

# Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF)

## Development of an artificial LED lighting system for indoor farming

Recibido: 29-12-2015 Aceptado: 22-11-2016

Yesid Ramos Gonzalías<sup>1</sup>  
Eduardo Ramírez Lasso<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Colombiano, Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones, Universidad Autónoma de Occidente – Cali. jesid.ramos@gmail.com.

<sup>2</sup> Colombiano, Ingeniero Mecánico, Gestor Línea de Diseño e Ingeniería Tecnoparque Astin – Cali. e.ramirezlasso@gmail.com

### Resumen

El concepto de granja vertical, también relacionada como Agricultura Integrada en Edificaciones del acrónimo BIA (*Building Integrated Agriculture*) es un nuevo enfoque de la producción basada en la idea de localizar sistemas de cultivo de alto rendimiento en edificaciones para producir alimentos al interior de estos, haciendo uso de fuentes renovables, locales de energía y agua. Se les conoce como luces de crecimiento a los sistemas de iluminación empleados en los cultivos en interiores, hacen parte de este concepto y son una fuente de luz artificial. Estas funcionan de tres maneras diferentes: 1) proporcionan toda la luz que la planta necesita para crecer, 2) complementan la luz natural, sobre todo en los meses de invierno, donde las horas de luz día son cortas y 3) aumentan el periodo de la luz día con el fin de disparar el crecimiento y la floración. Se exponen las características más relevantes de los sistemas de iluminación LED (Light Emitting Diode) para cultivos en interiores y se propone un prototipo de iluminación que emula el comportamiento solar, es decir que varía la intensidad de la luz en un periodo de tiempo definido (6 horas de fase lumínica y 2 de fase oscura conforman un ciclo de trabajo, que se repite 3 veces en un día) donde el modelo de funcionamiento será el de proporcionar toda la luz que la planta necesita para crecer saludablemente, en un entorno libre de luz solar.

**Palabras clave:** Luz; Iluminación LED; longitud de onda; cultivos interiores; granja vertical.

### Abstract

The concept of vertical farming, also related to Building Integrated Agriculture (BIA), is a new approach to production based on the idea of locating

high performance crops system in buildings to produce food inside them, using renewable resources, local energy, and water. Lighting systems used in indoor farming are known as growth lights and they are used as an artificial light sources. These operate in three different ways: 1) they provide all the light that the plant needs for growing; 2) they complement the natural light, especially in the winter, where daylight hours are shorter than in other stations 3) increase the period of daylight in order to activate the growth and flowering. This reading describes the most important characteristics of LED (Light Emitting Diode) lighting systems for indoor farming and a prototype lighting that emulates solar performance, that is, the intensity of light varies in a defined time period (6 hour light phase and 2 hours dark phase make a work cycle, which is repeated three times a day), where the operating model will be to provide all the light that the plant needs for healthy growth, in an environment free from sunlight.

**Keywords:** light; led lighting; wavelength; interior crops; vertical farming.

## Introducción

La última década del siglo XX y comienzos del XXI se ha convertido en una época de intensos estudios sobre los efectos de la fotosíntesis en las plantas agrícolas, en parte o en su totalidad por medio de fuentes de luz artificial (Heinrich Böll Stiftung, 2009; Specht et al., 2014; Winter Green Research, 2014). El tiempo de selección y la producción de la comida (por ejemplo, vegetales y frutas) se pueden controlar artificialmente por medio del ambiente de crecimiento. Algunas de las variables más importantes que intervienen ahí son la intensidad de la luz, la temperatura y la humedad en la granja. Estudios realizados por (Caplow & Nelkin, 2007; Ahmad, Nurul, Robiah & Nurul, 2013; Tongxin et al., 2012), se han basado en varios fenómenos, tales como la influencia declarada del espectro y la intensidad de irradiación de la luz en el crecimiento de la masa de la planta o el rendimiento de longitud de onda ( $\lambda$ ). Tal proceso de irradiación artificial era antes difícil de realizar. Intentos ineficaces y costosos se llevaron a cabo con el uso de tungsteno y luego por medio de lámparas fluorescentes alimentadas por corriente alterna. En la actualidad la tecnología de los dispositivos LED ha avanzado rápidamente en diferentes campos de las ciencias aplicadas ya que permiten la producción de luz brillante y de larga duración. Para los cultivos en interiores emiten sólo

las longitudes de onda de luz correspondientes a valores propios y cercanos a los picos de absorción de los procesos fotoquímicos típicos de una planta que están entre 400 y 500 nanómetros (nm) y entre 600 y 700 nm, longitudes de onda que estimulan la germinación, crecimiento vegetativo, desarrollo y floración de las plantas por medio de sus pigmentos fotosensitivos (Winter Green Research, 2014). En comparación con otros tipos de luces de crecimiento, estos dispositivos para los cultivos en interiores son atractivos debido a que no requieren balastos y emiten mucho menos calor que cualquier sistema de iluminación.

