capítulo 4, se observa claramente que la relación entre ambas mediciones hechas con el luxómetro pasó de ser un valor aproximado a 0.5 a ser muy aproximado a uno.

Es importante señalar que a los resultados de las mediciones tomadas con el sensor BH1750 ya se les ha aplicado la ecuación de corrección para igualar sus lecturas con las del luxómetro comercial.

Tabla 5.22 Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para el led rojo usando el luxómetro.

Led rojo			
Luxómetro	Med. Directa μmol	Med. con ctes. μmol corregida	Directa/Med. Ctes.
10	0.244	0.271	0.902
23	0.569	0.623	0.914
35.6	0.896	0.964	0.930
48.3	1.213	1.307	0.928
60.1	1.553	1.626	0.955
69	1.807	1.867	0.968

Tabla 5.23 Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para el led rojo profundo usando el luxómetro.

Led rojo profundo			
Luxómetro	Med. Directa μmol	Med. con ctes. μmol corregida	Directa/Med. Ctes.
10.4	0.461	0.426	1.083
18.5	0.807	0.758	1.065
26.7	1.111	1.093	1.016
33.4	1.349	1.368	0.986
39.7	1.536	1.626	0.945
41	1.578	1.679	0.940

Tabla 5.24 Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para la tira de ledes usando el luxómetro.

Tira de ledes			
Luxómetro	Med. Directa μmol	Med. con ctes. μmol corregida	Directa/Med. Ctes.
15.4	0.601	0.578	1.040
24.6	1.007	0.923	1.091
33.9	1.405	1.272	1.105
43	1.807	1.613	1.120
51	2.156	1.914	1.127
59.6	2.599	2.236	1.162
66.6	2.915	2.498	1.167

Tabla 5.25 Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para el led rojo usando el sensor BH1750.

Led rojo			
BH1750	Med. Directa μmol	Med. con ctes. μmol corregida	Directa/Med. Ctes.
9.1	0.184	0.259	0.709
22.5	0.411	0.641	0.641
36.7	0.65	1.044	0.622
47.3	0.902	1.347	0.669
62.8	1.171	1.790	0.654
66.9	1.357	1.906	0.712

Tabla 5.26 Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para el led rojo profundo usando el sensor BH1750.

Led rojo profundo			
BH1750	Med. Directa μmol	Med. con ctes μmol corregida	Directa/Med. Ctes.
8.6	0.264	0.372	0.710
19.8	0.487	0.854	0.570
27.2	0.669	1.172	0.571
32.7	0.829	1.410	0.588
39.1	0.971	1.687	0.575
41.6	1.098	1.792	0.613

Tabla 5.27 Comparación entre medición directa e indirecta (corregida) de radiación PAR para la tira de ledes usando el sensor BH1750.

Tira de ledes			
BH1750	Med. Directa μmol	Med. con ctes. μmol corregida	Directa/Med. Ctes.
15.3	0.294	0.603	0.488
24.9	0.52	0.982	0.529
32.5	0.722	1.285	0.562
44.1	0.937	1.743	0.538
51.0	1.125	2.013	0.559
60.0	1.362	2.371	0.574
66.1	1.522	2.611	0.583

Se puede observar que hay un error muy grande en las mediciones tomadas con el sensor BH1750 aun y cuando se igualaron sus lecturas con las del luxómetro, esto fue debido a que al momento de hacer las mediciones se hicieron de manera separada: una medición se hizo utilizando el sensor cuántico y el luxómetro y la otra medición se hizo utilizando el sensor cuántico y el sensor BH1750, es por ello que, como se puede observar en las tablas, las mediciones de la radiación PAR tomadas directamente con el sensor cuántico tienen tanta diferencia entre una medición y otra trayendo como resultado el error tan grande en las mediciones. Para arreglar este error se hizo otra toma de mediciones utilizando ahora si los tres instrumentos de medición de manera simultánea; para estas mediciones se excluyó el led

rojo ya que aunque su uso en el cultivo de plantas es grande se utiliza mayormente en combinación con ledes azules, también se incluyó en estas mediciones la tira de ledes utilizada en la estructura para la germinación de plantas.

5.9 Medición simultánea fuera de la esfera integradora

Debido a que en las mediciones anteriores fuera de la esfera integradora las mediciones no se hicieron de manera simultánea la relación hecha para igualar las lecturas del sensor BH1750 con las del luxómetro comercial no fue de ayuda, por lo que se tuvo que encontrar otra relación para igualar las lecturas, esta relación se hizo tomando una lectura preliminar para cada fuente de iluminación utilizando ambos luxómetros en donde se encontraron las siguientes relaciones:

Tabla 5.28 Equivalencias entre lecturas de ambos luxómetros.

