



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Implementación de un Sistema de Radiación artificial
Multiespectral tipo LED en modo pulsado y continuo para
granjas verticales y fábricas de plantas.”**

TESIS

Para Obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

PRESENTA:

Ing. Israel Alvarez Ramírez.

TUTORES:

Dr. José Ernesto Olvera González

Dra. Nivia Iracemi Escalante García

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Pabellón de Arteaga, Ags., mayo del 2021



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

Tesis:

**“Implementación de un Sistemas de Radiación artificial
Multiespectral tipo LED en modo pulsado y continuo para
granjas verticales y fábricas de plantas”**

Presenta:

Ing. Israel Alvarez Ramírez

Dirigida por:

Dr. José Ernesto Olvera González

Dra. Nivia Iracemi Escalante García

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Sinodales:

MC. José Guillermo Batista Ortiz

Dr. Sathish Kumar Kamaraj

Pabellón de Arteaga, Ags., mayo del 2021

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi hija Thaili Miranda, como muestra de amor propio y esfuerzo, que en su momento sea uno de tantos motivos e inspiraciones para que pueda llegar a realizar todas tus metas y sueños que se proponga. A mi familia y padres porque en parte es también una etapa que juntos hemos terminado, por siempre estar a mi lado y sentir apoyo y confianza en momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Al concluir otra etapa de mi vida, llena de trabajo arduo y dificultades como el desarrollo de un proyecto que es, el de tesis de posgrado, quiero extender un profundo agradecimiento a quienes estuvieron conmigo apoyándome para hacer este sueño posible, aquellos que fueron inspiración apoyo y fortaleza. Por ello, es para mí un verdadero placer utilizar este espacio para ser justo y consecuente con ellas, manifestándoles mis agradecimientos.

Agradecer a Dios más que un gesto de bondad, que siempre ha estado conmigo en todas las circunstancias en el transcurso de mi vida personal y profesional, abriendo puertas y guiándome para ser lo que hasta el día de hoy soy, logrando cada uno de mis metas, aunque no sean en su momento muy sustanciales, Dios lo valora.

Agradecer al Dr. José Ernesto Olvera González por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección, brindándome infinitamente su apoyo y confianza incondicional, no solo como en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como estudiante de este nivel, además de apoyar ideas propias, siempre enmarcadas en su orientación y rigurosidad, las cuales han sido la clave del buen trabajo que hemos realizado juntos. Le agradezco también el haberme facilitado siempre todo lo que estaba a su alcance, para poder llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis.

Quiero agradecer a la Dra. Nivia Iracemi Escalante García, principalmente por su paciencia generosidad y disponibilidad al compartir su amplio conocimiento y experiencia, ayudando a la elaboración de este proyecto, agradezco también por su apoyo incondicional en todos los ámbitos, con sus atentas y rápidas respuestas a las diferentes inquietudes suscitadas durante el desarrollo de este trabajo, las cuales se han visto reflejadas en los buenos resultados obtenidos, ¡GRACIAS DRA.!

Al M en C. José Luis Moreno Hernández Duque por brindarme su confianza y conocimiento sobre el laboratorio de análisis instrumental del cual es coordinador y poder recopilar resultados sobre mi proyecto de tesis, gracias maestro, mi afecto y gratitud ante la buena atención prestada a mi persona en mis instancias en la UAA.

A mi familia, que siempre ha estado conmigo en las buenas y en las malas apoyándome infinitamente ante cualquier adversidad gracias Dios me los Bendiga Siempre y me deje contemplaros cerca por mucho tiempo.

Mis padres Gregorio Alvarez Lugo y Silvia Ramírez Rodríguez por darme la educación y apoyo siempre, guiándome y aconsejándome de la mejor manera para llegar hasta este momento y que siempre será así, les prometo inculcar los mismos valores y todo lo que conlleva para educar a mi hija y se sigan sintiendo orgullosos de mí.

Mis Hermanos Eduardo Yovani, Silvia Esveydi, Néstor Eliasim, por siempre estar apoyándome, espero ser un ejemplo para ustedes y que se sientan orgullosos de su hermano mayor. También a mi amigo Martín García Zavala y familia por el apoyo y aprecio que en este tiempo que tenemos de conocernos me has dado, gracias por todo, considérate un hermano más.

Para mis maestros de posgrado y compañeros de grupo de posgrado, agradecer los momentos buenos y malos que pasamos, tanto en la institución como fuera de ella, es grato para mí el reconocer el apoyo brindado en mis deficiencias y vida personal, además de brindarles el apoyo incondicional, les deseo lo mejor en el transcurso de su vida, no dejando de lado la posibilidad de volvernos a encantararnos en otra experiencia de esta magnitud o de mayor peso, gracias por todo, deseándoles lo mejor siempre.

Finalmente agradecer a el director Humberto Ambriz Delgadillo del Instituto tecnológico de Pabellón de Arteaga y todo el personal, por abrirme las puertas incondicionales para poder desarrollar mi tesis en sus diferentes áreas de trabajo ante cualquier horario y poder concluir con lo esperado, a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por brindarme su confianza para realizar parte de experimentos relacionados con mi tesis, agradeciendo también al departamento de Recursos Materiales y Servicios por el apoyo y confianza infinita ante cualquier petición, ayudando en gran parte para poder realizar mi proyecto.



Pabellón de Arteaga, Ags.,

3/mayo/2021

MES. EDGAR ZACARÍAS MORENO
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

PRESENTE

Por medio del presente doy el visto bueno a la Tesis de Maestría titulada **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RADIACIÓN ARTIFICIAL MULTIESPECTRAL TIPO LED EN MODO PULSADO Y CONTINUO PARA GRANJAS VERTICALES Y FABRICAS DE PLANTAS”** del estudiante **ISRAEL ÁLVAREZ RAMÍREZ** con numero de control M121050120 de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y el estudiante ya realizo los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®

DR. JOSÉ ERNESTO OLVERA GONZÁLEZ
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

DRA. NIVIA IRACEMI ESCALANTE GARCÍA
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



Pabellón de Arteaga, Ags.,

4/mayo/2021

ING. ISRAEL ÁLVAREZ RAMÍREZ
ESTUDIANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
NO. DE CONTROL M121050120

PRESENTE

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de Tesis titulado: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RADIACIÓN ARTIFICIAL MULTIESPECTRAL TIPO LED EN MODO PULSADO Y CONTINUO PARA GRANJAS VERTICALES Y FABRICAS DE PLANTAS”**, hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su examen de grado.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®

MES. EDGAR ZACARÍAS MORENO
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



RESUMEN

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMAS DE RADIACIÓN ARTIFICIAL MULTIESPECTRAL TIPO LED EN MODO PULSADO Y CONTINUO PARA GRANJAS VERTICALES Y FÁBRICAS DE PLANTAS

Por: ING. ISRAEL ALVAREZ RAMÍREZ

La radiación artificial con tecnología LED permite implementar nuevos métodos de producción realizando diferentes estudios sobre los efectos que se tienen en el crecimiento de las plantas al variar la calidad e intensidad de la luz. En la literatura se reportan diferentes estrategias para el ahorro de energía en Sistemas de Producción de Planta Cerrada (CPPS). Sin embargo, no existen evidencias confiables sobre el consumo de energía con el uso de la técnica de luz LED pulsada en el sistema de iluminación disponible en Fábricas de Plantas y Granjas Verticales. Este trabajo impulsó diversos experimentos sobre la aplicación de diferentes estrategias de luz LED en modo de operación pulsado y continuo para el crecimiento y desarrollo de diferentes cultivos (Microgreens de lechuga, plantas de chile serrano, lenteja). Esta propuesta es de reciente creación dado que en ningún artículo publicado que aplican luz pulsada consideran el ahorro energético. De acuerdo a los resultados obtenidos es crucial establecer una adecuada equivalencia de energía entre ambos modos de operación de la luz para garantizar que la misma irradiación llegue a los cultivos y pueda ser cuantificables sus efectos. Los resultados pueden ser una guía útil para aplicaciones de la vida real en Sistemas de Plantas de Producción Cerrada (Closed Plant Production System, por sus siglas en inglés).

Dirigido por:

Dr. José Ernesto Olvera González

Dra. Nivia Iracemi Escalante García

Dr. José Alonso Dena Aguilar

ÍNDICE GENERAL

I.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2.- OBJETIVOS.	3
1.2.1.- Objetivo General	3
1.2.2.- Objetivos Específicos.	4
1.3.- JUSTIFICACIÓN.	4
II.- MARCO TEÓRICO	5
2.1 CONCEPTOS DE LUZ.....	5
2.2.- ÓPTICA GEOMÉTRICA.	6
2.2.1.- Unidades.	6
2.2.2.- Medidas.....	6
2.2.3.- Intensidad Lumínica (Candela –I–).	6
2.2.4.- Flujo luminoso (Lumen –F–).....	7
2.2.5.- Nivel de Iluminación (Lux –E–).....	7
2.2.6.- Luminancia.	8
2.2.7.- Brillo.....	8
2.2.8.- Ángulo Sólido.	9
2.3.- ÓPTICA FÍSICA.....	9
2.3.1.-Cantidad de la Luz.	9
2.3.2.- Micro Moles (μmol).	10
2.3.3.- Energía de Fotón.	10
2.3.4.- Caracterización de los Sistemas de Luz.	11
2.3.4.1.- Caracterización de la Luz con el Espectrofotómetro.	11
2.3.5.- Instrumentación Óptica.....	12
2.3.5.1.- Espectro Radiómetro.....	13
2.3.5.2.- Quantum.	14
2.3.5.3.- Luxómetro.	16
2.3.6.- Tipos de Radiación.	17
2.3.6.1.- Radiaciones Ionizantes.	18
2.3.6.1.1.- Alfa.	18
2.3.6.1.2.- Beta.....	18
2.3.6.1.3.- Gamma.	19
2.3.6.2.- Radiaciones No Ionizantes.	19
2.3.6.2.1.- Ultravioletas.....	19
2.3.6.2.1.- Radiación UV–A.	19
2.3.6.2.2.- Radiación UV –B.	19
2.3.6.2.3.- Radiación UV-C.....	19

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

2.3.6.3.- Infrarrojos.....	20
2.3.6.4.- Electromagnéticas.....	20
2.3.7.- Sistemas de Radiación Artificial Comerciales.....	20
2.3.7.1.- Lámparas Incandescentes.....	20
2.3.7.2.- Lámparas Mixtas.....	21
2.3.7.3.-Lámparas Fluorescentes.....	21
2.3.7.4.- Lámparas de Halogenuros Metálicos (MH).....	22
2.3.7.5.- Lámparas de Alta Presión de Sodio o (HPS).....	22
2.3.7.6.- Lámparas LEDs.....	23
2.3.8.- Aplicaciones Agroindustriales.....	23
2.3.8.1.-Monitoreo de Consumo de Energía en CPPS.....	26
2.3.8.2.- Luz LED Modo Pulsado en Plantas.....	28
III.- METODOLOGÍA.....	31
3.1.- CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE RADIACIÓN ARTIFICIAL TIPO LED.....	31
3.2.- INSTALACIÓN DE LÁMPARAS LED EN RACK DE EXPERIMENTOS.....	31
3.3.- DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA OPERACIÓN DE LUZ (MODO PULSADO Y MODO CONTINUO) EN LÁMPARAS TIPO LED DE MANERA AUTOMÁTICA.....	33
3.3.1.-Luz Pulsada y Continua.....	34
3.3.2.- Monitoreo de la Temperatura en el Sistema de Radiación Artificial tipo Led a Través de la ConFiguración de las Recetas de Luz.....	34
3.4.- CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE RADIACIÓN ARTIFICIAL PARA EL CULTIVO DE MICROGREENS.....	35
3.4.1- Esterilización y Preparación de la Semilla.....	35
3.4.2.- Tratamientos de Radiación Artificial tipo LED.....	36
3.4.3.- Crecimiento y Desarrollo del Cultivo de Microgreens a Través del Tiempo.....	37
3.5.- MEDICIÓN DE NUTRIENTES.....	38
3.5.1.- Clorofila.....	38
3.5.2.- Humedad.....	38
3.5.3.- Vitamina C.....	38
3.6.- MEDICIÓN DE METALES PESADOS.....	39
3.6.1.- Hierro.....	39
3.6.2.- Magnesio.....	39
3.7.- MONTAJE DEL SISTEMA HIDROPÓNICO PARA CULTIVO DE LENTEJA.....	40
3.7.1- Esterilización del Material Vegetal.....	40
3.7.2.- Establecimiento para Tratamientos de Radiación Artificial tipo LED.....	40
3.8.- SOLUCIONES PARA CULTIVO HIDROPÓNICO DE LENTEJA.....	41
3.9.- CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS.....	42