## Dificultades

La creciente urbanización y el auge mundial de la construcción han subrayado la importancia de la eficiencia en el entorno ya construido, es decir, en las urbes. Para el 2050, se estima que el 80 por ciento de la población del mundo vivirá en zonas urbanas (en la actualidad, el 60 por ciento lo hace). Para esta fecha la población habrá aumentado aproximadamente a 9,2 billones de habitantes, gran parte de ella en el mundo en desarrollo. Muchos expertos sostienen que a menos que se ejecuten medidas drásticas, el mundo podría enfrentar escasez dramática tanto en la comida como en la tierra cultivable. Heinrich, (2009). La hambruna y las catástrofes ecológicas son algunas de las posibles graves consecuencias debido a las ya conocidas inundaciones, envenenamiento de cultivos, heladas fulminantes e incendios forestales como se puede observar en la Figura. 1.



**Figura 1.** Consecuencias de catástrofes climáticas. Fuente: The theory behind the concept of vertical farming . South Carolina. Recuperado de [http://media.clemson.edu/public/restoration/iae/vfarm/student\\_verticalfarming.pdf](http://media.clemson.edu/public/restoration/iae/vfarm/student_verticalfarming.pdf)

Durante los últimos años se han empleado diversas formas y fuentes de estimulación electromagnética apropiada para el óptimo desarrollo del proceso de fotosíntesis de las plantas de manera natural y artificial. La principal fuente gratuita capaz de hacerlo es el sol, ya que este emite rayos x, luz ultravioleta, luz visible, luz infrarroja e inclusive ondas de radio, sin embargo dentro de esta gran cantidad de tipos de ondas electromagnéticas que el sol emite, algunos tipos no son apropiados para cualquier ser vivo, y en especial para algunas plantas, como por ejemplo la luz ultravioleta B y C; Además la luz solar está presente técnicamente durante 12 horas, de acuerdo con la estación climática y el lugar donde se encuentre; estas horas pueden variar de manera positiva o negativa para el proceso en cuestión comprometiendo la capacidad productiva de las plantas.

Por otro lado se encuentran las fuentes artificiales tales como: Bombillas metal halide, Bombillas incandescentes, Bombillas de vapor de mercurio, Bombillas fluorescentes y Bombillas de alta presión de sodio, HPS (High Pressure Sodium). Aunque son ampliamente utilizadas para acelerar el proceso de fotosíntesis y así el desarrollo de las plantas en granjas verticales (vertical farming), lugares y épocas donde la oscuridad prevalece más que la luminosidad, poseen grandes dificultades tales como: tamaño, componentes móviles, composición de gases nocivos para la salud de los humanos, gran consumo energético, baja vida útil, entre otras, y ante la gran variedad de características no positivas, estas últimas ponen en riesgo la continuidad de algunas de ellas.

Actualmente gran parte de la energía utilizada se desperdicia en la producción de calor, sólo entre 10 - 30 % de la energía se convierte en radiación fotosintéticamente activa PAR, por sus siglas en inglés (*Photosynthetically active radiation*) que la planta puede utilizar para la fotosíntesis.

## Iluminación artificial LED

En esencia por este argumento surge la necesidad de proponer y poner bajo prueba un sistema de iluminación capaz de estimular positivamente el proceso de la fotosíntesis en algunas plantas, de manera eficiente para cultivos en interiores donde el control total y/o parcial y automatizado de procesos o tareas pueda revelar la importancia de la iluminación artificial LED. De esta forma la iluminación artificial para el crecimiento de las plantas funciona de tres maneras diferentes:

- Proporcionan toda la luz que la planta necesita para crecer.
- Complementan la luz natural, sobre todo en los meses de invierno, donde las horas de luz día son cortas.
- Aumentan el periodo de la luz día con el fin de disparar el crecimiento y la floración.

La iluminación LED ha tomado mucho más fuerza que cualquier otra tecnología de luz artificial empleada para estimular el crecimiento de las plantas. Debido a que estos son elementos de estado sólido lo cual significa que no poseen partes móviles como filamentos que puedan deteriorarse por vibraciones, y a la baja o casi nula radiación de calor en forma de luz, los dispositivos pueden ser ubicados muy cerca de las plantas y pueden ser configurados para emitir un alto flujo de luz incluso a intensidades altas (Tennessen, Singaas & Sharkey, 1994; Barta, Tibbits, Bula & Morrow, 1992) no generan luz ultravioleta ni infrarroja, lo que representa un alivio para quien debe estar expuesto al interior de una granja durante horas. El tiempo promedio de vida está alrededor de 50.000 horas y su tiempo de encendido es prácticamente instantáneo, su simplicidad hace que puedan contener diferentes tipos de LED en un solo encapsulado, su costo día a día disminuye y su eficiencia aumenta, lo que indica que su consumo energético es más bajo que cualquier otra fuente de luz artificial.

Otro aspecto importante de las lámparas y/o dispositivos LED es que el ángulo de emisión de luz es menor a 180 grados, lo cual implica que toda la luz generada está enfocada hacia la parte frontal del dispositivo, lo que no ocurre con los otros sistemas de iluminación, los cuales generan luz en todas las direcciones, haciendo necesario el uso de superficies que reflejen la luz emitida y se focalicen hacia adelante ocasionando pérdidas por reflexión (Macías; Ramos & Ulianov 2012).