Fuente iluminación	Equivalencias
Tira de ledes	La lectura del BH1750 se multiplicó por 0.7258
Led rojo profundo	La lectura del BH1750 se multiplicó por 0.7811
Tira de ledes estructura	La lectura del BH1750 se multiplicó por 0.825

Con las equivalencias calculadas se procedió a tomar las mediciones respectivas, las cuales se muestran a continuación.

Tabla 5.29 Comparación de medición simultanea de radiación PAR fuera de la esfera integradora para el led rojo profundo.

Gossen	BH1750	Med. Directa	Gossen Ind.	BH1750 Ind.	Dir/ Gossen	Dir/ BH1750
12.5	13.3	0.653	0.512	0.588	1.276	1.111
21.8	22.7	1.123	0.893	1.004	1.258	1.120
32.7	34.4	1.669	1.339	1.523	1.247	1.095
43.7	43.4	2.178	1.789	1.921	1.216	1.133
51.2	51.9	2.494	2.097	2.301	1.190	1.085
60.05	60.5	2.767	2.459	2.682	1.124	1.030
70.6	70.7	3.270	2.891	3.132	1.131	1.044
75.65	75.4	3.409	3.098	3.340	1.100	1.021
83.9	82.4	3.680	3.436	3.651	1.071	1.008

Tabla 5.30 Comparación de medición simultanea de radiación PAR fuera de la esfera integradora para la tira de ledes.

Gossen	BH1750	Med. Directa	Gossen Ind.	BH1750 Ind.	Dir/ Gossen	Dir/ BH1750
3.8	3.3	0.128	0.143	0.133	0.899	0.968
7.0	6.5	0.243	0.261	0.265	0.931	0.916
10.3	9.8	0.385	0.386	0.398	0.996	0.970
13.6	13.4	0.514	0.508	0.545	1.012	0.946
17.6	16.7	0.659	0.660	0.677	0.998	0.973
20.4	20.3	0.803	0.763	0.825	1.052	0.973
23.9	22.9	0.952	0.896	0.928	1.063	1.027
27.9	26.1	1.086	1.046	1.060	1.039	1.026
30.4	29.0	1.241	1.138	1.178	1.090	1.057
33.5	31.9	1.380	1.256	1.296	1.098	1.071
36.2	35.6	1.514	1.356	1.443	1.117	1.050
39.1	39.2	1.653	1.464	1.590	1.129	1.040
41.8	41.7	1.782	1.566	1.693	1.138	1.052

Tabla 5.31 Comparación de medición simultanea de radiación PAR fuera de la esfera integradora para la tira de ledes de la estructura.

Gossen	BH1750	Med. Directa	Gossen Ind.	BH1750 Ind.	Dir/ Gossen	Dir/ BH1750
9	8	0.219	0.244	0.235	0.898	0.932
30.8	30	0.785	0.836	0.881	0.939	0.891
67.95	67.5	1.777	1.845	1.983	0.963	0.896
113.75	113	3.033	3.088	3.319	0.982	0.982
164.3	164.5	4.434	4.461	4.832	0.994	0.994
215.5	215	5.841	5.851	6.316	0.998	0.925
267	268	7.307	7.249	7.873	1.008	0.928
318	320.5	8.762	8.633	9.415	1.015	0.930
367	371	10.176	9.964	10.898	1.021	1.021
414	419	11.551	11.240	12.308	1.028	0.938
461	468	13.000	12.516	13.748	1.039	0.946
504	513	14.259	13.683	15.070	1.042	0.946
547	558	15.537	14.850	16.392	1.046	0.948
598	610.5	17.029	16.235	17.934	1.049	0.950