3.9.1.- Determinación de Humedad.	42
3.9.2.- Determinación de Fe y Mg.	42
3.9.3.-Radiación Led Pulsada como una Técnica Alternativa de Ahorro de Energía para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas.....	43
3.10.- LUZ PULSADA Y CONTINUA EN LA EVALUACIÓN DEL ϕ PSII.....	44
3.10.1.- Tratamientos de luz LED (Luz Pulsada y Continua).	44
3.10.2.- Medición de la Eficiencia Fotoquímica del Fotosistema II (ϕ PSII).....	45
3.11.- EFECTO EN EL CONSUMO DE ENERGÍA DE LA LUZ LED CONTINUA Y PULSADA.	45
IV.- RESULTADOS	47
4.1.- MONITOREO DE TEMPERATURA LAS LÁMPARAS DE ILUMINACIÓN LED.....	47
4.2.- EVALUACIÓN DE CRECIMIENTO DE CULTIVOS DE MICROGREENS A TRAVÉS DEL TIEMPO.	48
4.2.1.- Medición de Clorofilas.	49
4.2.2.- Medición de Humedad.....	50
4.2.3.- Determinación de Hierro (Fe) y Magnesio (Mg).	51
4.2.4.- Hierro.....	51
4.2.5.- Magnesio.....	52
4.3.- RESULTADOS DE CULTIVO HIDROPÓNICO.	53
4.3.1.- Crecimiento de las Semillas de Lenteja.	53
4.4.- CULTIVO TRATAMIENTO CON AGUA.	57
4.4.1.- Medición Humedad.....	57
4.4.2.- Medición de Peso con Técnica de Liofilizado.	58
4.5.- RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE METALES PESADOS.....	58
4.5.1.- Para el Tratamiento de Agua.....	58
4.5.2.- Hierro.....	59
4.5.3.- Magnesio.....	59
4.5.1.- Clorofilas.	59
4.6.- Procedimiento para Monitoreo de Energía.....	60
V.- CONCLUSIONES.....	67
VI.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
Anexo 1	76
RADIACIÓN ARTIFICIAL EN PLANTAS DE ESTEVIA: EFECTO DE LOS COLORES E INTENSIDADES CON TECNOLOGÍA LED.	76
Anexo 2	77

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

SISTEMA DE RADIACIÓN ARTIFICIAL ADAPTABLE Y MULTIESPECTRAL CON TECNOLOGÍA LED PARA GRANJAS VERTICALES (VERTICAL FARMING) Y FÁBRICA DE PLANTAS (PLANT FACTORY).....	77
Anexo 3	78
REPORTE TÉCNICO DEL SISTEMA MECATRÓNICO PARA LA DESINFECCIÓN DE PRODUCTOS AGROALIMENTARIOS CON LUZ UV-A LED.	78
Anexo 4	79
SISTEMA MECATRÓNICO SEMI-INDUSTRIAL PARA DESINFECCIÓN DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES POR MEDIO DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA A, B Y C CON TECNOLOGÍA LED.	79
Anexo 5	80
Introducción al diseño de sistemas de control para procesos industriales por medio de LabVIEW. .	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Espectro electromagnético: Rayos X onda larga luz visible y rayos ultravioleta onda corta [34].	5
Figura 2.- flujo luminoso tipo candela.[41].	7
Figura 3.- Flujo luminoso en modo lumen [41].	7
Figura 4.- Flujo luminoso en modo lux[41].	8
Figura 5.- Fujo luminoso en modo luminancia [47].	8
Figura 6.- Caracterización de la luz con espectrofotómetro [63].	12
Figura 7.- Instrumentación óptica.	13
Figura 8.- Espectroradiómetro [68].	14
Figura 9.- Instrumento tipo Quantum [70].	15
Figura 10.- Medición de la luz [72].	16
Figura 11.- Luxómetro [76].	17
Figura 12.- Tipos de radiación artificial [79].	18
Figura 13.- Lámparas incandescentes [93].	21
Figura 14.- Lámparas mixtas [95].	21
Figura 15.- Lámparas fluorescentes [97].	22
Figura 16.- Lámparas de halogenuros metálicos [100].	22
Figura 17.- Lámparas de alta presión de sodio [100].	23
Figura 18.- Instalación del sistema de iluminación dentro de la cámara de crecimiento.	32
Figura 19.- Instrumento para sujeción de lámparas.	33
Figura 20.- Panel frontal de programación.	33
Figura 21.- Señal pulsada y continua.	34
Figura 22.- Espacio de siembra de Microgreens.	35
Figura 23.- Preparación de cultivo de Microgreens.	35
Figura 24.- Sistema de iluminación artificial.	37
Figura 25.- Sistema hidropónico con un sistema de iluminación artificial tipo LED. a) ConFiguración de variables para el sistema de iluminación artificial. b) Rack hidropónico con 4 calidades de luz.	40
Figura 26.- Sistema hidropónico con un sistema de iluminación artificial tipo LED. a) ConFiguración de variables para el sistema de iluminación artificial. b) Rack hidropónico con 4 calidades de luz.	41
Figura 27.- ConFiguración experimental, a) Tratamiento de luz LED b) Esquema general del experimento c) Secuencia de las medidas	43
Figura 28.- Tratamientos de luz LED. (a) Blanco. (b) Rojo–Azul (50-50%).	44
Figura 29.- Se muestran 2 lámparas de 20 watts para cada tipo de luz trabajando en condiciones específicas en un periodo de 60 minutos.	47
Figura 30.- Desarrollo y crecimiento de Microgreens de lechuga.	48

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

Figura 31.- Segunda repetición de contenido de clorofila por tratamiento a los 33 días de cultivo. a)	
Cuantificación de clorofila por el Método 1. b) Evaluación de clorofila Método 2.	49
Figura 32.- Contenido de clorofila por tratamiento a los 33 días de cultivo. a) Cuantificación de clorofila por el Método 1. b) Evaluación de clorofila Método	49
Figura 33.- Segunda repetición de contenido de clorofila por tratamiento a los 33 días de cultivo. a)	
Cuantificación de clorofila por el Método 1. b) Evaluación de clorofila Método	50
Figura 34.- Resultados sobre crecimiento de lenteja en hidroponía.....	53
Figura 15.- Resultados sobre el crecimiento de lenteja en los diferentes tratamientos de luz.....	54
Figura 36.- Medición de tallo durante el transcurso del tratamiento.....	55
Figura 37.- Características Físicas de los Cultivos. (a) Luz LED Blanca. (b) Luz LED Roja.	
(c) Luz LED Azul. (d) Luz LED Verde.....	56
Figura 38.- Medición de humedad en los diferentes colores (blanco, rojo azul y verde).....	57
Figura 39.- Medición de peso (en los diferentes colores).....	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Representación de conversión sobre diferentes longitudes de onda.....	11
Tabla 2.- Características de sistemas de iluminación.....	31
Tabla 3.- Configuración de tratamientos con semillas de lenteja a diferentes condiciones de luz.....	41
Tabla 4.- Porcentaje de humedad por cada tratamiento de luz pulsada y continua.....	50
Tabla 5.- Cantidad de hierro por tratamiento a los 23 días.....	51
Tabla 6.- Resultados obtenidos de contenido de Hierro (Fe) a los 33 días.....	52
Tabla 7.- Medición de Mg en Microgreens de lechuga.....	52
Tabla 8.- Cantidad obtenida de Magnesio para el segundo corte (Mg), 33 días.....	53
Tabla 9.- Resultados sobre hierro.....	59
Tabla 10.- Resultados sobre magnesio.....	59
Tabla 11.- Técnicas sobre lectura de clorofila en diferentes colores.....	59
Tabla 12.- Consumo de energía por dos lámparas en modo pulsado y continuo.....	61

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

I.- INTRODUCCIÓN

La agricultura tiene una importancia fundamental para los países en desarrollo dado que el buen funcionamiento del sector agrícola es esencial para garantizar la seguridad alimentaria. Enfrentándose a múltiples retos (cambios climáticos, el aumento de población, la competencia del uso de la tierra para el desarrollo y crecimiento de las plantas) [1]. A consecuencia de estos fenómenos presentados, es de vital importancia adoptar métodos de producción más eficaces, sostenibles y con el uso de tecnología. Por esta razón, se ha optado por invernaderos y áreas estacionarias que cuenten con diferentes tipos de acondicionamientos. Un ejemplo, son los sistemas de iluminación artificial, dado que permite simular la luz del sol para que se pueda llevar a cabo la fotosíntesis [2] generando más alimentos y fibras a fin de alimentar a una población creciente; de producción en fresco como materia prima en el sector agroindustrial [3].

La utilización de tecnología LED ha permitido implementar nuevos procesos y metodologías de producción realizando diferentes estudios sobre los efectos que se tienen en el crecimiento de las plantas al variar la cantidad y calidad de luz; presentado diversas ventajas (son energéticamente más eficientes, luz monocromática de buena calidad, vida útil muy larga, por mencionar algunas) [4] respecto a otras (Fluorescentes luz azul y roja con la desventaja de espectro e intensidad por poco tiempo, y las lámparas de descarga de alta intensidad (HID) de haluro metálico y de sodio que presentan requerimientos de energía elevados; además, de temperatura operativa alta [5].

De igual forma, se ha demostrado que las lámparas LED son una fuente de iluminación versátil para cultivar plantas en sistemas agrícolas con entornos controlados, como iluminación suplementaria para invernaderos [6], reemplazo de la luz solar en cámaras de crecimiento, cuartos de crecimiento, granjas verticales [7], producción de cultivos en el espacio [8], y fábricas de plantas[8, 9]. Además, la iluminación LED ha mejorado la vida útil y la calidad nutricional de los productos hortícolas a un menor costo[11], dado que los tratamientos correctos pueden aumentar la concentración de metabolitos importantes como vitaminas o compuestos con propiedades farmacológicas [12]. Para abordar el potencial de los tratamientos con LED como fuente de luz, se han realizado diferentes estudios en frutas y verduras, entre ellos: lechuga, tomate, espinaca, pepino, patata y rábanos [12, 13].

Generalmente, las lámparas LED están programadas para producir luz continua a plantas en entornos controlados [14, 15]; pero también se pueden ajustar para producir luz pulsada. Las lámparas LED tienen la capacidad de parpadear o parpadear en períodos cortos de tiempo en los que la emisión de la lámpara se enciende y apaga a intervalos rápidos (μ s) produciendo luz pulsada con alta intensidad y menor consumo de energía [17]. Varios trabajos han demostrado las ventajas de los tratamientos con luz LED pulsada aplicados a diversas variedades de plantas. De igual forma, este tipo de tecnología puede aplicarse en sistemas hidropónicos dado que el crecimiento se conduce por medio de soluciones de agua, donde la tierra no es utilizada. Este tipo de técnica se utiliza en áreas

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

o lugares donde las tierras son pobres, es decir que no pueden sostener la agricultura por diferentes factores (rápida sobrepoblación e industrialización, impacto de calentamiento global, entre otros [18]. Al mismo, tiempo se pueden producir plantas de tipo herbáceo sin dejar de lado las necesidades principales de las plantas (temperatura, agua, luz, nutrientes, por mencionar algunos).

Un dato interesante dentro de los CPPS y que se ha considerado como un reto es el consumo de energía. Dado que, la energía gastada por las fuentes de luz artificial en sistemas cerrados de producción de plantas (CPPS), como invernaderos, granjas verticales, fábricas de plantas o incluso para sistemas de crecimiento de plantas, el espacio exterior [18, 19] contribuye a aproximadamente el 30% del costo total de producción [21]. Por lo tanto, reducir el costo de energía en los sistemas de iluminación en CPPS junto con la fabricación de dispositivos de iluminación eficientes, son los desafíos para el futuro cercano [22]. Un estudio anterior estimó que se utilizaron $3500 \text{ kW y}^{-1}\text{m}^2$ de energía para cultivar lechugas en una granja vertical con un sistema de luz artificial en el Reino Unido [23]. En CPPS se han evaluado varias fuentes de luz de lámparas incandescentes, lámparas de sodio de alta presión [24]. Existen diferentes métodos y software que permiten desarrollar programas de control para ajustar variables de una señal digital, pero en su defecto se busca que el control sea sumamente preciso para generar un acondicionamiento de una señal digital; por ejemplo: frecuencia que nos permite ver cuántas veces se presenta una señal en determinado tiempo y ciclo de trabajo que representa el estado activo de la señal, estas dos variables ayudan a tener el control de una señal digital pulsada (cuadrada) [25].