Así una de las funciones más relevantes de los LED es emitir luz de longitud de onda específica para estimular apropiadamente el crecimiento de las plantas. Gracias al bajo consumo en energía eléctrica que poseen estos dispositivos, son capaces de ser integrados a modernos sistemas alternativos de energía eléctrica para su operación, como sistemas solares y eólicos. Como también pueden ser fácilmente integrados a sistemas de control digital, facilitando programas complejos de iluminación tales como la variación de la intensidad o la composición espectral sobre el curso de las etapas de desarrollo de la planta (Yeh & Chung 2009).

Por lo tanto, aunque los dispositivos LED tienen un gran número de ventajas, su principal desventaja radica en el alto costo de su adquisición y final implementación, ya que para su correcta operación y prolongación en el tiempo, es necesario diseñar circuitos electrónicos capaces de controlar variables importantes como lo son la corriente y la tensión del mismo. Así el desafío es encontrar la relación de longitudes de onda correcta, el método de emulación solar más apropiado durante la reproducción de semillas para probar y perfeccionar las estrategias de aplicación que reduzcan significativamente los costos relacionados con la energía, mantener o aumentar la calidad de la producción, y reducir los impactos ambientales negativos en la producción de los alimentos.

## Relación entre la luz y el crecimiento de las plantas

Las plantas requieren luz a través de toda su vida útil, desde la germinación hasta la floración y la producción de frutos y/o semillas. Así la luz es una onda electromagnética que viaja a través del espacio y existe como paquetes de energía discreta, llamada fotones. Esta puede ser medida de distintas formas, cada fotón tiene una longitud de onda específica y un nivel de energía como se describe a continuación. Tales variables que describen una medición de luz son: *Foot-candles*, *lux*, *watts*,  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  y  $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ .

$$E = (h * c) / \lambda \quad (1)$$

$E$  = Energía de cada fotón expresada en J (Julio)

$h$  = Constante de plank:  $6,63 \times 10^{-34}$  J·s

$c$  = Velocidad de la luz:  $3,0 \times 10^8$  m/s

$\lambda$  = longitud de onda, expresada en metros.

Así, la energía que es suministrada por cada fotón desde un sistema de iluminación artificial LED particular a las plantas es de:

Longitud de onda – Color Azul 458:  $434,279 \times 10^{-21}$  J

Longitud de onda – Color Rojo 656:  $303,201 \times 10^{-21}$  J

Lo que indica que el dispositivo LED de 458 nm (color azul), es mucho más energético que el de 656 nm (color rojo). Por este y otros motivos, las fuentes de iluminación LED para cultivos en interiores implementan menos dispositivos de este tipo en sus sistemas.

Existen 3 parámetros de luz de crecimiento comúnmente usados: calidad, cantidad y duración. Todos estos parámetros tienen diferentes efectos sobre el desarrollo de las plantas y se presentan a continuación (Singh; Basu; Meinhardt-Wollweber, & Bernhard, 2014).

## Cantidad de luz

Es el número de partículas llamadas fotones y principal parámetro que afecta la fotosíntesis, una reacción fotoquímica dentro de los cloroplastos de las células de las plantas en el que la energía lumínica se utiliza para convertir el  $\text{CO}_2$  atmosférico en carbohidratos, de aquí se desprenden dos variables, la intensidad de luz y la luz total diaria, comúnmente conocida como *Daily light integral* o (DLI) (Singh; Basu; Meinhardt-Wollweber, & Bernhard, 2014).

## Intensidad de luz

Es la cantidad de luz instantánea que reciben las plantas, expresada comúnmente en *foot-candles*, *watts* y *lux*.

Luz total diaria. Es una medición de la cantidad de luz recibida por las plantas durante un día en un área particular, expresada comúnmente por los investigadores en  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  o  $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ .

## Calidad de luz

Se refiere a la distribución espectral de la radiación, donde la porción de emisión está en azul, verde, rojo, y otra región visible e invisible de longitud de onda. Para la fotosíntesis, las plantas responden más fuerte a la luz roja y azul. La distribución espectral de la luz también afecta la forma, desarrollo y floración (foto morfogénesis) (Singh; Basu; Meinhardt-Wollweber, & Bernhard, 2014).

- Entre 400 y 520 nm, rango de longitud de onda correspondiente al espectro visible, comprendido por luz violeta, azul y verde. Tiene una fuerte influencia sobre el crecimiento vegetativo y la fotosíntesis.

