

SISTEMA PARA LA MEDICIÓN INDIRECTA DE RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA USANDO LABVIEW

Noriega Gardea Moisés Miguel Angel¹, Corral Martínez Luis Francisco¹, Garduño Wilches Ismael Arturo², Anguiano Morales Marcelino¹, Trujillo Schiaffino Gerardo¹ y Salas Peimbert Didia Patricia¹

¹Tecnológico Nacional de México/I.T. Chihuahua, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Tecnológico 2909, Chihuahua, Chih., México, 31310, Tel. +52 (614) 2012000

² Cátedras CONACYT/Centro de Investigación en Ciencia Avanzada y Tecnología Aplicada del IPN Calzada Legaria #694, Col. Irrigación, Ciudad de México, 11500, Tel: +52 (55) 57296000 Ext: 67729

mmanoriega@outlook.com, lfcorral@itchihuahua.edu.mx

RESUMEN.

En el presente trabajo se presenta el desarrollo de un sistema programado en LabVIEW para la medición indirecta de la radiación fotosintéticamente activa, el cual permite estimar de manera precisa dicha medición partiendo de lecturas de iluminancia y la información del flujo radiante espectral de la fuente de iluminación. Este sistema ofrece una alternativa de medición ante lo costoso y especializado de los detectores cuánticos que realizan la medición directa, así como una mejora significativa ante la baja precisión de las mediciones realizadas exclusivamente con luxómetros. Para validar el sistema se emplearon tres fuentes tipo led usadas típicamente para la iluminación de cultivos de interior así como un detector cuántico. Los resultados muestran una elevada correlación entre las lecturas fotométricas ajustadas y las lecturas cuánticas, teniendo errores de entre el 2% y el 7% siendo específicos para cada fuente de iluminación.

Palabras Clave: Radiación fotosintéticamente activa, detector cuántico, LabVIEW.

ABSTRACT.

The following work describes a photosynthetically active radiation indirect measurement system programmed in LabVIEW. In order to obtain an accurate estimation of this radiation, the system processes illuminance measurements as long as spectral radiant flux information from the illumination source. This system offers an alternative to the expensive and specialized quantum detectors that perform direct measurement, as well as a significant improvement to the low precision measurements made exclusively with luxometers. To validate the system, three indoor crop illumination LED sources and a quantum detector were used. Results show a high correlation between the adjusted photometric estimations and the quantum measurements, with errors ranging from 2% up to 7%, being specific for each illumination source.

Keywords: Photosynthetically active radiation, quantum detector, LabVIEW.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia se han desarrollado diferentes técnicas de cultivo, algunas de las cuales son realizadas en interiores donde la luz solar no tiene acceso, por lo que es necesario el uso de fuentes de iluminación artificiales que fomenten el

crecimiento de los cultivos. Sin embargo, no cualquier fuente de iluminación puede ser utilizada, ya que algunas presentan emisiones que no son de provecho para las plantas. La radiación fotosintéticamente activa o PAR (por sus siglas en inglés: Photosynthetically Active Radiation) es aquella radiación dentro del rango de los 400 a 700 nm del espectro electromagnético que es capaz de producir actividad fotosintética en organismos fotosintéticos como plantas, algas marinas y algunas bacterias. Sin embargo, otras longitudes de onda fuera de este rango pueden afectar los componentes celulares de estos organismos alterando su correcto desarrollo. Lo anterior trae como consecuencia la importancia de estudiar las condiciones de iluminación en que se desarrollan estos organismos [1]. Debido a esto resulta de vital importancia el monitoreo constante de las condiciones de iluminación de los cultivos, en especial aquellos que requieren de fuentes de iluminación complementarias para su desarrollo, ya que la falta o exceso de radiación recibida por las plantas puede afectar de manera negativa su crecimiento.

La radiación PAR se expresa en términos de densidad de flujo de fotones fotosintéticos o PPF y sus unidades son los moles de fotones por unidad de tiempo por unidad de área ($\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$) [2].