Por lo anterior esta investigación busca la aplicación de diferentes estrategias de luz LED en modo de operación pulsado y continuo para el crecimiento y desarrollo de diferentes cultivos (Microgreens de lechuga, plantas de chile serrano, lenteja) [26, 27]. Además, evaluar diferentes recetas de luz extraídas de la literatura para ser aplicadas con luz LED pulsada y medir el consumo de energía para demostrar el potencial de la luz LED pulsada como técnica de ahorro de energía sin efecto negativo en plantas. Esta propuesta es de reciente creación dado que en ningún artículo publicado que aplican luz pulsada consideran el ahorro energético [28].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de tecnologías de iluminación de estado sólido llamados LEDs (diodos emisores de luz) en investigaciones agronómicas y agroindustriales, relacionadas con la producción de plantas han permitido aclarar muchas respuestas fisiológicas y morfológicas que tienen las plantas verdes con respecto a la calidad (colores) y cantidad de luz (intensidades). El uso de esta tecnología también ha permitido desarrollar nuevos procesos y metodologías de producción en cultivos intensivos hortícolas, logrando optimizar recurso tales como: agua, energía y nutrientes para obtener mayor producción por metro cuadrado de superficie con mayor calidad y en menor tiempo. El contexto mencionado anteriormente, explica claramente el potencial productivo y económico que tienen los sistemas artificiales de producción de plantas hortalizas en el mundo. Las granjas verticales (vertical farms) y fábricas de plantas (plant factory) son ejemplos claros del potencial comercial que tienen estas tecnologías, incrementando el espacio de producción, aplicando luz artificial como detonante de la fotosíntesis y clima artificial proveniente del aire acondicionado y calefacción. En décadas anteriores, los efectos de los colores en el crecimiento y desarrollo de las plantas fueron ampliamente estudiados, generando información importante como el efecto de la luz azul para incrementar el área foliar y el color rojo para incrementar la altura de las plantas, considerando que el color rojo es el principal promotor de la fotosíntesis. Por lo anterior, las lámparas comerciales para este tipo de aplicaciones contienen los colores rojo y azul. Sin embargo, en investigaciones recientes el uso de los colores amarillo y verde en diferentes cantidades ha generado la necesidad de integrar en el sistema de radiación artificial el espectro completo de la luz visible (todos los colores del arcoíris). Actualmente existen sistemas comerciales para crecimiento de plantas (ninguno mexicano) que emiten todos los colores, sin embargo, si se requiere modificar las intensidades de cada color, no es posible con los comerciales. La manipulación de variables de luz tales como: selección de color, selección de intensidad de cada color y pulsar la luz (on/off) resulta una ventaja muy importante en los procesos de optimización de crecimiento para producción.

1.2.- OBJETIVOS.

1.2.1.- Objetivo General.

Configurar e implementar sistemas de radiación artificial tipo LED multiespectral en granjas verticales y fábricas de plantas generado una herramienta de laboratorio que permita controlar la cantidad y calidad de luz en diferentes plantas o cultivos (hidropónicos, con sustrato, así como, lechuga, lenteja, entre otros), además de la emisión de la luz en modo continuo y pulsado para evaluar el consumo energético y contenido nutricional en las plantas.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

1.2.2.- Objetivos Específicos.

1. Instalar los sistemas de radiación artificial multiespectral tipo LED en racks comerciales.
2. ConFigurar recetas de luz en los sistemas de iluminación para el crecimiento y desarrollo de diferentes cultivos (microgreens, lechuga, lentejas, entre otros) en modo continuo y pulsado.
3. Desarrollar una estrategia para evaluar el consumo de energía en los modos de operación de luz pulsada.
4. Evaluar la concentración de nutrientes (Clorofila, Fe y Mg) en base a los efectos de tratamientos (recetas de luz) generados en luz pulsada y continua.

1.3.- JUSTIFICACIÓN.

La agricultura tiene una importancia fundamental para los países en desarrollo dado que el buen funcionamiento del sector agrícola es esencial para garantizar la seguridad alimentaria. Enfrentándose a múltiples retos (cambios climáticos, el aumento de población, la competencia del uso de la tierra para el desarrollo y crecimiento de las plantas entre otros.) [29]. A consecuencia de estos fenómenos presentados se ha optado por la utilización de la tecnología LED ya que es una alternativa sostenible para la producción de alimentos, debido a que la luz es una fuente indispensable de energía para la fotosíntesis e interviene en el crecimiento y desarrollo de la planta [30]. Es de vital importancia adoptar métodos de producción más eficaces, sostenibles y con el uso de tecnología, se han implementado invernaderos y cámaras de crecimiento, que permiten el cultivo de alimentos en condiciones controladas (luz y temperatura). Debido a esto, radica la importancia de controlar el factor luz en los cultivos en cámaras de crecimiento con ambientes controlados [31]. El tipo y la cantidad de radiación disponible determinan diversos procesos fisiológicos, morfogenéticos y reproductivos de las plantas [32]. Obteniendo de esta manera una mayor cantidad de alimento por la optimización del ciclo productivo. Ya que se establece en espacios reducidos de manera eficiente para el cultivo de cualquier tipo de plantas en cualquier época del año, dado que la mayor parte de la superficie cultivable del planeta está en uso.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

II.- MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS DE LUZ.

La luz es una forma de radiación electromagnética, un tipo de energía que viaja en ondas y nos permite iluminar cualquier objeto, por ejemplo: estrellas como nuestro sol, llamas de velas, bombillas, seres vivos como insectos luminosos, por mencionar algunos. Que nos permiten visualizar o iluminar lugares con ausencia de luz (obscuridad) de las cuales son denominadas como naturales o artificiales. Pero desde un punto de vista estricto sólo hay un tipo de luz, dado que cuando hablamos de luz únicamente nos referimos a luz visible la que nuestros ojos pueden percibir, pero en realidad luz es todo tipo de energía que desprenden los electrones externos de los átomos cuando caen a orbitas inferiores dado que es un mismo y único fenómeno energía que se desplaza por el espacio (o por la materia) en forma de ondas electromagnéticas [33]. La Figura 1 muestra el espectro electromagnético, es decir, el conjunto de los tipos de radiación.

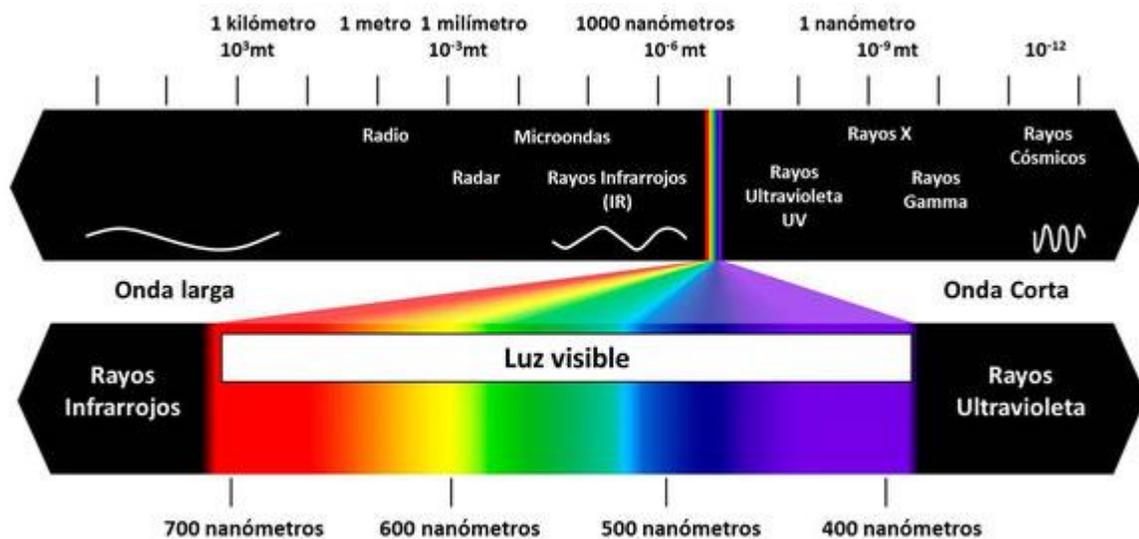


Figura 1.- Espectro electromagnético: Rayos X onda larga luz visible y rayos ultravioleta onda corta [34].

La luz puede ayudar a generar otros fenómenos, uno de ellos es la fotosíntesis la cual tiene un lugar único en la historia de la ciencia de las plantas, donde se han establecido conceptos centrales y detallados como las mediciones de eficiencia fotosintética (rendimiento cuántico) a diferentes longitudes de ondas de la luz [35].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

2.2.- ÓPTICA GEOMÉTRICA.

Estudia los fenómenos para los cuales es irrelevante la naturaleza de la luz; por lo general describe la propagación de la luz a través de los materiales o del vacío. Todos los materiales donde se puede propagar la luz se le llaman transparentes, de ser lo contrario se denominan opacos, por lo tanto, en la óptica geométrica se hace una descripción de la propagación de la luz, de la cual se parte de unas hipótesis o suposiciones sencillas. [36]

2.2.1.- Unidades.

La luz no es una cantidad física, por lo tanto, no se puede medir. Pero incluye varias características físicas como la longitud de onda, velocidad, intensidad, amplitud, frecuencia, por mencionar algunas. Siendo aspectos que pueden ser medibles, por lo tanto, la unidad de luz puede ser cuantificada a través de ellos [37].

2.2.2.- Medidas.

Existe una división entre las magnitudes que son utilizadas para cuantificar la luz se pueden clasificar por su calidad, su intensidad y su color. Siguiendo la calidad, la temperatura del color de una fuente luminosa y su unidad los grados Kelvin [38]. Respecto a la intensidad son considerados cuatro aspectos básicos: la energía de las fuentes luminosas (unidad= Talbot), la intensidad de la luz incidente sobre el sujeto que se conoce como iluminación (unidad= Lux), la intensidad de la luz reflejada sobre un sujeto que se conoce como luminancia (su unidad es el Nit) y la emisión de la energía total o recibida denominada como flujo (unidad = Lumen). Mientras que el color sería la longitud de onda de la radiación electromagnética y su unidad cualquier unidad de longitud útil, regularmente las unidades que se utilizan son el Angstrom (Å) o nanómetro. Existen diversas unidades diferentes para medir la luz y puede resultar muy complicado [39]. En la siguiente sección se describen algunos términos de medición utilizados comúnmente.

2.2.3.- Intensidad Lumínica (Candela –I–).

Es la intensidad luminosa de una fuente de luz en un punto específico, también llamada vela, así mismo, la intensidad de la radiación en una dirección perpendicular de una superficie de $1/600000 \text{ m}^2$ de un cuerpo negro a la temperatura de solidificación del platino ($2045 \text{ }^\circ\text{K}$ o $1772 \text{ }^\circ\text{C}$) bajo una presión de $101,325 \text{ N/m}^2$ como se puede observar en la Figura 2 [40].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

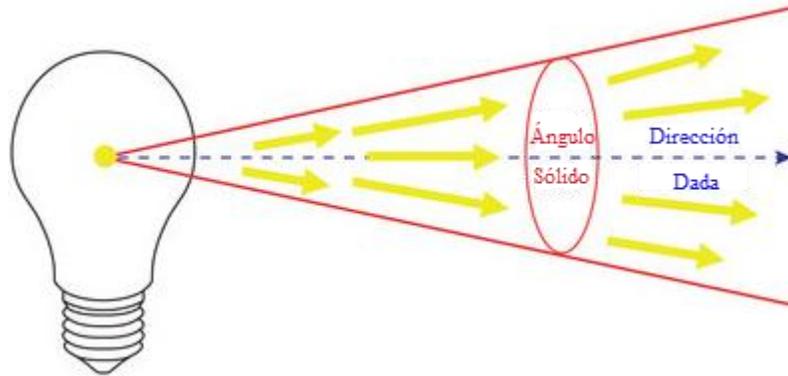


Figura 2.- flujo luminoso tipo vela.[41].

2.2.4.- Flujo Luminoso (Lumen –F–).

Unidad flujo luminoso o flujo, la salida de luces artificiales se puede medir en lúmenes, la Figura 3 representa el flujo luminoso [42].

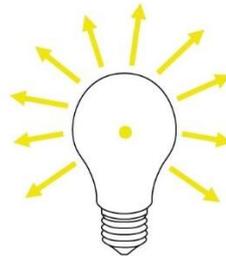


Figura 3.-Flujo luminoso en modo lumen [41].

2.2.5.- Nivel de Iluminación (Lux –E–).

Unidad de iluminación igual a un lumen por metro cuadrado, el equivalente métrico de las velas de pie (un lux equivalente a 0.0929 velas de pie). También es llamado metro-vela. La dirección de iluminación se mide por medio de lux [43], en la Figura 4 se muestra el modo lux.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
 para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

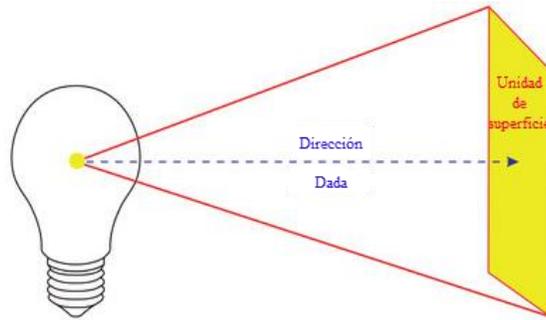


Figura 4.- Flujo luminoso en modo lux[41].

2.2.6.- Luminancia.

Se le conoce de este manera a la cantidad de luz que incide en una superficie y que es reflejada, la cual permite que sean visibles los objetos ante el ojo humano [44]. La luminancia depende de la iluminación dada por el objeto y sus propiedades de reflexión, pero también de su área proyectada en un plano perpendicular al plano de vista [45]. La definición será la misma, por lo tanto a luminancia se determina entre la intensidad luminosa y la superficie aparente vista por el ojo en una dirección determinada, su simbología es (L) y su unidad es la cd/m^2 [46].