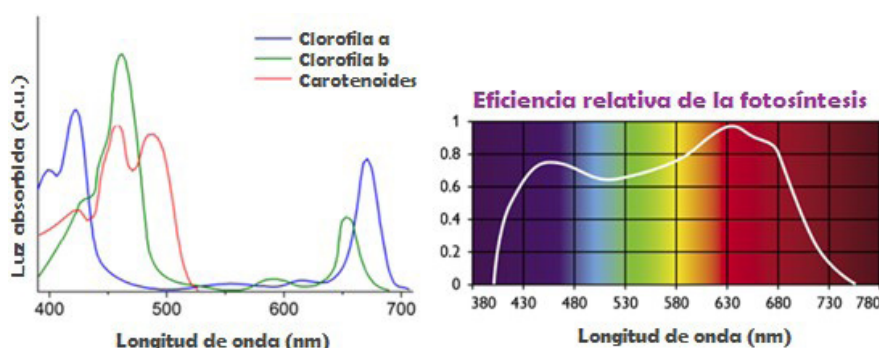
- Entre 520 y 610 nm, rango de longitud de onda correspondiente al espectro visible, comprendido por luz verde, amarilla y naranja. Tiene una poca influencia sobre el crecimiento vegetativo y la fotosíntesis. Es por este motivo que las plantas son verdes, ya que estas reflejan este rango de luz y no son absorbidas.

- Entre 610 y 720 nm, rango de longitud de onda correspondiente al espectro visible, comprendido por



luz roja. Tiene una fuerte influencia sobre el crecimiento vegetativo, la fotosíntesis, la floración y la germinación.

En la Figura 2 se puede observar la eficiencia relativa de la fotosíntesis en cuanto a diferentes longitudes de onda.



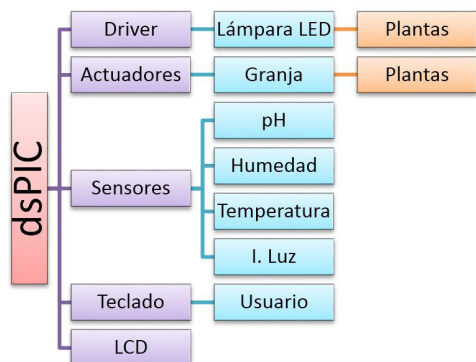
**Figura 2.** Fotosíntesis y longitudes de onda efectivas  
Fuente: MIT Technology Review.2014 & Philips Horticulture: (2014).

## Duración de luz

También conocido como fotoperiodo, principalmente afecta la floración. El tiempo de floración en las plantas, puede ser controlado regulando el fotoperiodo, es decir, el tiempo de luz que reciben las plantas.

## Descripción del equipo desarrollado; método y operación

LP1 es un sistema electrónico avanzado, diseñado para cultivos en interiores que integra una fuente de iluminación LED y un conjunto de sistemas de control capaces de generar condiciones apropiadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas en un ambiente libre de luz solar. Este proporciona de manera dinámica la apropiada calidad, cantidad y duración de la luz como también las correctas acciones de control para un eficiente y efectivo funcionamiento del cultivo, permitiendo ahorrar energía en comparación con técnicas de control y fuentes de iluminación tradicionales. La Figura 3 representa una descripción gráfica del sistema desarrollado.



**Figura 3.** Descripción grafica del sistema.

Sistemas microcontrolados o computarizados pueden ser usados para el control de ambiente, es decir, un sistema donde intervienen la temperatura, la humedad, la intensidad de la luz y el nivel del pH de la solución de nutrientes como variables más relevantes en una granja vertical para el proceso de fotosíntesis y crecimiento de las plantas. En orden de mejorar el desarrollo de un cultivo específico y minimizar el costo de producción se ha hecho cada vez más importante para los investigadores y cultivadores el desarrollo de estos sistemas de control.

Con el objetivo de proporcionar buenas condiciones de ambiente para un correcto crecimiento de las plantas en interiores, se desarrolla un sistema de control de ambiente capaz de ejercer acciones sobre las variables anteriormente mencionadas.

El sistema incluye:

- Un módulo de sensores dispuestos para captar las variables que intervienen en la granja.
- Un sistema de control FUZZY que aprovecha la información que aportan los sensores para ejercer acciones de control y así mantener condiciones deseables al interior de la granja o zona de cultivo.
- El programa capaz de generar la señal de control para el sistema de iluminación LED.

Adicionalmente, el sistema de control fue implementado en un microcontrolador dsPIC 30F4011 como cerebro principal, considerando los siguientes aspectos para el sistema de iluminación artificial:

- No exponer a una alta emisión de luz sin periodos de descanso a las plantas, como se observa en los actuales sistemas de iluminación artificial.
- Emular el comportamiento sinusoidal de la luz solar, efecto natural de estimulación electromagnética para las plantas y otros organismos fotosintéticos.
- Proporcionar periodos de estimulación intermitente o pulsante como la expuesta en el artículo de referencia.