El estudio de la radiación PAR se realiza para grandes áreas comúnmente a partir de los datos de la radiación solar extraídos de satélites espaciales o estaciones meteorológicas [3]. Otra manera de medir la radiación PAR es mediante el uso de medidores de radiación tales como rastreadores solares y piranómetros, los cuales al ser instrumentos especializados resultan muy costosos y requieren ajustes, del mismo modo, al ser medidores de radiación solar no entregan directamente lecturas de radiación PAR lo cual es otro inconveniente [4]. Por último, existen dispositivos capaces de medir la radiación PAR de manera directa, conocidos como detectores cuánticos, los cuales están adaptados para responder únicamente al rango de los 400 a 700 nm de manera lineal permitiendo la medición de esta radiación; sin embargo presentan también el inconveniente de ser muy costosos [5].

Debido a las limitaciones que presenta una medición directa de la radiación PAR, en muchos cultivos, sobre todo de invernadero, se emplean luxómetros para medir las condiciones de iluminancia. Al ser un instrumento que mide cantidades fotométricas, las cuales están en función de la sensibilidad del ojo humano y no en la respuesta de las plantas, el uso del luxómetro no entrega lecturas confiables de radiación PAR, sobre todo cuando se requiere tener control sobre la cantidad de flujo de fotones incidentes sobre el cultivo. Un ejemplo muy claro es que dos fuentes de distinto color que producen la misma iluminancia sobre una superficie, entregarán lecturas iguales con el luxómetro, pero muy distintas con un detector cuántico. Lo anterior abre la posibilidad de desarrollar un método alternativo para la medición indirecta de la radiación PAR en la que se tomen en cuenta las características espectrales de la fuente de iluminación, así como la lectura de un luxómetro común.

En tiempos recientes se ha incrementado el uso de lámparas led para la iluminación de cultivos en interiores debido a sus ventajas sobre otras fuentes de iluminación, siendo una de las principales que emiten longitudes de onda muy específicas, por lo que se pueden controlar de manera precisa las condiciones de iluminación en un cultivo [6].

En el presente trabajo se describe el proceso llevado a cabo para el desarrollo de un programa en LabVIEW que permite procesar las características espectrales de una fuente de iluminación y combinarlas con las lecturas proporcionadas por un luxómetro para entregar una medición de la radiación PAR de forma indirecta. Se describe también la caracterización de tres fuentes de iluminación led para cultivos y la validación del sistema contra las lecturas de un detector cuántico.

2. DETECTORES DE RADIACIÓN

2.1. La medición de la radiación

Lo que más importa cuando se habla de la respuesta de los detectores a radiación incidente es la proporción entre el flujo de entrada y la señal eléctrica de salida. En los detectores de calidad, esta proporción, llamada responsividad o sensibilidad del detector, es constante en un gran rango de niveles de flujo incidente. En estos casos, se puede utilizar la siguiente relación entre la radiación de entrada Φ y la señal de salida S :

$$S = R\Phi + S_0 \quad (1)$$

Donde R es la responsividad del detector y S_0 es la salida oscura y se refiere a la salida diferente de cero que tienen algunos detectores cuando el flujo incidente es cero.

La dependencia de la longitud de onda de la función de respuesta es de interés especial para el desarrollo de este proyecto. Se considera entonces R como función de la longitud de onda y se designa como $R(\lambda)$. Se designa a la irradiancia espectral incidente sobre el área sensible A de dicho detector como $E_\lambda(\lambda)$ y finalmente se considera la transmitancia espectral

del medio, que generalmente es una ventana o filtro óptico y se designa como $T(\lambda)$. Tomando en consideración lo anterior la señal de salida de un detector está dada por:

$$S = A \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) T(\lambda) R(\lambda) d\lambda + S_0 \quad (2)$$

Esta medición se representa esquemáticamente en la figura 1 [7].