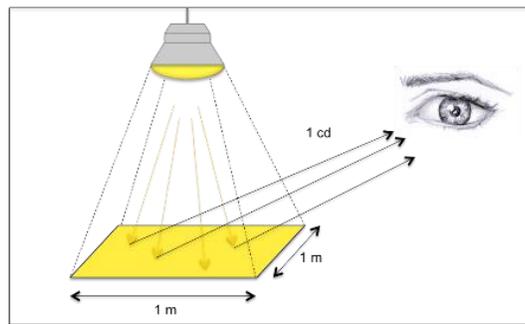


Figura 5.- Flujo luminoso en modo luminancia [47].

2.2.7.- Brillo.

El brillo constituye en un factor de visibilidad y depende de la intensidad de luz que recibe de la proporción que es reflejada. El brillo o claridad tiene que ver con la cantidad de luz que se recibe y refleja, esta “Es una magnitud perceptual asociada al nivel de la intensidad que emite una fuente de luz, o a la proporción de la luz incidente que es reflejada en el caso de objetos” [48]. Y que en este caso permite clasificar al color en lo que se llama una escala de grises neutros, que va desde el negro con valor 0, hasta el blanco con valor 10. En la interacción que hay entre

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

la luz y el color del objeto se da un efecto paradójico cuando existe un exceso de luz, ya que al ser este una luz blanca o real, con su intensidad y fortaleza tiende a devorar el color de los objetos [49].

2.2.8.- Ángulo Sólido.

Al considerar una fuente que emite una determinada energía radiante y que lo realice en todas sus direcciones podemos deducir que esta como una esfera, el ángulo sólido determinará un cono que abarca la superficie o área (S) determinada, con relación al radio unidad [50]. Por lo tanto, en estas condiciones la medida en estereorradianes del ángulo sólido W es definido por la ecuación (1):

$$W = \frac{S}{r^2} \text{ como el área de una esfera,}$$

donde, $\frac{4 \times \pi \times r^2}{r^2} = 4 \times \pi$ estereorradianes.

2.3.- ÓPTICA FÍSICA.

La óptica ondulatoria (física) es aquella que considera la luz como una onda propagándose en el espacio y explica algunos fenómenos que no se podrían explicar tomando a luz como un rayo: estos fenómenos son interferencia, difracción y polarización [51].

2.3.1.-Cantidad de la Luz.

La podemos definir como una de las formas de energía electromagnética que se encuentra en nuestra naturaleza, la cual presenta una longitud de onda muy corta, sus unidades de medida deben de ser especiales, siendo la más frecuente el Angstrom (A) que es la diezmillonésima parte de un milímetro [52]. La luz es una energía radiante, de forma electromagnética similar al calor radiación, son ondas de radio o rayos X, se puede propagar tanto en el vacío como en medios materiales, su velocidad de propagación es de 300.00 Km por segundo en vacío, en el que se está realizando la propagación [53].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

2.3.2.- Micro Moles (μmol).

Por lo tanto, para medir resta radiación se requiere emplear un sensor cuántico, el cual tiene una respuesta uniforme en la región de longitud de onda de 400 a 700 nm, las unidades típicas del sensor cuántico incluyen el fotón $\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ (densidad de flujo de fotones), el microeinstein $\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ (densidad de flujo de fotones) y el micromol $\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ (densidad de flujo de fotones) [54]. Este último es el más empleado en los sensores cuánticos comerciales, se usará la unidad de medida mol para designar el número de fotones de Avogadro, por lo general la cantidad de fotones en un mol es igual a la cantidad de fotones en un Einstein y eso es igual a $1 \text{ Einstein} = 1 \text{ mol} = 6.02 \times 10^{23}$ fotones. La radiación fotosintéticamente activa se define como la radiación existente en el espectro de 400 a 700 nm. El PPF o flujo fotónico fotosintético se enfoca en la medición de la cantidad de PAR producida por un sistema de iluminación cada segundo, La cual se realiza utilizando un instrumento especializado llamado esfera integradora que capta y mide esencialmente todos los fotones emitidos por un sistema de iluminación. La unidad que se utiliza para expresar PPF es micro moles por segundo ($\mu\text{mol/s}$), se debe tener en cuenta que el PPF indica cuanta de la luz emitida aterriza realmente en las plantas[55].

Le PPFD o densidad de flujo de fotones fotosintéticos mide la cantidad de PAR que realmente llega a la planta, el número de fotones activos que llegan a una superficie dada cada segundo, se considera una medición "spot" o directa de una ubicación específica en el punto más alto de la planta el cual se mide en micro moles por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) [56].

2.3.3.- Energía de Fotón.

Fotón (cuántico de luz), definido como un diminuto paquete de energía de radiación electromagnética. El concepto se originó (1905) en la explicación de Albert Einstein del efecto fotoeléctrico, en el que propuso la existencia de paquetes de energía discretos durante la transmisión de la luz. Anteriormente (1900), el físico alemán Max Planck había preparado el camino para el concepto al explicar que la radiación de calor se emite y se absorbe en distintas unidades o cuantos. El término entró en uso general después de que el físico estadounidense Arthur H. Compton demostró (1923) la naturaleza corpuscular de la radiografía. Fotón (del griego phōs , phōtos , "luz"), sin embargo, no se utilizó hasta 1926 [57]. La energía de un fotón depende de la frecuencia de radiación; hay fotones de todas las energías, desde rayos X y gamma de alta energía, pasando por la luz visible, hasta las ondas infrarrojas y de radio de baja energía. Todos los fotones viajan a la velocidad de la luz. Considerados entre las partículas subatómicas, los fotones son bosones, no tienen carga eléctrica ni masa en reposo y tienen una unidad de espín; son partículas de campo que se cree que son las portadoras del campo electromagnético [58].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

Para aclarar la utilidad de la naturaleza de la luz solar, la energía térmica con la temperatura equivalente y la energía eléctrica con el voltaje equivalente de la región visible al ultravioleta lejano que está disponible para las reacciones fotoquímicas se enumeran en la Tabla 1. “Einstein” es el nombre de la unidad de radiación que significa un mol de fotones (6.02×10^{23} fotones) [59]. Las fórmulas de conversión de la longitud de onda λ a las energías equivalentes se muestran a continuación.

Tabla 1.- Representación de conversión sobre diferentes longitudes de onda.

Color	Longitud de onda típica (nm)	Energía (kcal / Einstein)	Temperatura equivalente (10^4 K)	Eléctrico (eV)
Rojo	700	40.8	1.77	1.97
Naranja	620	46.1	2.00	2.32
Amarillo	580	49.3	2.14	2.48
Verde	530	53.9	2.34	2.72
Azul	470	60.8	2.64	3.06
Violeta	420	68.1	2.95	3.42
Cercal de ultravioleta	300	95.3	4.13	4.79
Ultra violeta lejano	200	142.9	6.20	6.92

2.3.4.- Caracterización de los Sistemas de Luz.

2.3.4.1.- Caracterización de la Luz con el Espectrofotómetro.

La espectrofotometría es uno de los métodos más útiles de análisis cuantitativo en diversos campos como: física bioquímica, ingeniería química entre otras. La cual permite medir la cantidad de luz absorbida en una sustancia química por medio de la intensidad de la luz cuando un haz del mismo pasa a través de la solución de muestra, esto con el principio básico de que cada compuesto absorbe o trasmite luz en un cierto rango de longitud de onda [60]. Además, estos métodos miden la radiación que puede ser reflejada, difractada, dispersada o polarizada por la materia al interactuar con la radiación electromagnética, asimismo estos métodos ópticos se presentan en espectroscópicos (absorción y emisión) y no espectroscópicos (refractometría, polarimetría, entre otros). Los espectroscópicos de absorción miden la radiación absorbida por átomos moleculares o iones y los espectroscópicos de emisión son los que miden la radiación emitida por átomos o iones. Por otra parte, dependiendo del tipo de radiación absorbida puede ser de absorción (rayos X ultravioleta, luz visible infrarrojo entre otras); y los no espectroscópicos miden cambios que ocurren en dirección de propagación de luz como reflectancia y polarimetría. Por lo tanto, el espectrofotómetro es un instrumento que permite medir la cantidad de fotones (intensidad de luz) que se absorbidos

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

luego de pasar a través de una solución de muestra [61], en base la longitud de onda de la fuente de luz se puede clasificar diferentes tipos; el espectrofotómetro UV el cual se encuentra en el rango de ultravioleta entre (185 – 400nm) y el visible en te (4000- 700nm) de él espectro de radiación electromagnética , el espectrofotómetro infrarrojo ubicado en el rango infrarrojo entre (700 – 15000 nm) del espectro.

En el tema de espectrofotometría la absorción o la transmisión de una sustancia por dictar un ejemplo puede determinarse por el color observado, es el caso de una muestra de solución que absorbe la luz en todo el rango visible (no tiene ninguna longitud de onda visible) que parecería negra en teoría, otro ejemplo sería: si se trasmite todas las longitudes de onda visibles (que no se absorbe nada) la muestra de solución será blanco. La estructura de un espectrofotómetro se muestra en la Figura 6 que contiene de una fuente de luz un colimador, un monocromador, un selector de longitud de onda, entre otras cosas [62].

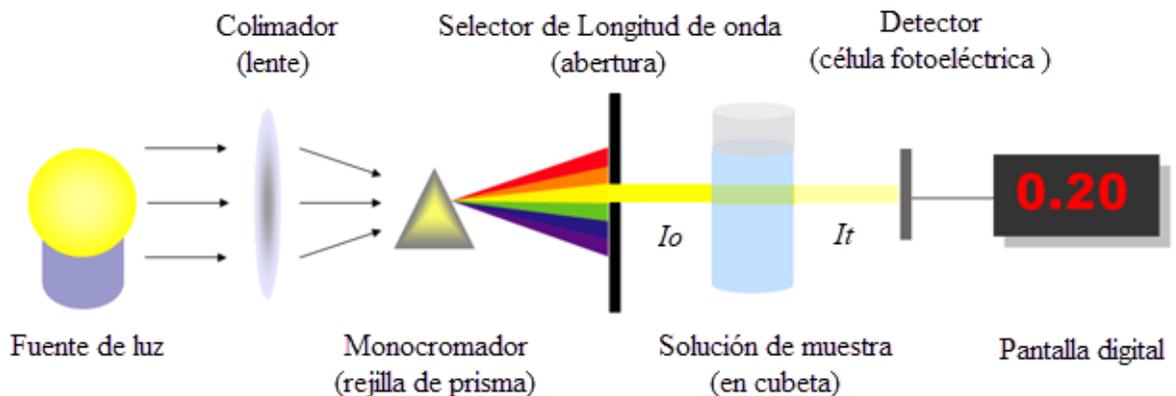


Figura 6.- Caracterización de la luz con espectrofotómetro [63].

2.3.5.- Instrumentación Óptica.

La óptica es una rama de la física que estudia el viaje de la luz y sus interacciones con la materia, basándose en descubrimientos científicos en el campo de los instrumentos ópticos, el instrumento de origen natural es el ojo humano el cual tiene una capacidad de convertir ondas electromagnéticas con una longitud de onda de (380 nm violeta) a (780 nm rojo) la cual es considerada luz visible, mediante células fotosensibles en retina, en un impulsos neuronales, que se analizan en la corteza visual del cerebro, este mecanismo óptico es utilizado como principio para realizar instrumentos ópticos simples [64]. El ojo humano tiene la capacidad cambiar el radio y el índice de refracción con lo que la distancia focal varia y el haz de luz se puede enfocar, por lo tanto los objetos se pueden mostrar con aumento; de este principio se basan los microscopios binoculares, pero la mayoría de ellos son instrumentos pasivos, dado que necesitan de una fuente de luz externa para la medición, además existen instrumentos complejos que son utilizados en satélites, en donde se miden intensidad y el análisis espectral, por

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

completamente independientes sin la necesidad de estar conectados a una PC, los cuales los hace ideales para uso en campo donde se deben tomar medidas precisas en condiciones del mundo real, el diseño óptico y las tecnologías de procesamiento de señales [67].