De esta forma y considerando lo anterior, se procede con:

**Tabla 1.** Absorción de longitudes de onda para los pigmentos foto sensitivos.

| Longitudes de ondas absorbidas por los pigmentos foto sensitivos de las plantas |         |         |         |          |         |         |               |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------------|
| Pigmentos de las plantas                                                        | UV      | Azul    | Verde   | Amarillo | Naranja | Rojo    | Rojo profundo |
| Longitud de onda (nm)                                                           | 200-400 | 400-495 | 495-570 | 570-590  | 590-620 | 620-710 | 710-850       |
| Clorofila A                                                                     |         | X       |         |          |         | X       |               |
| Clorofila B                                                                     |         | X       |         |          |         | X       |               |
| Carotenoides                                                                    |         | X       |         |          |         |         |               |
| Criptocromos                                                                    | X       | X       |         |          |         |         |               |
| Fototropinas                                                                    | X       | X       |         |          |         |         |               |
| Fitocromo rojo                                                                  |         |         |         |          |         | X       |               |
| Fitocromo rojo profundo                                                         |         |         |         |          |         |         | X             |
| Todos los pigmentos                                                             | X       | X       |         |          |         | X       | X             |

## 2. Selección de los dispositivos

Identificadas las longitudes de ondas más efectivas, se inicia la etapa de selección de los dispositivos semiconductores LED. Para la selección de los dispositivos es necesario tener en cuenta parámetros importantes mencionados enseguida, de acuerdo con su relevancia,

## 1. Identificación de las características esenciales del sistema de iluminación

Una de las características con que debe contar la fuente de luz es la longitud de onda adecuada. Como se mencionó anteriormente, las longitudes de onda efectivas para el proceso de la fotosíntesis están entre 400 y 500 nm y entre 600 y 700 nm, longitudes de onda que estimulan varias etapas del desarrollo de la planta por medio de sus pigmentos fotosensitivos, como se observa en la Tabla 1.

tales como: Longitud de onda, eficiencia, precio y ángulo de emisión. A continuación, en la Tabla 2 se exponen algunos dispositivos considerados para el desarrollo del sistema de iluminación.

**Tabla 2.** Dispositivos considerador para el desarrollo del sistema de iluminación

| Item (Led azules) | Número de manufactura    | Longitud de onda (nm) | Flux@ 25°C, corriente de prueba (mW) | Precio (Dólar) | Angulo de emisión (Grados) | Consumo de potencia (W) |
|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------------------|----------------|----------------------------|-------------------------|
| 1                 | XPEBRY-L1-0000-00P01     | 458                   | 575                                  | 2,57           | 135                        | 1,085                   |
| 2                 | XBDROY-00-0000-000000L01 | 458                   | 513                                  | 2              | 115                        | 1,085                   |
| 3                 | XPEBRY-L1-0000-00M01     | 458                   | 538                                  | 2,29           | 135                        | 1,085                   |
| 4                 | ASMT-JB31-MMP01          | 460                   | 250                                  | 1,71           | 165                        | 1,12                    |
| Item (Led rojos)  | Número de manufactura    | Longitud de onda (nm) | Flux@ 25°C, corriente de prueba (mW) | Precio (Dólar) | Angulo de emisión (Grados) | Consumo de potencia (W) |
| 1                 | LHCPDP-2T3T-1-0-350-R18  | 645                   | 355                                  | 1,85           | 150                        | 0,735                   |
| 2                 | LXZ1-PD01-0056           | 655                   | 354                                  | 3,5            | 145                        | 0,77                    |
| 3                 | LXML-PD01-0040           | 645                   | 338                                  | 3,65           | 120                        | 1,26                    |
| 4                 | LXZ1-PA01                | 655                   | 350                                  | 2,73           | 120                        | 1,125                   |

**Fuente:** Los Autores

### 3. Configuración de la matriz LED

Seleccionados los dispositivos, la siguiente etapa consistió en la configuración o ubicación de los mismos, esta se diseñó partiendo del hecho que los dispositivos azules son un 40% más eficientes que los rojos, por lo que el criterio de configuración y diseño del panel o lámpara fue, ubicar por cada 2 LED rojos 1 LED azul, lo que permitiría tener un patrón de iluminación casi homogéneo como se puede apreciar en la Figura 4.

| ITEM | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------|------|------|------|------|------|
| 1    | Red  | Red  | Red  | Red  | Red  |
| 2    | Blue | Red  | Blue | Red  | Blue |
| 3    | Red  | Blue | Red  | Blue | Red  |
| 4    | Red  | Red  | Blue | Red  | Red  |
| 5    | Blue | Red  | Blue | Red  | Blue |
| 6    | Blue | Red  | Red  | Blue | Red  |
| 7    | Red  | Red  | Blue | Red  | Red  |
| 8    | Red  | Blue | Red  | Blue | Red  |
| 9    | Blue | Red  | Blue | Red  | Blue |
| 10   | Red  | Red  | Red  | Red  | Red  |

Figura 4. Configuración del panel LED

Sin embargo al final, la relación de dispositivos azules versus los rojos es de 18:32, es decir un patrón de homogeneidad del 91%. A continuación, en la Figura 5, se muestra la lámpara implementada.



Figura 5. Prueba PCB del panel LED.

### 4. Diseño de circuitos electrónicos

Definidos los dispositivos a usar y el diseño de la lámpara, se procede al diseño de los circuitos electrónicos que permite emular el efecto o comportamiento de la luz solar sobre las plantas y a la carcasa que almacenará dichos dispositivos. Para alimentar y poner en funcionamiento el sistema de iluminación se diseñó una fuente capaz de entregar hasta 105 watts de potencia requeridos para el correcto funcionamiento de la lámpara.