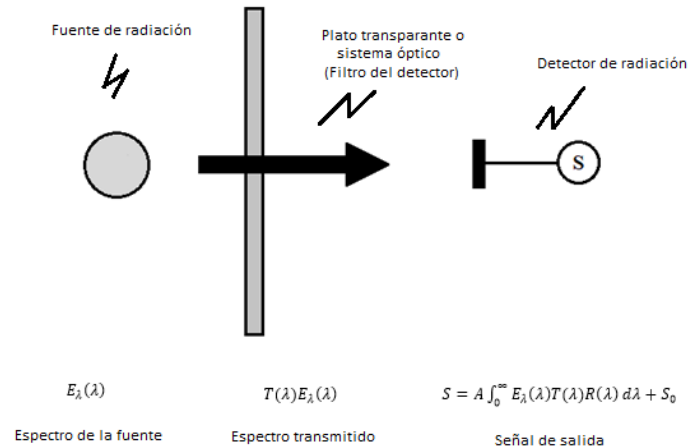


Figura 1. Adquisición de señal en un detector de radiación.

2.2. El luxómetro

Los detectores fotométricos, como el luxómetro, están adaptados para tener una respuesta similar a la del ojo humano, por lo que deben responder a la función luminosa espectral o curva $V(\lambda)$.

La curva $V(\lambda)$ describe la respuesta espectral de un observador humano bajo condiciones de visión fotópica (vista diurna). Esta respuesta fue estandarizada en 1924 por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE). Se ha adoptado una curva de respuesta estándar como se muestra en la siguiente figura [7].

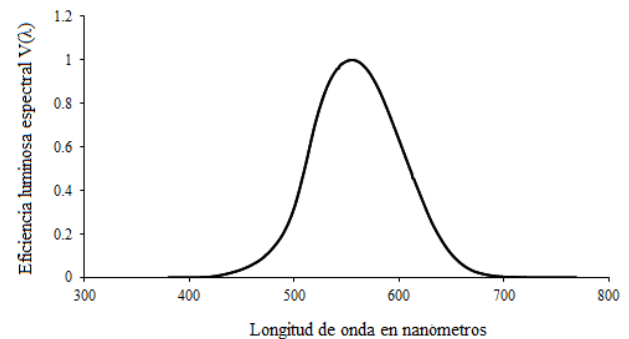


Figura 2. Función luminosa espectral $V(\lambda)$ para el estándar de 1924 de la CIE.

2.3. El detector cuántico

Los detectores cuánticos son dispositivos que basan su funcionamiento en un fotodiodo, el cual ha sido adecuado para que tenga una respuesta lineal en el rango de los 400 a 700 nm del espectro electromagnético con el fin de poder medir la radiación PAR. Regularmente este tipo de detectores son de tamaño reducido ya que son utilizados debajo del dosel de las plantas, por lo que deben ser poco sensibles a los cambios de temperatura [8]. La curva de respuesta cuántica espectral es la función que expresa la relación entre el rendimiento cuántico con la longitud de onda de la radiación incidente, la cual se muestra en la figura 3 [9-10].

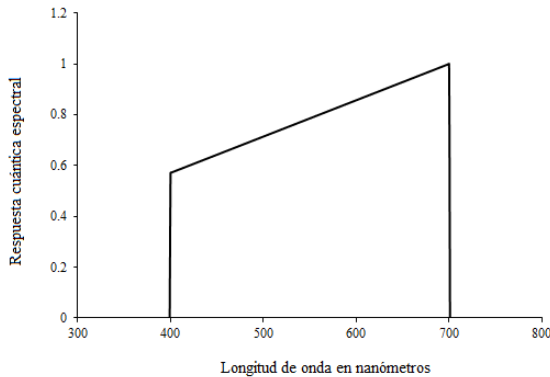


Figura 3. Curva de respuesta cuántica espectral.