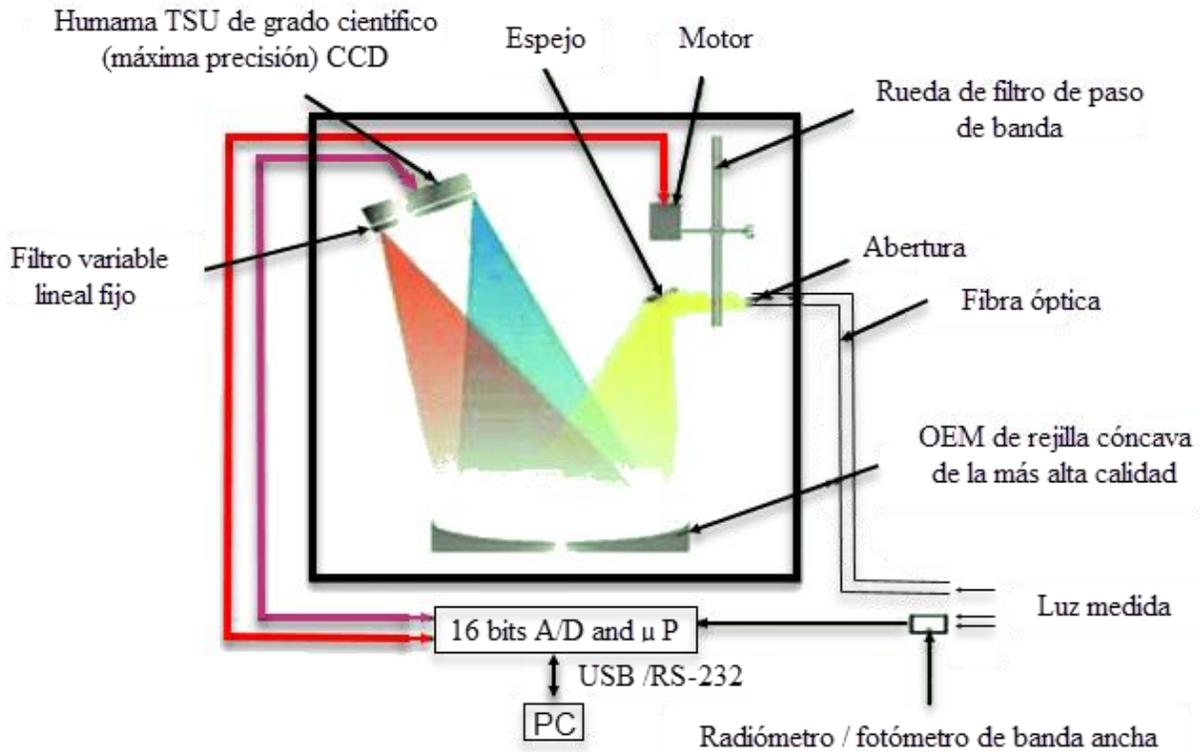


Figura 8.- Espectro radiómetro [68].

2.3.5.2.- Quantum.

Los sensores Quantum de Apogee Instruments son un estándar confiable para medir la radiación fotosintéticamente activa por parte de profesionales agrícolas en todo el mundo como el que se muestra en la Figura 9. Ofrecemos cinco tipos de sensores cuánticos; el espectro completo (cabezal azul), el original (cabezal negro), el PAR y el PFD (cabezal plateado) y un sensor cuántico de contaminación lumínica (cabezal plateado) [69].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas



Figura 9.- Instrumento tipo Quantum [70].

Los sensores cuánticos de espectro completo cuentan con un detector óptico avanzado que proporciona mediciones PAR de alta precisión (400-700 nm) en todas las fuentes de luz, incluidos todos los LED de colores modernos. Nuestros sensores cuánticos originales cuentan con un detector óptico menos costoso que es excelente para medir fuentes de luz de banda ancha, pero menos preciso al medir ciertos colores de LED. Los nuevos sensores de Radiación Fotosintéticamente Activa Extendida (PAR) de 380-760 nm y Densidad de Flujo de Fotones Extendido (PFD) de 340-1040 nm de Apogee están diseñados para realizar mediciones de intensidad de flujo de fotones totales de rangos más amplios que los PAR tradicionales. Nuestros nuevos sensores cuánticos de contaminación lumínica son muy sensibles para detectar fotones extraviados de bajo nivel en el rango de 340-1040 nm que pueden interrumpir los períodos de oscuridad de las plantas en plantas sensibles. Apogee también ofrece una variedad de medidores y paquetes para medir integral de luz que se muestra en la Figura 10 [71].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

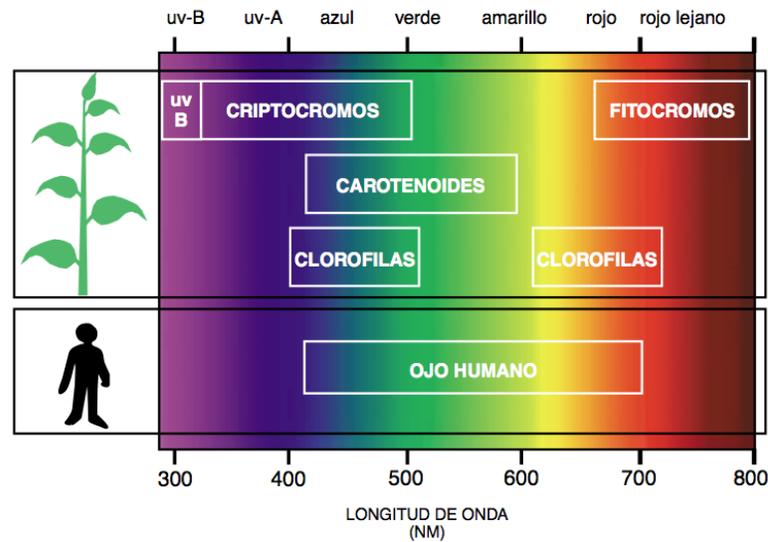


Figura 10.- Medición de la luz [72].

2.3.5.3.- Luxómetro.

Luxómetro (también llamado luxómetro o light meter) contiene una célula fotoeléctrica que capta la luz y la convierte en impulsos eléctricos como se muestra en la Figura 11, los cuales son interpretados y representada en un display o aguja con la correspondiente escala de lux. Se utiliza para la medición precisa de los acontecimientos luminosos en el sector de la industria, el comercio, la agricultura y la investigación puede utilizarse además para comprobar la iluminación del ordenador, del puesto de trabajo, en la decoración de escaparates y para el mundo del diseño [73]. El luxómetro moderno funciona según el principio de una celda (célula) C.C.D. o fotovoltaica; un circuito integrado recibe una cierta cantidad de luz (fotones que constituyen la "señal", una energía de brillo) y la transforma en una señal eléctrica (analógica). Esta señal es visible por el desplazamiento de una aguja, el encendido de diodo o la fijación de una cifra. Una fotorresistencia asociada a un ohmímetro desempeñaría el mismo papel.

Un filtro de corrección de espectro permite evitar que las diferencias de espectro falseen la medida (la luz amarilla es más eficaz que la azul, por ejemplo, para producir un electrón a partir de la energía de un paquete de fotones). Los luxómetros pueden tener varias escalas para adaptarse a las luminosidades débiles o las fuertes (hasta varias decenas de millares de luxes) [72, 73].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas



Figura 11.- Luxómetro [76].

2.3.6.- Tipos de Radiación.

La radiación tiene un papel importante en la vida moderna debido a que estamos constantemente rodeados de ella con elementos radiactivos naturales como lo muestra la Figura 12, por ejemplo: el suelo, aire, cuerpo humano, o mediante el uso de la medicina nuclear, la exposición especial o la generación de electricidad, por lo tanto, a lo largo de varias décadas se ha llegado a comprender perfectamente los efectos de la radiación [77]. La radiación es considerada una parte natural de nuestra vida diaria la cual es de puedes describir como energía que viaja como ondas o partículas, de fuentes naturales o artificiales, en algunas de ellas se incluyen las comunicaciones inalámbricas, rayos X y la luz solar, la radiación es muy esencial en la tierra y debido a ello todos los organismos vivimos en un mundo radioactivo natural o artificial. La vida evolucionara en la tierra y son indispensables partes del medio ambiente. Estamos continuamente expuestos a radiaciones naturales y artificiales. Además de estos, algunos de los radionucleidos como el polonio y el radio están presentes en nuestros huesos; nuestro músculo contiene radiocarbono y radiopotasio, radón, torón y su progenie en nuestros pulmones, y emiten radiación ionizante. La radiación proveniente del sol se debe a la fusión nuclear; es muy esencial para la existencia de vida en la tierra. Por tanto, vivimos en un mundo radiactivo natural [78]. Las radiaciones se clasifican en radiaciones ionizantes y los no ionizantes a continuación de define cada una de ellas.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

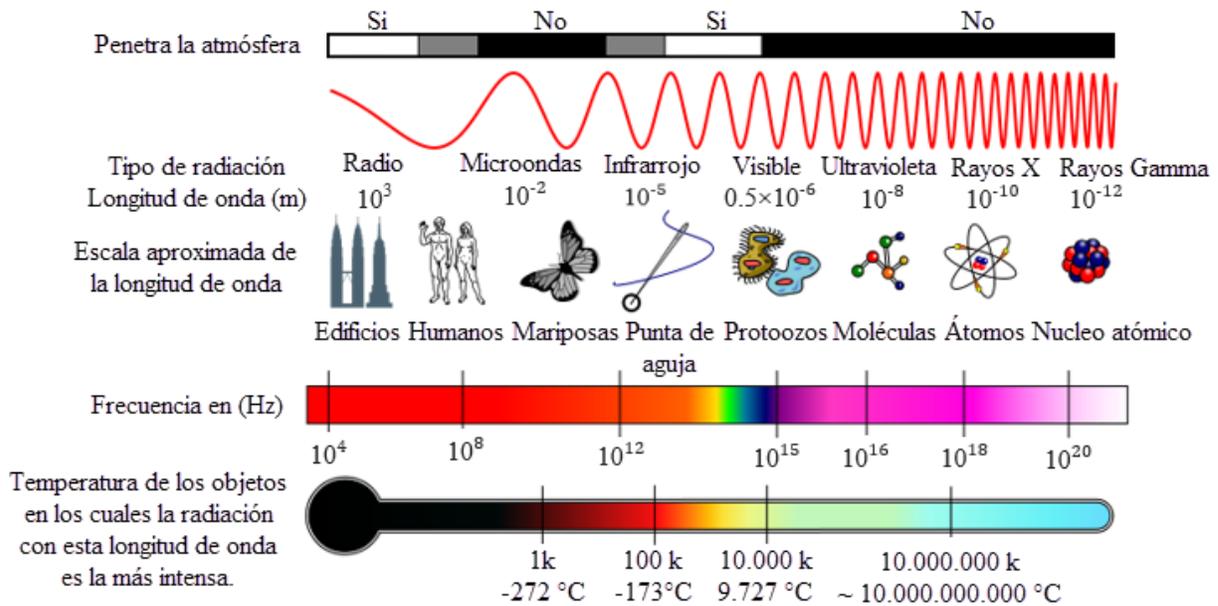


Figura 12.- Tipos de radiación artificial [79].

2.3.6.1.- Radiaciones Ionizantes.

Las radiaciones ionizantes tienen energía suficiente para separar los electrones de átomos y aunque para algunos tipos de radiación de energía relativamente baja como lo es UV solo puede generar este fenómeno en determinadas circunstancias. Por lo tanto, para distinguir estos tipos de radiación que siempre causan ionización, se puede establecer un límite energético inferior arbitrario para la radiación ionizante que se suele encontrar en 10 kiloelectronvoltios (KeV) [80]. Las radiaciones ionizantes se terminan en tres tipos:

2.3.6.1.1.- Alfa.

Conformados por dos protones y dos neutrones, por núcleos de helio, estas partículas son las de mayor masa por lo tanto su capacidad de penetración es limitada, por ejemplo: no puede atravesar una hoja de papel o nuestra piel, estas partículas son muy energéticas [81].

2.3.6.1.2.- Beta.

Estos son electrones o positrones que poseen una masa mucho menor que las partículas alfa, por lo que tienen mayor capacidad para penetrar en la materia, estas pueden atravesar una hoja de papel, pero no pueden atravesar una fina hoja de metal o metacrilico y por la ropa [82].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

2.3.6.1.3.- Gamma.

Estas son radiaciones electromagnéticas por lo tanto no tienen masa ni carga, esto les permite tener una gran penetración en la materia, para poder impedir su paso es necesario una capa gruesa de plomo o de una pared de hormigón, se determina que los rayos gama y los rayos X tienen las mismas propiedades, y solo las diferencia su lugar de origen, emitida tanto que los rayos gama se producen en el núcleo del átomo y los rayos X se producen en capas externas del átomo, donde se encuentran los electrones [83].

2.3.6.2.- Radiaciones No Ionizantes.

La radiación no ionizante consta de partículas las cuales no tienen la suficiente energía para romper los enlaces de los átomos, así como la materia en donde interactúan, las cuales pueden ser artificiales como, ondas de radio, televisión, telefonía móvil, entre otros. Los naturales como rayos (UV) ultravioleta, infrarrojos, radiaciones electromagnéticas, microondas entre otros [84].

2.3.6.2.1.- Ultravioletas.

Estas son muy presentes en áreas de esterilización y desinfección como herramientas de medicina, desinfección de alimentos o en la industria como equipos de soldadura. Esta radiación es dañina para piel generando quemaduras, erupciones e incluso provocar cáncer de piel. La radiación ultravioleta se puede caracterizar en 3 importantes tipos, A B y C [85].

2.3.6.2.1.- Radiación UV-A.

Se denomina luz negra y puede producir fluorescencia de diferentes sustancias, tienen una longitud de onda de 315 a 400 nanómetros [86].

2.3.6.2.2.- Radiación UV -B.

El efecto se puede considerar como posible negativo es la aparición de eritema cutáneo y comprende casi todas las emisiones ultravioletas, su longitud de onda se encuentra entre 280 y 300 nanómetros [87].

2.3.6.2.3.- Radiación UV-C.