Posteriormente se realizó un código de programación en lenguaje C capaz de recrear por medio de la técnica de modulación por ancho de pulso PWM, del inglés (*Pulse Width Modulation*), la intensidad lumínica recibida por el sol durante un día, de esta forma se controla la intensidad de luz de la lámpara LED para iluminar el cultivo. En las siguientes imágenes (Figura 6a y Figura 6b) se puede observar la señal PWM generada desde el microcontrolador y captada con el osciloscopio.

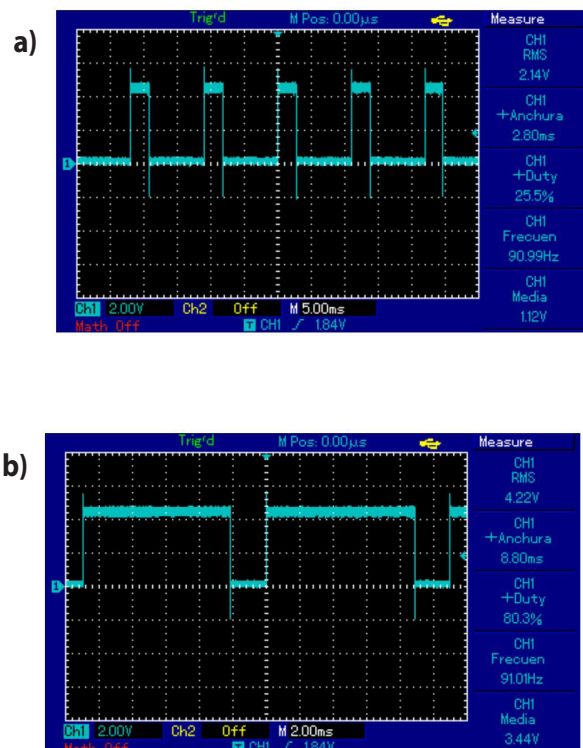
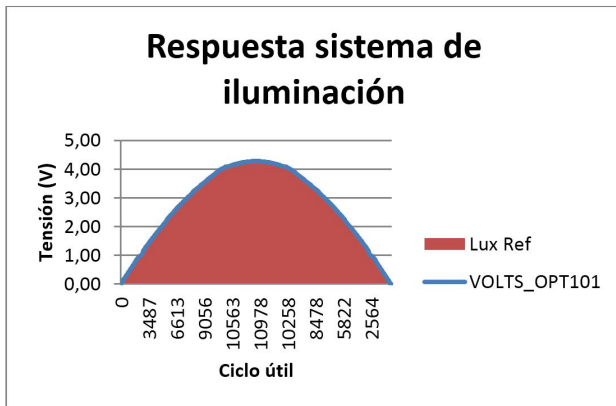


Figura 6. Señal de emulación solar generada y captada con osciloscopio, a) ciclo útil del 25%, b) 80%.

### Resultados

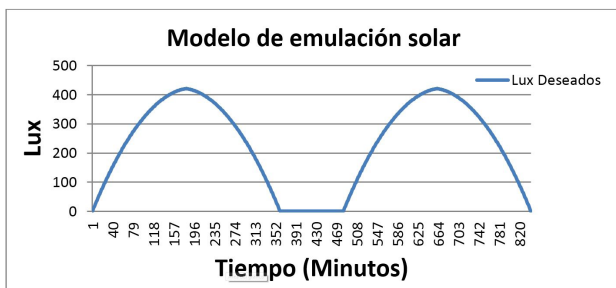
Múltiples pruebas permitieron corroborar que la señal generada por medio del microprocesador corresponde con la deseada. De esta forma y empleando el sensor OPT101, un sensor monolítico de alta velocidad de respuesta ante pequeñas variaciones de luz, se obtiene la gráfica que demuestra el cumplimiento del objetivo. Ésta se puede apreciar en la Figura 7.

A continuación se pueden observar dos curvas: la curva rellena en color rojo, representa la referencia o valor deseado y sobre esta curva se encuentra la azul, la respuesta del sistema de iluminación ante el estímulo o señal de control PWM generada.



**Figura 7.** Respuesta del sistema de iluminación.

La Figura 7 indica que el sistema de iluminación cumple con lo esperado y es capaz de emular el comportamiento sinusoidal de la luz solar. Cabe mencionar que el valor máximo de tensión entregado por el sensor, apreciable en el eje Y de la gráfica, es proporcional al nivel de intensidad de luz por un factor de 100. A continuación, en la Figura 8, se puede apreciar un ciclo y medio de operación del sistema de iluminación LED.