Para obtener la respuesta del detector a cualquier fuente de radiación natural, la función de respuesta espectral debe ser integrada sobre su rango de sensibilidad espectral (ecuación 2). Un detector cuántico ideal mide el número de fotones incidentes independientemente de sus longitudes de onda. Un detector cuántico real es por lo general un sensor fotovoltaico que basa su funcionamiento en el efecto fotoeléctrico. El uso de este efecto permite que la respuesta del sensor al número de fotones, independientemente de sus longitudes de onda, sea casi lineal. Lo anterior hace que los detectores cuánticos sean muy sensibles por lo cual su respuesta al cambio de flujo de fotones es casi instantánea [5].

La respuesta de los detectores fotométricos y cuánticos es muy distinta y por ello un luxómetro no puede entregar por sí mismo una lectura adecuada de radiación PAR. Sin embargo, al conocer las características espectrales de la fuente $E_{\lambda}(\lambda)$, se pueden compensar los efectos de la curva $V(\lambda)$ y determinar un factor de corrección que permita aproximar con precisión la lectura del luxómetro a una lectura PAR.

3. CARACTERIZACIÓN DE FUENTES DE ILUMINACIÓN

La obtención de las características espectrales de las fuentes de iluminación se realizó mediante el uso de una esfera integradora y un espectroradiómetro, bajo condiciones controladas de temperatura, voltaje y corriente. Se eligieron 3

fuentes de iluminación para las pruebas de medición de radiación PAR de manera indirecta. Las fuentes elegidas fueron una lámpara led de color rojo, una lámpara led de color rojo profundo (nombre dado por el fabricante) y un sistema de ledes mezclados rojos y azules en presentación de tira lineal con una proporción de 5 ledes rojos por uno azul. Los iluminantes seleccionados son empleados específicamente para la iluminación de cultivos en interiores donde se requiere contar con condiciones de iluminación controladas. Se eligieron estas fuentes de iluminación porque se ha comprobado que los organismos fotosintéticos tienen su pico de absorción en las longitudes de onda correspondientes a estos colores [11].

Las fuentes de iluminación elegidas fueron caracterizadas eléctrica y ópticamente. Las pruebas llevadas a cabo para la caracterización se hicieron dentro de la esfera integradora para que no influyeran factores externos durante el proceso. Además de su espectro de iluminación se obtuvieron parámetros ópticos como longitud de onda dominante y su temperatura de color correlacionada (CCT), entre otros parámetros [12-15].

Para poder controlar de manera precisa el voltaje y corriente suministrados a las fuentes de iluminación se utilizó una fuente de alimentación de corriente directa de la marca Keysight modelo 6655. Por otro lado, para las mediciones espectrales de la fuente se utilizó un espectroradiómetro CCD Lisun LMS-9000, mientras que para el cálculo de la iluminancia se utilizó un luxómetro de la marca Gossen modelo MAVOLUX 5032b.

Los resultados de la caracterización se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Resultados de caracterización de las fuentes de iluminación analizadas.

	<i>Rojo</i>	<i>Rojo Profundo.</i>	<i>Mixto</i>
Voltaje	3.45 V	4.28 V	12.5 V
Corriente	1.14 A	0.56 A	0.84 A
Potencia eléctrica	3.93 W	2.4 W	10.5 W
Flujo luminoso	108.2 lm	37.68 lm	58.71 lm
Iluminancia	71.45 lx	28.36 lx	39.65 lx

4. SISTEMA DE MEDICIÓN EN LABVIEW

Se desarrolló un sistema de medición en el software de programación LabVIEW para determinar la radiación fotosintéticamente activa de manera indirecta utilizando los datos de las caracterizaciones descritas con anterioridad así como las respuestas de los detectores fotométrico y cuántico. Este programa permite también calcular la potencia eléctrica consumida por las fuentes de iluminación analizadas al introducir el voltaje y corriente de alimentación suministrado. En este programa se grafica también el espectro de iluminación respectivo y también se puede obtener la lectura realizada por el detector cuántico LI-COR mod. 190-R en μ moles

fotones/s·m². Para los cálculos necesarios para medir la radiación PAR se partió de la siguiente ecuación así como de los datos de caracterización de las fuentes de iluminación.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