Esta produce efectos germicidas y una aplicación muy común es en granjas de perros, zorros, que sufren enfermedades respiratorias principalmente, y su longitud de onda esta entre 100 y 280 nanómetros [88].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

2.3.6.3.- Infrarrojos.

Estos efectos se encuentran comprendidos entre las microondas y la luz visible son un poco escasos por su poco poder de penetración, por lo tanto, únicamente existen en efectos térmicos, la radiación infrarroja penetra la capa superficial de la piel a no más de .8 mm de profundidad, aunado a esto el calentamiento superficial esta entre los 780 y 1 nm, que puede generar quemaduras y aumento de pigmentación. No obstante, muchos de los procesos industriales utilizan el curado térmico de distintos tipos de materiales [89].

2.3.6.4.- Electromagnéticas.

Estas radiaciones inducen corrientes corporales y absorción de energía en los tejidos en base a las frecuencias y los mecanismos de acoplamiento, las radiaciones electromagnéticas pueden definirse como aquellos procesos en los que se emite energía de forma de ondas o partículas materiales y se pueden propagar tanto a través de un medio material como en el vacío y se pueden diferenciar unas de otras en base a su frecuencia de radiación y su energía [90].

2.3.7.- Sistemas de Radiación Artificial Comerciales.

En los últimos años se han implementado diversas formas y fuentes de estimulación electromagnética apropiada al desarrollo del proceso de fotosíntesis de las plantas de manera natural y artificial, nuestra principal fuente gratuita capaz de hacerlo es el sol, la cual emite rayos X, luz ultravioleta, luz visible, luz infrarroja e inclusive ondas de radio, sin embargo dentro de esta gran cantidad de ondas electromagnéticas que emite el sol, de estas ondas algunas no son apropiadas para algunos seres vivos y en su defecto para algunas plantas, por ejemplo la luz ultravioleta B y C, esta luz es presente técnicamente 12 horas, de acuerdo con la estación climática y dependiendo del lugar de origen estas horas pueden cambiar de manera positiva o negativa para el proceso en cuestión comprometiendo el crecimiento y desarrollo de las plantas. Por otra parte, se encuentran las fuentes artificiales: como bombillas incandescentes, de vapor de mercurio, fluorescentes, de alta presión de sodio, HPS (High Pressure Sodium), lámparas tipo LED (Light Emitting Diode) [91]. Las cuales son ampliamente utilizadas para acelerar el proceso de fotosíntesis y así el desarrollo de las plantas en granjas verticales, (vertical farming).

2.3.7.1.- Lámparas Incandescentes.

Este tipo de bombillas tradicionales producen luz (roja e infrarroja) por fenómenos de filamento calentado por el paso de corriente eléctrica, los cuales desprenden mucho calor y por defecto consumen mayor energía por lo que su rendimiento es muy bajo, una de sus deficiencias es el riesgo que se corre al exponer este tipo de bombillas a las plantas, dado que si la planta está muy cerca puede sufrir quemaduras que dañaran su salud [92].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas



Figura 13.- Lámparas incandescentes [93].

2.3.7.2.- Lámparas Mixtas.

Son de tipo (incandescentes y de vapor de mercurio) que consta de una combinación de una lámpara incandescente y otra de vapor de mercurio a alta presión y de esta manera se determinan las radiaciones rojas necesarias para la estimulación de floración de las plantas en interiores o campos cerrados, su deficiencia es el elevado costo de uso y el reducir en gran cantidad el rendimiento luminoso con respecto a las lámparas de vapor de mercurio [94], como se muestra en la Figura 14.



Figura 14.- Lámparas mixtas [95].

2.3.7.3.- Lámparas Fluorescentes.

Estas lámparas son de vapor de mercurio pero de baja presión, pueden producir principalmente luz (azul y roja) dependiendo del modelo (Figura 15), mediante fenómenos de fluorescencia del gas sometido a un arco voltaico, son especialmente utilizados para las primeras etapas de las plantas ya que ayudan a los vástagos y a enraizar esquejes, estos son bastante económicos, cuentan con un elevado rendimiento luminoso y no emiten demasiado calor, pero su principal deficiencia es el bastante espacio que ocupan [96].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas



Figura 15.- Lámparas fluorescentes [97].

2.3.7.4.- Lámparas de Halogenuros Metálicos (MH).

Estas lámparas de vapor de mercurio cuentan con un tubo de descarga yoduros metálicos como en la Figura 16, que tienen como principio mejor considerablemente la calidad de color, la luz que producen es tipo blanca, poco azulada, que se puede utilizar con la finalidad de ayudar la germinación, enraizamiento de esquejes y crecimiento vegetativo, en algunas ocasiones suelen utilizarse en áreas de alumbrado público, ante que su costo es bajo, pero gastan más energía eléctrica para producir la misma luz [96, 97].



Figura 16.- Lámparas de halogenuros metálicos [100].

2.3.7.5.- Lámparas de Alta Presión de Sodio o (HPS).

Producen luz (amarilla y anaranjada) por la descarga eléctrica en un tubo con vapor de sodio a alta presión. Sin duda son las mejores, puesto que emiten más luz y menos calor. Se usan en parkings y lugares donde el color de la iluminación no es demasiado importante. Proporcionan todos los espectros de luz necesarios para el crecimiento y la floración de las plantas de interior. Son muy eficientes en el consumo de electricidad [101].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas



Figura 17.- Lámparas de alta presión de sodio [100].

2.3.7.6.- Lámparas LEDs.

Las lámparas LED son aquellas que usan un conjunto de diodos por sus siglas en inglés Light Emission Diode (Diodo Emisor de Luz) los cuales son componentes electrónicos constituidos por la unión de materiales semiconductores de diferentes características capaces de convertir la energía eléctrica directamente en energía luminosa. Estas lámparas son muy utilizadas en la actualidad debido a su gama amplia que casi abarca todos los campos luminosos, ya que son capaces de generar importantes ahorros en el consumo energético, por lo cual a iluminación LED supone una ventaja fuerte a la iluminación convencional y la reducción al mínimo de emisión de calor y rayos ultravioleta, tampoco contiene gases ni metales pesados o que los hace menos contaminantes que el resto y el consumo de energía es más bajo [102].

2.3.8.- Aplicaciones Agroindustriales.

Se han realizado diversos estudios sobre los efectos de la calidad y cantidad de la luz en plantas gran parte de los experimentos para analizar el efecto de la luz artificial en el crecimiento de plantas ha sido desarrollado en lechuga. Debido a la naturaleza de la lechuga, su crecimiento es relativamente corto en comparación con otras hortalizas como jitomate, melón, chile, entre otros, permitiendo así realizar un mayor número de experimentos para la validación de los datos obtenidos [103]. Realizaron experimentos sobre lechugas donde se sometieron a dos tratamientos de luz. El primero fue establecido con diodos rojos y el segundo tratamiento con lámparas fluorescentes. Los resultados determinaron que la luz azul (generada por las lámparas fluorescentes) era indispensable para un crecimiento adecuado (balance morfológico) en las lechugas, obteniendo mejores resultados con las lámparas fluorescentes ya que este tipo de iluminación emite luz en la región azul del espectro electromagnético. Los diodos rojos complementados con lámparas fluorescentes resultaron ser una alternativa muy atractiva y adecuada como sistema de iluminación artificial. En los sistemas de radiación artificial basados en

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

lámparas fluorescentes, existen diferentes tipos, de las cuales cada tipo emite un espectro electromagnético diferente [104], realizaron experimentos en lechugas utilizando dos tratamientos de luz, uno de ellas fue la mezcla de lámparas fluorescentes azules en conjunto con LEDs rojos y el segundo tratamiento fue lámparas fluorescentes blanco-frío. Los mejores resultados en el crecimiento de la lechuga se obtuvieron con el tratamiento de las lámparas fluorescentes blanco- frío debido a que este tipo de lámparas también emiten radiación en la región ultravioleta (UV) e infrarroja (IR) en comparación a las lámparas fluorescentes azules, la radiación UV e IR beneficiaron en el crecimiento de las lechugas.

Islam et al. [105] presentaron un resumen de diferentes investigaciones enfocadas al uso de los LEDs para el crecimiento de las plantas en interiores (lugares cerrados). Esta información la clasificaron en cuatro ramas principales en las que el uso de la tecnología LED ha permitido proponer diferentes estudios para un mayor entendimiento en la relación luz-planta. Las cuatro ramas son cultivos vegetales, agricultura en el espacio, cultivo de algas y reducción de enfermedades.

De igual forma se presentan como un punto importante mostrando el potencial de la tecnología LED, Han et al. [106] desarrollaron un experimento aplicando cinco diferentes tratamientos de luz con LEDs y un tratamiento con lámparas fluorescentes en plantas de algodón. Los tratamientos con LEDs fueron: LEDs azules (A), LEDs rojos (R) y tres combinaciones de LEDs rojos - azules (A: R = 3:1, 1:1, 1:3). Peso seco, altura del tallo, diámetro del tallo, área de la hoja y contenido de clorofilas. Los resultados mostraron que el contenido de clorofila a, b y (a+b), diámetro de del tallo y área de la hoja fueron mayores para el tratamiento con LEDs azules. El tratamiento de LEDs azules - rojos a una relación de 1:1 tuvo los mayores valores para el peso fresco, peso seco y longitud del tallo. Arung et al. [107] desarrollaron un estudio en donde aplicaron seis diferentes tratamientos de luz artificial (LEDs rojos, LEDs azules, LEDs rojos con LEDs azules, y tres lámparas fluorescentes con diferentes espectros de emisión). Los autores eligieron estas seis condiciones de luz argumentando que son las más comúnmente investigadas y que son las más utilizadas en la agroindustria (plantas). Se consideró como objetivo principal determinar que tratamiento de luz era comercialmente viable (consumo de energía y valor del producto) y más adecuado para el crecimiento de la lechuga. Los resultados mostraron que el mejor tratamiento de luz fue el de los LEDs rojos, teniendo casi tres veces mayor eficiencia productiva (g/W) que las lámparas fluorescentes.

Shimada et al. [108] aplicaron tres diferentes tratamientos de luz pulsada con LEDs rojos y azules en plantas de *Arabidopsis thaliana*. El primer tratamiento consistió en aplicar luz continua con LEDs rojos y azules a una cantidad de 20 micro moles. El segundo tratamiento fue luz pulsada a 2.5 kHz con un ciclo de trabajo de 45% con pulsos de $44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (mitad rojos y mitad azules) y el ultimo tratamiento fue aplicar pulsos rojos y azules desfasados, es decir, en la parte oscura del pulso rojo, se aplicó el pulso azul y viceversa (superposición), dejando un tiempo de oscuridad entre pulsos del 5%. Para establecer los efectos de los tres tratamientos propuestos en este artículo, se

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

midió el área de la hoja y la cantidad de clorofila contenida en una hoja (SPAD). Los resultados mostraron que el área total de la planta fue mejor en el tratamiento dos (área mayor). Con respecto a la cantidad de clorofila contenida en una hoja, el tratamiento uno y dos tuvieron los mismos resultados (no hubo diferencias significativas). Los resultados más negativos se obtuvieron en el tratamiento tres.

Johkan et al. [109] analizaron los efectos de la luz verde con LEDs en plantas de lechuga. Los autores aplicaron tres calidades de luz verde (510 nm con una intensidad de $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 524 nm con $200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y 532 nm con $300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Usaron lámparas fluorescentes blancas como tratamiento control. Los brotes y crecimiento de la raíz en las plantas de lechuga con intensidad de $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ tuvieron un decrecimiento comparado con las lámparas fluorescentes, pero fue mayor el crecimiento de la raíz con los LEDs verdes a 200 micromoles de intensidad. El crecimiento de los brotes de lechuga fue mayor con LEDs verdes a $300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en comparación con todos los demás tratamientos. Como conclusión, los autores reportan que alta intensidad de luz verde fue capaz de promover crecimiento en las plantas de lechuga.

Hernández-Aguilar et al. [110] desarrollaron una investigación para analizar los efectos en la germinación y crecimiento de plantas de albahaca. Los autores dividieron 4000 semillas en cuatro grupos, aplicaron tres tratamientos de luz con LEDs rojos (6, 12 y 24 horas-luz) y un tratamiento control (sin luz). Las variables que midieron fueron: altura promedio de las plantas, porcentaje de plantas con cuatro hojas y número de semillas fertilizadas. Los resultados mostraron que el tratamiento de 24 horas-luz fue tuvo una mayor uniformidad en las plantas y con mayor contenido de clorofila.