En la Tabla 5.34 (led rojo profundo) se puede observar que aunque la relación entre la medición directa y la indirecta medida con el luxómetro comercial es muy cercana el error en esta medición tuvo un promedio de 15%, que no es un resultado muy favorable, sin embargo, el error en las mediciones hechas con el sensor BH1750 tuvo un promedio de 7%, el cual puede considerarse como aceptable. En el caso de la tira de ledes el error promedio de las lecturas con el luxómetro comercial fue cercano al 10%, mientras que el promedio de error con el sensor BH1750 fue de 7%. Por último, en la tira de ledes de la estructura para la germinación de plantas se dio el caso contrario, esto es que se tuvo un error más grande en las lecturas hechas con el sensor BH1750, el cual fue en promedio de 8%, mientras que el error con el luxómetro comercial fue aproximado a 4%; como se puede notar, estas mediciones fueron las que presentaron el menor error. Aunque pareciera que el tener un error promedio tan grande pueda suponer un inconveniente, al ir acercándose al voltaje máximo de operación el error disminuye, por lo que no sería un inconveniente significativo.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este capítulo se presentan las conclusiones a las que se llegó durante el desarrollo del presente trabajo de tesis. Son mencionados en primer lugar los objetivos que fueron alcanzados. Se mencionan también las mejoras y el trabajo a futuro que puede ser llevado a cabo para optimizar el luxómetro de bajo costo y la medición indirecta de la radiación fotosintéticamente activa.

Es importante señalar que los resultados mostrados durante las mediciones demuestran que, en efecto, el método propuesto en este trabajo para la medición indirecta de la radiación PAR es de gran eficacia, ya que permite reducir el costo de la adquisición de un detector cuántico al aproximar en gran medida las lecturas indirectas con las directas; realizando incluso una mejora que no se tenía contemplada en un principio que fue el implementar un luxómetro de bajo costo que emulara el comportamiento de un luxómetro comercial utilizando un simple sensor fotométrico al igualar ambas lecturas, de esta manera se cumplió con el objetivo principal de este trabajo de tesis.

Como se mencionó en los capítulos anteriores, se realizaron pruebas de medición de la radiación PAR dentro y fuera de la esfera integradora utilizando ambos luxómetros, dichas mediciones tuvieron un error con respecto a las mediciones tomadas directamente con el detector cuántico.

Como anteriormente se explicó, el led rojo no fue utilizado para las mediciones fuera de la esfera integradora debido a que en su mayoría este tipo de ledes son utilizados en combinación con ledes de color azul; por otro lado, debido a la dificultad para colocar el luxómetro de bajo costo dentro de los puertos de la esfera integradora, así como la difícil colocación dentro de la esfera integradora de la tira de ledes de la estructura para la germinación de plantas se decidió tomar únicamente mediciones fuera de la esfera integradora.

A continuación se muestra un breve resumen de los porcentajes de error obtenidos de las mediciones realizadas con ambos luxómetros dentro y fuera de la esfera integradora con respecto a las mediciones tomadas con el detector cuántico.

Tabla 6.1 Resumen de errores porcentuales obtenidos durante las mediciones de radiación PAR indirecta.

	Dentro de la esfera		Fuera de la esfera	
	Gossen	BH1750	Gossen	BH1750
Led rojo (nivel bajo)	8.17%	11.5%	--	--
Led rojo (nivel alto)	6.65%	13.12%	--	--
Led rojo profundo (nivel bajo)	1.62%	9.83%	21.59%	9.95%
Led rojo profundo (nivel alto)	4.22%	1.07%	6.63%	0.79%
Tira de ledes (nivel bajo)	19.13%	12.78%	11.72%	3.91%
Tira de ledes (nivel alto)	1.88%	13.17%	12.12%	4.99%
Tira de ledes estructura (nivel bajo)	--	--	11.41%	7.31%
Tira de ledes estructura (nivel alto)	--	--	4.66%	5.31%

Como se puede observar en la tabla, en la mayoría de los casos los errores de medición más grandes se tienen en los niveles bajos de iluminación y se reducen para los niveles altos, esto debido a que a tan bajos niveles de iluminación los detectores no son capaces de responder de manera adecuada como si lo hacen cuando se tienen niveles de iluminación altos, a pesar de que estos errores son considerables en la mayoría de los cultivos en interiores se trabaja en valores cercanos a los máximos niveles de operación de los ledes por lo que pueden ser omitidos. Para este trabajo se calcularon para tener una referencia de los errores en ambos extremos de los niveles de operación de las fuentes de iluminación analizadas.

Los instrumentos utilizados en el desarrollo de este trabajo tienen una respuesta espectral que es diferente de la ideal, el detector cuántico tiene un error de $\pm 5\%$ con respecto a la curva de respuesta cuántica espectral, con respecto a la curva $V(\lambda)$ el luxómetro comercial tiene un error de $<7.5\%$ y el sensor BH1750 tiene un error de $\pm 20\%$, por lo cual se hizo necesario encontrar un factor que al menos igualara las lecturas del sensor BH1750 con las del luxómetro comercial.