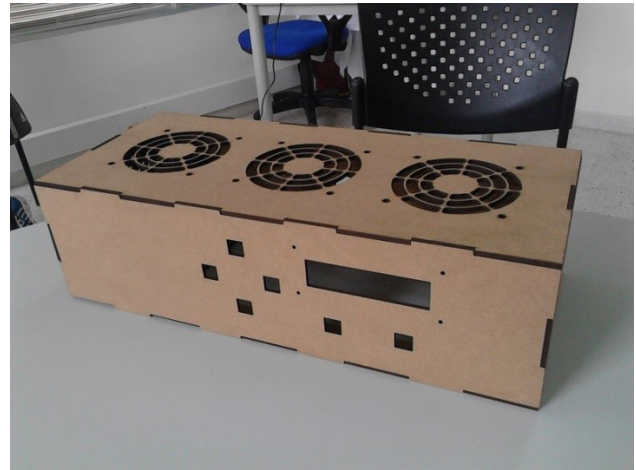


**Figura 8.** Modelo de la emulación solar.

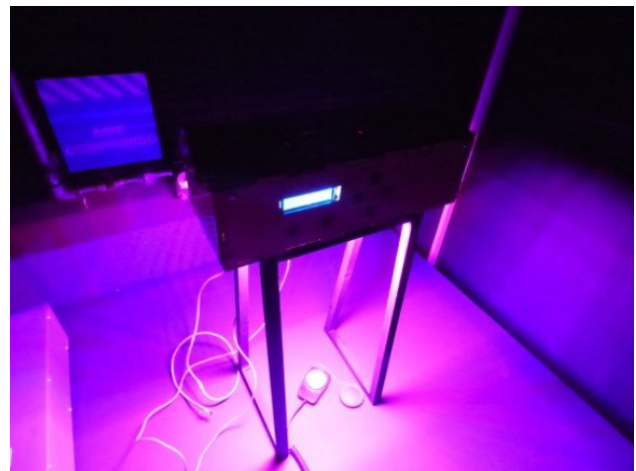
Los datos anteriormente mencionados se obtuvieron de diferentes pruebas realizadas en el Laboratorio de Física Moderna de la Universidad Autónoma de Occidente, la programación, el diseño y fabricación de las tarjetas electrónicas se realizó en la Línea de Electrónica y Telecomunicaciones del Tecnoparque SENA nodo Cali, como también el diseño y construcción de la carcasa de almacenamiento de los dispositivos en la Línea de Diseño e Ingeniería del mismo centro tecnológico (Ver Figuras 9,10,y 11).

Diseñados todos los circuitos y corroborado su buen funcionamiento, se pone en operación el sistema de control de ambiente y las luces de crecimiento en un prototipo de granja vertical construido. Este consta de un area aproximada de 0,5 m<sup>2</sup> donde se ubicarán 36 plantas dispuestas sobre tazas, malla, grava y carcarilla de arroz como sustrato, y un tanque de 40 litros para el riego y

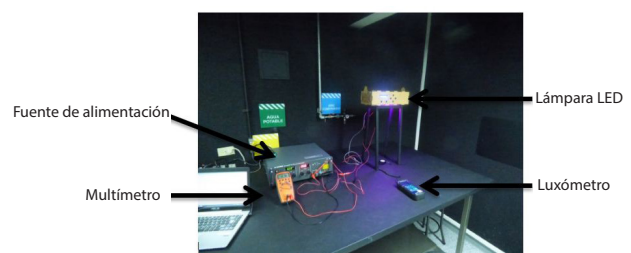
suministro de los nutrientes en los periodos de oscuridad que el sistema de iluminación posee. Este prototipo se ilustra en la Figura 12.



**Figura 9.** Carcasa para almacenar dispositivos electrónicos.



**Figura 10.** Prueba de funcionamiento del sistema LED.



**Figura 11.** Luxómetro registrando medición.





**Figura 12.** Prueba piloto sobre un prototipo de granja vertical

Durante quince días se puso a prueba el prototipo de cultivo vertical obteniendo resultados preliminares prometedores para un futuro cercano.

Se logró corroborar el crecimiento de plantas en un espacio libre de radiación solar natural, es decir un espacio donde las variables más importantes son controladas pero donde la luz natural fue reemplazada por el sistema de iluminación propuesto y diseñado.

Este funcionó de manera ininterrumpida durante 15 días con ciclos de 6 horas de luz efecto solar y 2 horas de descanso, este ciclo se repite 3 veces en el día para completar 18 horas de luz artificial y 6 horas de oscuridad. Con este desarrollo fue posible determinar la importancia que tienen los 3 parámetros de luces de crecimiento, ya que se pudo evidenciar que una baja intensidad de luz o corto fotoperiodo pueden afectar de manera considerable el desarrollo temprano de la planta. Este tipo de inconveniente afortunadamente es fácil de comprobar y de solucionar, por lo que es sumamente importante asegurarse del tiempo de exposición del cultivo a la luz y su intensidad.

## Conclusiones

El avance de la tecnología de dispositivos de estado sólido como el LED ha permitido el progreso en otras áreas antes no exploradas a fondo. La incursión de la iluminación LED para cultivos en interiores de manera contundente y no como moda sino como un cambio de paradigma eficaz se ha incrementado. Desafortunadamente, las ventajas con las que la tecnología cuenta, hacen pensar, según algunos, que esta debe ser usada indiscriminadamente, en busca de obtener beneficios a corto plazo sin la consideración necesaria del cultivo expuesto.