Gómez et al. [111] aplicaron diferentes fuentes de luz (LEDs rojos, LEDs rojos -azules, LEDs azules, lámparas fluorescentes y luz solar) en cultivos de col china (*Brassica campestris* L.). Los variables que se midieron en este experimento fueron: peso seco, clorofila a, clorofila b, clorofila a+b, carotenoides, proteína soluble y vitamina C. Los resultados mostraron que las concentraciones de las clorofilas y vitamina C fueron mayores bajo el tratamiento de LEDs azules, sin embargo, el peso seco fue mayor en el tratamiento de LED rojos. Otra investigación donde se presentan diferentes tratamientos de luz con LEDs es la presentada por [112] Los autores propusieron siete diferentes tratamientos de luz artificial (lámpara de halogenuro metálico, LEDs rojos, LEDs azules, LEDs naranjas, LEDs verdes, LEDs rojos - azules, LEDs rojos - azules - verdes) en plantas de jitomate (cherry). Diferentes variables de crecimiento fueron medidas para cada tratamiento incluyendo mediciones de fluorescencia de la clorofila. Los resultados muestran que los tratamientos que tuvieron mayor eficiencia cuántica del PSII fueron: LEDs azules y LEDs rojos - azules con valores de 0.572 y 0.576 respectivamente. En peso seco los tratamientos con los valores más altos fueron: LEDs azules, lámpara de halogenuro metálico y LEDs azules - rojos con valores de 0.45, 0.31 y 0.31 respectivamente.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

Xiaoying et al. [113] desarrollaron un experimento en plantas de lechugas (*Lactuca Sativa*) donde aplicaron dos tratamientos de luz. El primer tratamiento fue aplicando LEDs azules y rojos de alta potencia y el segundo se expuso a la luz natural (solar). Los resultados mostraron que los cultivos expuestos a los LEDs tuvieron mejores resultados en peso fresco, índice total del área de la hoja por planta y ancho de la hoja. La aceleración de crecimiento mostrada en el tratamiento con LEDs fue tres veces mayor en comparación al tratamiento de luz solar.

Un experimento que muestra los efectos foto morfogénicos de los LEDs es presentado por [114]. En esta investigación se aplicaron tratamientos de luz provenientes de LEDs rojos y azules (primer tratamiento) y de lámparas HPS (segundo tratamiento). Estos tratamientos de luz se aplicaron en plantas *Euphorbia pulcherrima* (nochebuena) y los resultados mostraron que las lámparas HPS tuvieron los mejores resultados en el tamaño de los brotes (semillas después de germinar), contenido de clorofila, área de la hoja y materia seca.

2.3.8.1.-Monitoreo de Consumo de Energía en CPPS.

En Dinamarca, la horticultura en invernadero utiliza el 0,8% de la electricidad total consumida y el 75% se consume mediante sistemas de iluminación suplementarios [115]. DynaGrow fue una propuesta de Van Kuik et al.[116], el software incorpora datos climáticos locales, predice costos de electricidad, adicionalmente, brinda una visión general del entorno exterior que optimiza el uso de luz suplementaria sin afectar la calidad en la producción de las plantas. La aplicación fue probada en diferentes condiciones de invernadero donde se utiliza luz suplementaria. DynaGrow está diseñado principalmente para trabajar en dinámica de fluidos computacional (CFD), sistema de refrigeración por eyector impulsado por energía solar, sensores de Internet de las cosas, entre otros. Los sensores de temperatura y CO₂ fueron controlados por el software en Greenhouse. Que muestran efectos positivos sobre el ahorro energético. Nkenyereye et al. [117] integró un sistema de información centrado en la informática energética que incluye sensores de IoT, sistemas de enfriamiento de eyectores alimentados por energía solar y herramientas de dinámica de fluidos computacional. El sistema de información tenía como objetivo reducir el consumo de energía y hacerlo más eficiente para su uso en Plant Factories. Viladrosa et al. [118] propusieron un enfoque similar al usar luces LED que pueden reducir el costo de energía de la iluminación suplementaria en el invernadero mediante el uso de la informática energética para la agricultura de ambiente controlado (CAE). Este enfoque permite analizar, diseñar e implementar estrategias basadas en un diagnóstico global para la optimización y distribución eficiente del uso de los recursos, además, mantiene a los productores actualizados sobre el consumo de energía. El estudio se centró en la producción de una sola planta, pero los autores afirmaron que se utilizará con otras variedades como trabajo futuro. Al mismo tiempo que monitoreaba el uso de energía en los sistemas de iluminación, permitió adaptaciones para no desperdiciar los recursos. Viveros-Legorreta [119] diseñaron un sistema agrícola basado en tradicionales para fábricas de plantas. Establecieron como prioridad los factores

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

ambientales y controlables, además, implementaron un plan de operación dentro del cultivo adaptando los datos de factores a un modelo de red bayesiana con el fin de minimizar costos en electricidad sin sacrificar la cantidad y calidad de la cosecha. Según la simulación, determinaron que el costo energético se reduce si se considera la influencia de factores climáticos y ambientales.

En CPPS, se investigaron varios métodos para reducir la energía eléctrica consumida por las bombas de calor para refrigeración. El consumo de energía se evaluó mediante calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), así como la luz adicional que se incluye en invernaderos y fábricas de plantas. El método desarrollado por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado, Inc. (ASHRAE) sirvió para proporcionar la conversión de ganancias de calor en cargas de enfriamiento a través de funciones de transferencia, además del uso de conjuntos de datos de Año Meteorológico Típico (TMY). Se simularon cuatro climas diferentes en ambos sistemas. Los resultados mostraron que se obtuvo la misma producción, aunque en la fábrica de la planta hubo mayor consumo de energía, pero se redujeron las emisiones de carbono [120]. Franchetti et al. [121] realizaron una comparativa para determinar la factibilidad de sistemas cerrados de plantas de producción en tres zonas climáticas y latitudes diferentes con variación severa de temperatura (alta y baja) a diferentes niveles de radiación solar para la producción de lechuga. El software utilizado fue KASPRO y para la simulación del consumo de energía en invernaderos y fábricas de plantas, respectivamente. Además, monitorearon el uso de recursos (agua y CO₂). Los resultados mostraron que las fábricas de plantas logran una mayor producción [122]. Según el consumo de energía, fue menor en los invernaderos porque aprovecharon la energía solar para el desarrollo de la fotosíntesis.

Centrándose en el consumo de energía en sistemas de iluminación, Chuquimarca et al. [123] informaron estudios sobre un sistema óptico aplicado justo debajo de las luces LED. Se examinó el efecto del sistema sobre el crecimiento y la fotosíntesis de la lechuga mantecosa (*Lactuca sativa var. Capitata*). Se comparó el sistema de iluminación con el dispositivo óptico y el sistema de iluminación tradicional con el ahorro de energía. En este sistema de iluminación se utilizaron Z-LED (LED de zoom), que eran un mejor enfoque de iluminación en una fábrica de plantas con iluminación artificial. Guerreo-Cazorla [124] diseñó un sistema de iluminación suplementario LED que se basa en DT (tecnología de detección), TS (tecnología de detección de temperatura) e IC (tecnología de control inteligente, todos los cuales son tecnología de información electrónica moderna. El sistema utilizó un solo chip STC12C5A60S2 como procesador central y un PT4115 para módulo de impulsión LED. En este sistema, la calidad y cantidad de luz se puede ajustar de acuerdo con la etapa de la planta. En general, la cantidad de luz es ajustada necesaria por la planta, el brillo de color rojo y azul de las luces LED se controlan a través de la señal de modulación de ancho de pulso (PWM). El sistema de iluminación dio retroalimentación de acuerdo con la programación realizada; se puede adaptar a diferentes Sistemas de Producción de Planta Cerrada ayudando en la eficiencia energética. Yan et al. un sistema de iluminación basado en LED implementado en fábricas

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

de plantas. El sistema utilizó tecnología ZIGBEE, el chip STM32 era el control principal, al mismo tiempo, la tecnología PWM regulaba la luz intensidad. Puede detectar la demanda de luz que necesita la planta para su crecimiento y ajustarse dinámicamente en función de las condiciones ambientales. Flores et al. [125] presentaron una comparación de las tecnologías de cultivo solar fotovoltaico (PV) en tejados con las de cultivo en tejados. Demostraron que la producción de alimentos es más sostenible que la generación de energía. La agricultura en azoteas puede proporcionar ventajas significativas sobre los sistemas solares fotovoltaicos en azoteas porque se puede reducir el consumo de combustibles fósiles y se puede mejorar la seguridad alimentaria, además de generar empleos a nivel local, reducir los costos de transporte y mejorar la eficiencia energética en los edificios. Se desarrolló un sistema de control de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) que integra datos sobre los niveles de radiación durante el día para optimizar la eficiencia energética en un invernadero que regula la intensidad de los sistemas de iluminación y logra una irradiancia adecuada aprovechando la luz solar. Los resultados muestran que el sistema es capaz de lograr luz diaria integral (DLI) para el cultivo de plantas y mantener las porciones de luz roja y azul deseadas y asegurar un menor consumo de energía. Se agregó un controlador para predecir el efecto no deseado en el retraso para espacios de producción más grandes. No implementaron el sistema en un ambiente de invernadero real [126]. Se utilizó un sistema de iluminación LED blanco con espectros de banda ancha extendidos (longitudes de onda > 700 nm) en comparación con otras luces LED blancas convencionales, luces LED rojas y azules y luz fluorescente. Se evaluó la productividad y el consumo de energía en el crecimiento de lechuga en un sistema hidropónico. Los resultados mostraron que se obtuvo la misma productividad, pero el ahorro de energía fue mayor que para las luces LED que para las luces fluorescentes. Los autores concluyeron que hubo un posible aumento en la tasa de crecimiento y consumo eficiente de energía con la implementación del W-LED [127].

Un experimento realizado sobre el pre-cultivo de plántulas de bosque (*Picea abies* (L.) Karst. Y Plántulas de *Pinus sylvestris* L.) fue realizado por García Paz [128]. Se controlaron las condiciones de temperatura, humedad y fotoperiodo. Se analizaron tres lámparas comerciales con espectros continuos y luz fluorescente como control. Las plántulas cultivadas con tratamientos de luz LED continua tuvieron un crecimiento similar en comparación con la luz fluorescente. Sin embargo, el consumo de energía fue linealmente proporcional a la intensidad de la luz LED.

Se presentaron las ventajas que tienen los LED sobre las lámparas fluorescentes. Los autores afirmaron que a una longitud de onda de luz LED de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ se puede reducir el consumo de energía.

2.3.8.2.- Luz LED Modo Pulsado en Plantas.

Comúnmente las lámparas LED están programadas para proporcionar luz continua para las plantas en entornos controlados [129]; pero también se pueden ajustar para producir luz pulsada. Las lámparas LED tienen la capacidad de parpadear o parpadear en intervalos de tiempo cortos en los que la emisión de la lámpara se enciende y apaga a

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

intervalos rápidos(μs) produciendo luz pulsada con alta intensidad y menos consumo de energía. Varios trabajos han demostrado las ventajas de los tratamientos con luz LED pulsada aplicada a diversas variedades de plantas. Stenitz y Poff [130]; aplicaron una sola longitud de onda a 450 nm (luz azul) como irradiación continua y de pulso (secuencia de pulsos) a las plantas *arabidopsis thaliana*, se midió la curva fluence-respuesta para evaluar los resultados. La luz pulsada se utilizó en períodos cortos y/o prolongados de tiempo en respuesta a la curvatura del fototropismo. Tennessen et al. [131], mostró que la respuesta fotosintética al LED pulsado (claro/oscurito, 198/2 ms) era mejor que la de la iluminación continua en las plantas de tomate. Jao y Fang [132], determinaron que los LED a frecuencia de 720 Hz con una relación de derechos del 50% con luz de 16 horas/8-h estimulaban el crecimiento de brotes de papa. Si la reducción del consumo de energía era el objetivo, la frecuencia de 180 Hz era la mejor opción para las plantas sin sacrificar su crecimiento y alto consumo de energía [133], desarrollaron un sistema de iluminación artificial para irradiar luz pulsada para medir la actividad fotosintética y el peso fresco en cultivos de lechuga de hoja, lechuga de cabeza, así como plantas acuáticas. La configuración del sistema tenía los siguientes parámetros: un período entre 2s y 1 ms y ciclos de trabajo entre el 20 y el 70% utilizando luz LED con diferentes calidades (dos luces blancas diferentes y luz roja). Sin embargo, este diseño no consideró rangos de frecuencia más altos. Paniagua Prado et al. [134] analizó los efectos de la luz pulsada en comparación con la luz continua con respecto a los parámetros de fluorescencia de clorofila en las plantas de tomate. La luz LED pulsada se configuró con once frecuencias a una relación de servicio del 50%. Las frecuencias que obtuvieron los mejores valores de fluorescencia de clorofila fueron 0,1, 1, 100 Hz y 1KHz. Se llevó a cabo un experimento en condiciones de invernadero para el cultivo de claveles con la configuración de un sistema de atenuación PWM con LED rojo-azul. Se programaron cuatro modos de funcionamiento diferentes. Mod1 era el control alimentado por corriente directa (DC) estableciendo la misma cantidad de fotones. Los otros fueron programados con PWM. Mod2 fue el LED rojo y azul con cuatro longitudes de onda diferentes; las luces se alimentaban a una frecuencia de 5 kHz con una diferencia de fase de 0° al mismo tiempo. Mod3 se encendió para obtener una diferencia de fase de 180° , se configuró 5 kHz. Mod4 se encendió al mismo tiempo y la frecuencia se estableció en 1 kHz. La intensidad media aplicada a las plantas fue de $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Se evaluaron los parámetros físicos y morfológicos. Según los resultados, el mejor modo fue el Mod2 [135]. La irradiación pulsada con LED se aplicó a diferentes ciclos de pulso y frecuencia, a un ciclo de trabajo del 50% en plantas de lechuga [136]. Un tratamiento de luz continua en un PPFD de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un fotoperiodo de 16 horas fue el control. Se evaluaron los efectos sobre el crecimiento, la eficiencia cuántica del fotosistema II (ϕPSII) y la tasa de transporte de electrones (ETR). Los resultados mostraron que no había diferencias significativas entre la fluorescencia de la clorofila. Los experimentos se llevaron a cabo en una fábrica de plantas y mostraron un posible ahorro de energía. Pardo et al [137]. Evaluó el efecto de la luz LED pulsada en la germinación, la longitud del hipocótilo, el peso fresco, el peso seco y los pigmentos vegetales. Se establecieron ocho tratamientos de luz LED (rojo, azul, verde, blanco) con dos frecuencias (25, 50 Hz) y ciclo de trabajo al 20%. El control estaba programado con luz blanca continua. Los valores más altos