Al combinar las constantes de calibración para cada fuente de iluminación con los ajustes realizados para igualar las lecturas del luxómetro de bajo costo con las del luxómetro comercial se pueden obtener lecturas de radiación PAR con una gran precisión.

A pesar de que en un principio pudiera parecer que el modelo propuesto en este trabajo tiene una difícil implementación práctica debido a todos los instrumentos utilizados y el proceso llevado a cabo, en realidad, luego de obtener las dos constantes de calibración estas pueden ser integradas fácilmente en un microcontrolador junto con el sensor BH1750.

Trabajo a futuro

A continuación se muestran algunas mejoras que pueden hacerse para mejorar el rendimiento del luxómetro de bajo costo desarrollado, así como algunas sugerencias para mejorar la toma de mediciones en caso de que se quieran caracterizar otras fuentes de iluminación diferentes a las descritas en este trabajo.

- Contar con un menú en el programa de Arduino que contenga los valores de las constantes de calibración para cada fuente de iluminación, de esta manera se tendría de manera instantánea la lectura indirecta de la radiación PAR.
- Integrar al circuito implementado una pantalla LCD y un cargador portátil (power bank) para poder transportar el circuito de un lugar a otro de manera sencilla y así eliminar la dependencia de una computadora.

En cuanto a la caracterización:

- Caracterizar fuentes del mismo color pero diferente marca para tener una base de datos con las constantes de calibración de mayor tamaño.
- Para disminuir un poco el error de las mediciones esperar un lapso de tiempo para capturar las lecturas de los instrumentos de medición ya que estos tardan un poco en estabilizarse entre cada lectura.
- Buscar la manera de implementar el software de la esfera integradora con el programa realizado en LabVIEW, de esta manera se ahorraría tiempo a la hora de hacer las caracterizaciones y calcular las constantes de calibración.

REFERENCIAS

- [1] E. Pérez-Urria, “Fotosíntesis: Aspectos Básicos”, *Reduca (Biología)*, vol. 2, no. 3, 2009, pp. 1-47.
- [2] J.E. Sáenz Guarín, “La fotosíntesis, concepciones, ideas alternativas y analogías. Unidad didáctica dirigida a estudiantes de los ciclos 3 y 4 de educación básica del colegio José María Carbonell.”, M.Ed. thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [3] J.S. Botero, S. Navarro, N. Giraldo and L. Aterhúa, “Estimation of Photosynthetically Active Radiation Using a Low Cost Spectrometer”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 2, March 2014, pp. 107-111.
- [4] G. Wu, J. Leeuw, A. Skidmore, Y. Liu and H. Prins, “Comparison of extrapolation and interpolation methods for estimating daily photosynthetically active radiation (PAR)”, *Geo-spatial Information Science*, vol. 13, no. 4, December 2010, pp. 235-242.
- [5] “Photosynthetically Active Radiation (PAR) Units”. Internet: <https://www.osram-america.com/en-us/tools-and-resources/Pages/faq.aspx>, [Mar. 19, 2017].
- [6] R. J. Ritchie, “Modelling photosynthetic photon flux density and maximum potential gross photosynthesis”, *Photosynthetica*, vol. 4, num. 48, 2010, pp. 596-609.
- [7] J.C. Kathilankal, T.L. O’Halloran, A. Schmidt, C.V. Hanson and B.E. Law, “Development of a semi-parametric PAR (Photosynthetically Active Radiation) partitioning model for the United States, versión 1.0”, *Geosci. Model Dev*, vol. 7, no. 5, October 2014, pp. 2477-24484.
- [8] M. Mottus, M. Sulev, B. Frederic, R. López-Lozano, “Photosynthetically Active Radiation: Measurement and Modelling”, *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 2011, pp. 7970-8000.
- [9] W.R. McCluney, “Introduction to radiometry and photometry”, Artech House Inc., 1994.
- [10] E. Gómez González, “Guía básica de conceptos de Radiometría y Fotometría”, E.S.I. Universidad de Sevilla, 2006 pp 4-39.