Se tomaron lecturas con el luxómetro, el espectroradiómetro de esfera integradora y el detector cuántico para diferentes niveles de voltaje y corriente para cada fuente de iluminación, comenzando por el nivel más bajo de operación y subiendo progresivamente hasta el más alto, esto con el fin de observar su comportamiento ante los cambios de alimentación. Luego de registrar todas las lecturas del comportamiento de las fuentes de iluminación, lo primero que se hizo para el desarrollo del programa de medición fue obtener los datos de los espectros de iluminación de cada fuente de iluminación entregados por el espectroradiómetro de la esfera integradora para cada una de las lecturas. Los datos de potencia emitida por cada una de las longitudes de onda del espectro de emisión son usados en combinación con la curva de respuesta fotométrica para obtener el cálculo de flujo luminoso y también son aplicados en la ecuación 3 para determinar el cálculo de flujo de fotones de la fuente.

4.1. Medición flujo de fotones

Después de calcular la energía de cada fotón (ecuación 3), 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, la cantidad resultante fue dividida entre el número de Avogadro (6.022x10²³) para obtener los moles de fotones por segundo emitidos por cada fuente de iluminación. Un mol de fotones por segundo de luz blanca equivale a más de 200,000 W de potencia radiante, por lo que las unidades más adecuadas para representar el flujo de fotones son los μmoles de fotones/s

4.2. Medición del flujo luminoso

Con los mismos datos de la caracterización de las luminarias se realizó el cálculo del flujo luminoso de cada fuente de iluminación. Para realizar este cálculo fue necesario utilizar también los datos de la función luminosa espectral o curva V(λ). 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(λ) para cada una de las longitudes de onda y también por la constante 683 lm/W, 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. De esta forma, luego de calcular el flujo luminoso se puede obtener la eficacia de cada fuente de iluminación de acuerdo a la potencia eléctrica calculada con anterioridad.

4.3. Correspondencia entre flujo fotónico y flujo luminoso

Una vez que se tienen las dos mediciones anteriores se realiza la división del flujo fotónico (μmoles fotones/s) entre el flujo luminoso (lúmenes); quedando las unidades de esta operación como (μmoles fotones/s)/lumen. El valor obtenido de la división está asociado al espectro de emisión de cada una de las fuentes de iluminación y es constante para la misma ante distintos niveles de emisión. Este resultado fue multiplicado por la lectura obtenida con el luxómetro (luxes); dado que los luxes se derivan del flujo luminoso por unidad de área, al multiplicar la lectura del luxómetro por la división hecha con anterioridad se obtiene un resultado con las mismas unidades de la radiación PAR (μmoles fotones/s·m²).

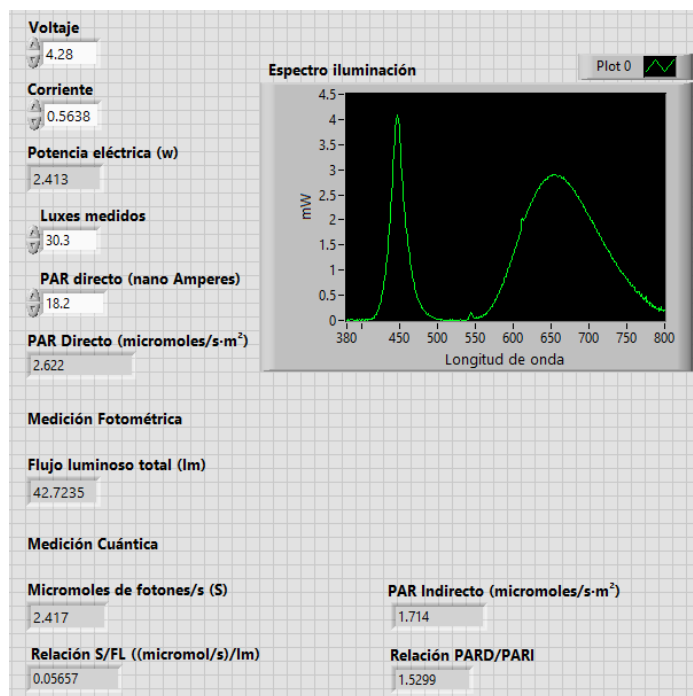


Figura 4. Implementación del sistema en LabVIEW.