El sistema desarrollado pone en consideración como primera medida la salud de la planta o cultivo por lo que el sistema de iluminación no opera de manera continua y sin periodos de descanso.

La distancia a la que se ubica la lámpara puede variar de acuerdo con el tamaño, tipo de cultivo y a la intensidad de luz emitida por la misma. Así que si es posible ubicar el sistema de iluminación de tal forma que abarque toda el área de cultivo, aproximadamente 30 centímetros de este, se puede asegurar una máxima transferencia de energía luminica hacia la planta para el desarrollo del proceso fotosintético. Sin embargo, es importante señalar que la ubicación de la fuente de luz puede variar en función de lo anterior.

Para un trabajo a futuro sería conveniente aplicar otras formas de estimulación electromagnética con distintos fotoperiodos, con el fin de encontrar una mejor relación.

## Referencias

- Ahmad Nizar Harun; Nurul Najwa An ; Robiah Ahmad ; Nurul Syahirah Azmi (2013) Red and Blue LED with Pulse Lighting Control Treatment for Brassica Chinensis in Indoor Farming. Recuperado de [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.r=6735080&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D6735080](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.r=6735080&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6735080)
- BartaDJ, TibbitsTW, BulaRJ&Morrow,RC. Evaluation of light emitting diode characteristics for a space-based plant irradiation source. Adv Space Res. 1992;12:141-9.

- Caplow, T & Nelkin, J (2007). Building-integrated greenhouse systems for low energy cooling. Recuperado de [https://scholar.google.com.co/scholar?q=Building-integrated+greenhouse+systems+for+low+energy+cooling+%5Ben+1%C3%ADnea%5D,+http://ieeexplore.ieee.org/&hl=es&as\\_sdt=0&as\\_i=scholar&sa=X&ved=0ahUKEwi66t74mL\\_QAhXI7SYKHxfJAKIQgQMIGDAA](https://scholar.google.com.co/scholar?q=Building-integrated+greenhouse+systems+for+low+energy+cooling+%5Ben+1%C3%ADnea%5D,+http://ieeexplore.ieee.org/&hl=es&as_sdt=0&as_i=scholar&sa=X&ved=0ahUKEwi66t74mL_QAhXI7SYKHxfJAKIQgQMIGDAA)
- Heinrich Böll Stiftung (2009) Urban Futures 2030. Recuperado de <https://www.boell.de/de/navigation/stadtentwicklung-8301.html>.
- Macías A, H; Ramos Yesid; F. Ulianov. (2012). Estudio de los beneficios del cambio de bombillas de sodio de alta presión por diodos emisores de luz de alto brillo. El Hombre y la Máquina No. 39 • Mayo-Agosto de 2012
- MIT Technology Review. (2014). How LEDs Are Set to Revolutionize Hi-Tech Greenhouse Farming. Recuperado de : <http://www.technologyreview.com/view/528356/how-leds-are-set-to-revolutionize-hi-tech-greenhouse-farming/>
- Philips Horticulture: (2014). LED solutions. Recuperado de [http://www.lighting.philips.com/pwc\\_li/main/shared/assets/downloads/pdf/horticulture/leaflets/general-booklet-philips-led-lighting-in-horticulture-EU.pdf](http://www.lighting.philips.com/pwc_li/main/shared/assets/downloads/pdf/horticulture/leaflets/general-booklet-philips-led-lighting-in-horticulture-EU.pdf)
- Singh, Devesh; Basu, Chandrajit ; Meinhardt-Wollweber, & Bernhard Roth, Merve (2014). LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting. Recuperado de <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3016.pdf>
- Specht, Kathrin; Siebert, Rosemarie; Hartmann, Ina; Freisinger, Ulf; Sawicka, Magdalena; Werner, Armin; Thomaier, Susanne; Henckel, Dietrich; Walk, Heike; Dierich, Axel. (2014). Urban agriculture of the future: an overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agriculture & Human Values.*, Vol. 31 (1) 33-51
- Tennessen DJ, Singas EL & Sharkey TD. (1994). Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research. *Photosynth Res*, 39:85-92.
- The theory behind the concept of vertical farming . South Carolina. Recuperado de [http://media.clemson.edu/public/restoration/iae/vfarm/student\\_verticalfarming.pdf](http://media.clemson.edu/public/restoration/iae/vfarm/student_verticalfarming.pdf).
- Tongxin Shi; Yuntao Ma; Jie Wu; Xiang Li; Yan Guo; Zhaoli Xu; Yan Jin; Yuhong Yang (2012). Quantification of Light Absorption and Photosynthesis of Tobacco Canopy Using 3-D Modeling. Recuperado de [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.r=6524855&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D6524855](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.r=6524855&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6524855)
- Winter Green Research. (2014). Plant Factory / Vertical Farming Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2014-2020. Recuperado de <https://www.reportbuyer.com/product/2107872/plant-factory-vertical-farming-market-shares-strategies-and-forecasts-worldwide-2014-2020.html>
- Yeh N & Chung JP. (2009). High-brightness LEDs – energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renew Sust Energ Rev*. 13:2175–2180.