- [11] N. Yushkina, "Light Sources", in Handbook of Optical Metrology Principles and Applications, T. Yoshizawa, Boca Raton, FL.: Taylor & Francis Group, 2009, pp 4-14.
- [12] K.J. Gasvik, "Ligt Sources and Detectors", in Optical Metrology, 3th ed., John Wiley & Sons Ltd, 2002, pp 99-124.
- [13] W.J. Smith, "Radiometry and Photometry", in Modern Optical Engineering The Design of Optical Systems, 3th ed., McGraw-Hill, 2000, pp 219-250.
- [14] M. Strojnik and G. Paez, "Radiometry", in Handbook of Optical Engineering, 1st ed., D. Malacara and B.J. Thompson, New York: CRC Press, 2001, pp 649-663.
- [15] J. Mora González. "Caracterización de la respuesta espectral como función de la temperatura en fotodiodos de silicio." Eng. thesis, Universidad Tecnológica de Querétaro, Querétaro, 2012.
- [16] M.J. Cruise, C.J. Kucharik, J, M, Norman, "Using a simple apparatus to measure direct and diffuse photosynthetically active radiation at Remote Locations", PLOS ONE, vol. 10, no. 2, February 2015, pp. 1-19.
- [17] "2AP Sun Tracker", Internet: <http://www.kippzonen.com/Product/21/2AP-Sun-Tracker>, [Abr. 17, 2017].
- [18] "Automatic Solar Tracker Model SMT", Internet: <http://www.eppleylab.com/instrument-list/automatic-solar-tracker/>, [Apr. 17, 2017].
- [19] "SPN1 Sunshine Pyranometer". Internet: <http://www.delta-t.co.uk/product/spn1/>, [Apr. 17, 2017].
- [20] M. G. Craford, "From Holonyak to Today", Proceedings of the IEEE, vol. 101, no. 10, October 2013, pp 2170-2175.
- [21] Desconocido, "50th Anniversary of the Light-Emitting Diode (LED): An Ultimate Lamp", Proceedings of the IEEE, vol. 101, no. 10, October 2013, pp 2154-2157.
- [22] S. Dutta Gupta, B. Jatothu, "Fundamentals and applications of light-emitting diodes (leds) in vitro plant growth and morphogenesis", Plant Biotechnology Reports, vol. 7, no. 3, July 2013, pp. 211-220.
- [23] M. Olle, A. Viršile, "The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality", Agricultural and food Science, vol. 22, no. 2, June 2013, pp.

- 223-234.
- [24] M. Motyčka, J. Škoda, J. Štěpánek, “The Uncertainty of Measurement of the Luminous Flux in an Integrating Sphere”, in *Electric Power Engineering (EPE)*, 2017.
 - [25] L. Liying, Z. Feng, Z. Lingxi, L. Ye, H. Kewei, S. Xiaoguang, L. Guojun, “Luminance Uniformity of Integrating Sphere Light Source”, in *International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM)*, 2015, pp. 265-268.
 - [26] N. Rivero, “Medida de Flujo Luminoso en Esfera de Ulbricht”.
 - [27] Desconocido. “Technical Guide Integrating Sphere Theory and Applications”. Internet: www.labsphere.com/site/assets/files/2551/a-guide-to-integrating-sphere-theory-and-applications, [Nov. 11, 2017].
 - [28] P. S. Almeida. “Esferas Integradoras LMS 400 LMS 200”. Internet: <http://www.ufjf.br/nimo/files/2008/10/Esfera-integradora1>, Oct. 31, 2011 [Nov. 11, 2017].
 - [29] M. P. Espinosa Tinoco, “Propuesta de un laboratorio para pruebas fotométricas a luminarios led”, Ing. El. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
 - [30] Desconocido. “Light Measuring”. Internet: http://www.gossen-photo.de/pdf/GOSSEN_Lichtmesstechnik_english.pdf, [Nov. 10, 2017].
 - [31] U. František, C. Josef, “Current Trends in Photonic Sensors”, in *Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2014, pp. 1-6.
 - [32] V. L. Barradas, L. M. Tapia-Vargas, A. Torrecillas-Melendreras, E. Nicolás-Nicolás, J. J. Alarcón-Caballero, “Prototipo de sensor cuántico UIC-01 para mediciones de radiación fotosintéticamente activa en el dosel vegetal”, *Tierra Latinoamericana*, vol. 24, no. 2, April-June 2006, pp. 225-231.
 - [33] “Terrestrial Quantum Sensors”, cuarta edición, LI-COR, Lincoln, NE, 2015.
 - [34] K. J. McCree, “The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants”, *Agricultural Meteorology*, vol. 9, March-April 1972, pp 191-216.
 - [35] I. Amri, E. D. Atmajati, R. A. Salam, E. Yuliza, M. M. Munir, “Potentiometer A Simple Light Dependent Resistor-Based Digital”, in 2016 International Seminar on

- Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology, Malang, 2016, pp. 24-27.
- [36] Desconocido. “(PGM) Light Dependent Resistors”. Internet: <http://www.token.com.tw/pdf/resistor/cds-resistor-pgm.pdf>, Jul. 3, 2017 [Nov. 14, 2017].
 - [37] “Apuntes de Instrumentación Electrónica”, class notes for Instrumentación Electrónica, Department of Engineering and Architecture, Universitat de les Illes Balears.
 - [38] D. Leal Ortiz, “Diseño del dispositivo de verificación de un regloscopio”, Ing. Ind. thesis, Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
 - [39] “Introduction”. Internet: www.arduino.cc/en/Guide/Introduction, [Feb. 19, 2018].
 - [40] “Language Reference”. Internet: www.arduino.cc/reference/en/, [Feb. 19, 2018].
 - [41] “Arduino Uno Rev3”. Internet: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>, [Feb. 19, 2018].
 - [42] M. C. Snowden, K. R. Cope, B. Bugbee, “Sensitivity of Seven Diverse Species to Blue and Green Light: Interactions with Photon Flux”, PLoS ONE, vol. 11, no. 10, Oct. 2016, pp 1-32.
 - [43] “Led World 10 PCS 3W Red High Power LED Light Emitter 620-630NM with 20mm Star Base”. Internet: www.amazon.com/Led-World-Power-Emitter-620-630NM/dp/B00MNAYCBI, [Sep. 18, 2017].
 - [44] “Led World 10 PCS 3W Yellow High Power LED Light Emitter 585-595NM with 20mm Star Base”. Internet: www.amazon.com/Led-World-Yellow-Emitter-585-595NM/dp/B00N4O0UIG, [Sep. 18, 2017].
 - [45] “Led World 10 pcs 3W Green High Power LED Light Emitter 520-530NM with 20mm Star Heatsink”. Internet: www.amazon.com/Led-World-Emitter-520-530NM-Heatsink/dp/B00MTGDA9Q, [Sep. 18, 2017].
 - [46] “Led World 10 PCS 3W Extreme Royal Blue Power LED 445-450nm Plant Grow with 20mm Star Base”. Internet: www.amazon.com/dp/B00MNB4LJU/ref=psdc_2314207011_t1_B00MNAYCBI, [Sep. 18, 2017].
 - [47] “Led World 50 PCS 3W Deep Red High Power 660NM Plant Grow LED Emitter Light with 20mm Star Base”. Internet: www.amazon.com/Led-World-Power-

- 660NM-Emitter/dp/B00MOD0SK8, [Sep. 18, 2017].
- [48] “10 x 3 Watt led driver”. Internet: <https://directvoltage.com/shop/led/led-grow-lights/10-x-3-watt-leds-driver/>, [Sep. 18, 2017].
- [49] “ABelle LED Strip Light Plant Grow Lights 16.4ft 5050 SMD Waterproof Full Spectrum Red Blue 4:1 Growing Lamp for Aquarium Greenhouse Hydroponic Plant Garden Flowers (5 M)”.Internet: <https://www.amazon.com/ABelle-Lights-16-4ft-Waterproof-Spectrum/dp/B01NAC7ZOC>, [Sep. 18, 2017].
- [50] “Operating Guide Keysight Models 664xA, 665xA, 667xA, 668xA, and 669xA GPIB DC Power Supplies”, segunda edición, Keysight Technologies, Santa Rosa, CA, 2014.
- [51] “Keysight 3458A Multimeter”, séptima edición, Keysight Technologies, Santa Rosa, CA, 2014.
- [52] “Measuring Lumens - What are “Pupil Lumens”?”. Internet: <http://blog.lisungroup.com/measuring-lumens-what-are-pupil-lumens/>, [Nov. 06, 2018]
- [53] E. Hecht, “Óptica”, Boston, MA.: Addison-Wesley Longman Inc., 1998, pp. 331-332.
- [54] “Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC”, Rohm Semiconductor, Kyoto, 2009
- [55] “An Arduino library for the digital light sensor breakout boards containing the BH1750FVI IC”. Internet: <https://github.com/claws/BH1750>, [Mar. 27, 2018].
- [56] “Tabla de distancias led (revisada)”. Internet: www.todogrowled.com/es/blog-todogrowled/29_tabla-distancias-led, [May. 02, 2018].