Del sistema implementado se pueden obtener diversas variables de utilidad, como los son la eficacia de la luminaria al dividir el flujo luminoso total entre la potencia eléctrica consumida. En la parte inferior izquierda del panel se encuentra la relación entre el flujo fotónico y flujo luminoso, que es una constante para la luminaria en particular, y cuya obtención de forma analítica ya se describió con anterioridad. Esta constante al ser multiplicada por la lectura del luxómetro proporciona un valor inicial para la medición indirecta de la radiación PAR. En la parte inferior derecha del panel se obtiene una constante de calibración al

dividir la lectura de detector cuántico (PAR directo) entre la medición dada inicialmente por el sistema (PAR indirecto), dicha constante es característica del luxómetro empleado en el proceso. Como último paso se multiplica la lectura del luxómetro por las dos constantes de proporcionalidad obtenidas y eso da como resultado la medición indirecta de la radiación PAR.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se realizaron mediciones indirectas de la radiación PAR a distintos niveles de iluminación sobre las fuentes caracterizadas y todas las pruebas fueron validadas con el detector cuántico LI-COR 190-R. De las pruebas anteriores se obtuvo que la mayor precisión en la estimación de la radiación PAR se logró con el sistema de iluminación de color mixto (tira de ledes) con un error promedio del 2%, a este sistema le siguió la lámpara de color rojo profundo con un error promedio del 4% y finalmente las mediciones menos precisas fueron las determinadas para la lámpara de color rojo, con un 7% de error.

Una vez que se caracteriza una luminaria, la constante de proporcionalidad entre su flujo fotónico y su flujo luminoso no cambia, por lo que se puede generar una base de datos para las fuentes de iluminación más empleadas en los sistemas de cultivo en interiores.

Los resultados anteriores demuestran la eficacia del método propuesto así como la viabilidad de desarrollar un sistema embebido que emplee un sensor fotométrico y una base de datos de constantes características de luminarias, el cual permita calcular con precisión de manera indirecta la radiación PAR, como una alternativa de bajo costo a los detectores cuánticos.

6. REFERENCIAS

- [1] 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.
- [2] E. Pérez-Urria, "Fotosíntesis: Aspectos Básicos", Reduca (Biología), vol. 2, no. 3, 2009, pp. 1-47.
- [3] 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.
- [4] 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
- [5] 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.
- [6] S. Dutta Gupta, B. Jatohu, "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
- [7] W.R. McCluney, "Introduction to radiometry and photometry", Artech House Inc., 1994, pp 1-32.
- [8] 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.
- [9] M. Mataix, M. Mataix, Diccionario de Electrónica, Informática Y Energía Nuclear, Ediciones Diaz de Santos, 1999, pp. 552.
- [10] "Terrestrial Quantum Sensors", cuarta edición. LI-COR, Lincoln, NE, 2015.
- [11] 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.
- [12] M. G. Craford, "From Holonyak to Today", Proceedings of the IEEE, vol. 101, no. 10, October 2013, pp 2170-2175.
- [13] M. Motyčka, J. Škoda, J. Štěpánek, "The Uncertainty of Measurement of the Luminous Flux in an Integrating Sphere", in *Electric Power Engineering (EPE)*, 2017.
- [14] 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.
- [15] N. Rivero, "Medida de Flujo Luminoso en Esfera de Ulbricht".