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

de absorbancia correspondían a pulsos de luz azul en ambas frecuencias. El tratamiento con el mejor resultado fue la luz roja pulsada a 50 Hz al 20% del ciclo de trabajo, excepto en pigmentos vegetales. En general, la aplicación de la luz pulsada tuvo efectos positivos en todos los tratamientos de las plantas de lechuga. Vaštakaitė et al. [138] determinó los cambios producidos en los niveles fotoquímicos de los microgreens (Pak rojo choi, mostaza y tatsoi) [139], aplicando luz pulsada en comparación con la luz continua. Se conFiguraron diferentes frecuencias (2, 32, 256 y 1024 Hz) con un ciclo de trabajo del 50%. Se determinó el contenido fenólico total, las antocianinas y la actividad antirradica (DPPH). La luz LED pulsada a diferentes frecuencias produce niveles de acumulación en el compuesto fenólico, las antocianinas y la actividad antirradical de los metabolitos secundarios dependiendo de las especies de [140], evaluó los efectos de varias frecuencias de luz LED pulsada en las características de crecimiento de *Lactuca sativa* L. 'Sunmang'. Los tratamientos se establecieron con combinaciones de ledes rojos, blancos y azules ligeros a diferentes frecuencias con un ciclo de trabajo del 75% (PPFD $190 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). El sistema de iluminación utilizó un dispositivo PWM para generar irradiación pulsada. Los resultados mostraron que no hay diferencias significativas entre los tratamientos con respecto a la eficiencia cuántica del fotosistema II y la tasa fotosintética. Los niveles de macronutrientes fueron más altos en comparación con la luz continua. El crecimiento y la eficiencia energética fueron los mejores con el tratamiento de luz pulsada a 1 kHz. Sugieren que la luz pulsada puede ser una estrategia para ahorrar energía. Además, la frecuencia y el ciclo de trabajo deben conFigurarse para cada sistema. En un trabajo anterior, Son et al. [141] encontró que la lechuga tenía un mejor crecimiento con un ciclo de trabajo del 75%. Por esta razón, en su investigación se estableció la misma relación de deber para todos los tratamientos.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

III.- METODOLOGÍA

3.1.- CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE RADIACIÓN ARTIFICIAL TIPO LED.

El diseño y fabricación del sistema de iluminación fue desarrollado por el Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA) del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga en Aguascalientes, México. La irradiación es emitida por LEDs ultrabrillantes, cuenta con funciones para controlar parámetros como diferentes longitudes de onda en luz continua y pulsada, frecuencia y ciclos de trabajo. El sistema de iluminación fue caracterizado para obtener valores máximos de PPFD para cada canal de luz (color). Un sensor cuántico fue utilizado para determinar el PPFD de la radiación fotosintéticamente activa (PAR). Adicionalmente, un sensor de luz fue situado en el sistema de radiación para controlar la respuesta de la variación en la intensidad de la luz (fotones) con respecto a la señal pulsada (voltaje electrónico). Es decir, controla la emisión de radiación del sistema dado a que las señales de entrada electrónicas corresponden a la frecuencia de pulso y al ciclo de trabajo, esto para cuando se establecen tratamientos de iluminación en modo de operación de luz pulsada. Las lámparas LED están constituidas por seis LEDs tipo RGB (Rojo –Red–, Verde –Green–, Azul –Blue–) y W (Blanco –White–) y son de diferentes watts (15, 20 y 25). La Tabla 1 despliega las especificaciones de cada una de las lámparas, su consumo de voltaje (V) y amperaje (A) para cada uno de los colores.

Tabla 2.- Características de sistemas de iluminación.

Voltajes y corrientes máximos para potencias y colores dados.						
	15	W	20	W	25	W
Color	Voltaje	Corriente	Voltaje	Corriente	Voltaje	Corriente
Rojo	17.62 VDC	200 mA	22.82 VDC	200 mA	28.02 VDC	200 mA
Verde	24.61 VDC	180 mA	32.22 VDC	180 mA	39.82 VDC	180 mA
Azul	24.61 VDC	180 mA	32.22 VDC	180 mA	39.82 VDC	180 mA
Blanco	23.62 VDC	200 mA	30.82 VDC	200 mA	38.02 VDC	200 mA

3.2.- INSTALACIÓN DE LÁMPARAS LED EN RACK DE EXPERIMENTOS.

El sistema de radiación artificial (cada lámpara tiene 1.95 m de largo × 1.83 m de altura) fue instalado en un rack (Estante Acero Industrial), puede dividirse horizontalmente en 3 pequeños estantes teniendo un área de irradiación de 60 cm², la distancia entre la superficie y las lámparas fue de 1.30 cm. Las lámparas de 20 watts se utilizaron

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
 para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

para el crecimiento y desarrollo de Microgreens. La Figura 19 indica el proceso de instalación del sistema de iluminación y la adecuación de los tratamientos.

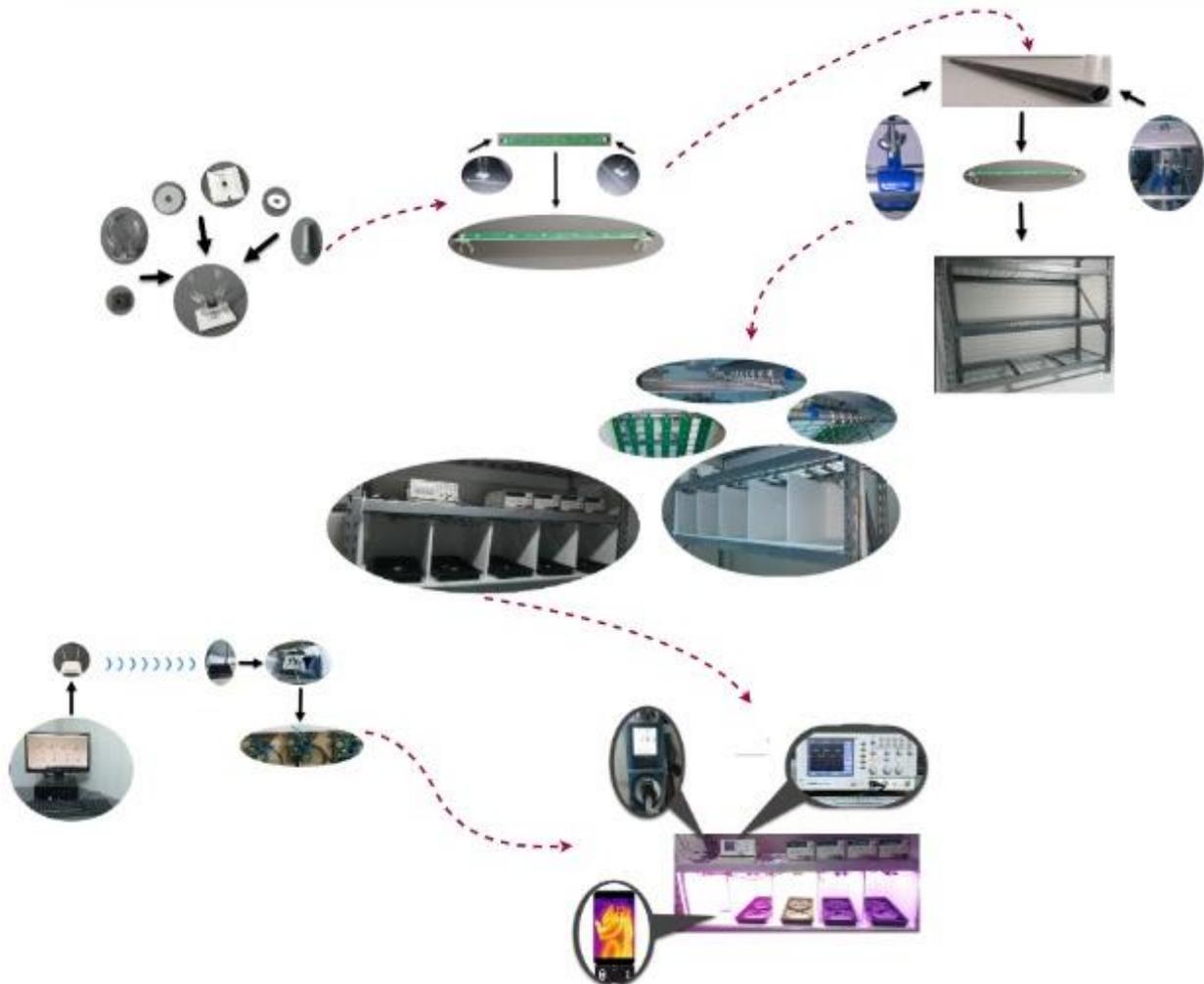


Figura 18.- Instalación del sistema de iluminación dentro de la cámara de crecimiento.

La instalación de cada lámpara se determinó con una finalidad muy particular, el poder colocarla fácilmente y moverla en dirección horizontal; además, de ser situadas en puntos específicos que ayuden con la iluminación uniforme del área predeterminada. La Figura 20 se muestra la integración del instrumento elaborado para la sujeción de las lámparas y la instalación en el rack.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

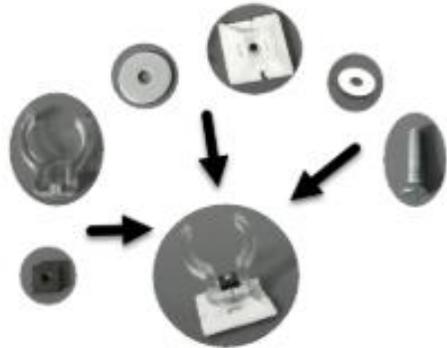


Figura 19.- Instrumento para sujeción de lámparas.

3.3.- DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA OPERACIÓN DE LUZ (MODO PULSADO Y MODO CONTINUO) EN LÁMPARAS TIPO LED DE MANERA AUTOMÁTICA.

LabVIEW es una plataforma sobre entorno de desarrollo para el diseño, con lenguaje de programación visual pensado para sistemas de hardware y software de pruebas, control y diseño simulado o real; el cual fue utilizado para desarrollar un instrumento virtual o mejor conocido como VIs, con el propósito de tener control de las lámparas tipo LED en tres variables: color, frecuencia y ciclo de trabajo.

El sistema de control puede dar la facilidad de seleccionar el esto activo o inactivo (Encendido o apagado) de los cuatro colores primarios Rojo, Verde, Azul y Blanco y poder generar combinaciones, controlando la frecuencia y el ciclo de trabajo individual, dependiendo de la necesidad que presente el usuario. La Figura 21 se muestra el panel frontal de la “programación G” realizada en LabVIEW.

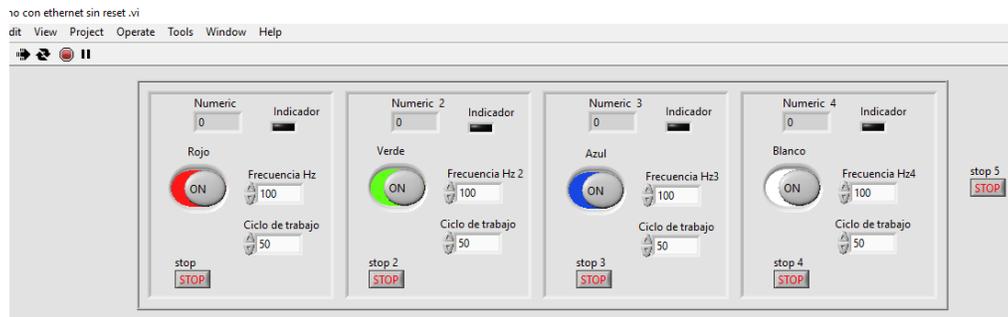


Figura 20.- Panel frontal de programación.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

3.3.1.-Luz Pulsada y Continua.

La luz continua puede ser sustituida por la luz pulsada debido a que se puede llegar a configurar el ciclo de trabajo y la frecuencia para tener el mismo efecto de la luz continua. En la Figura 22 se muestra una señal continua y pulsada.

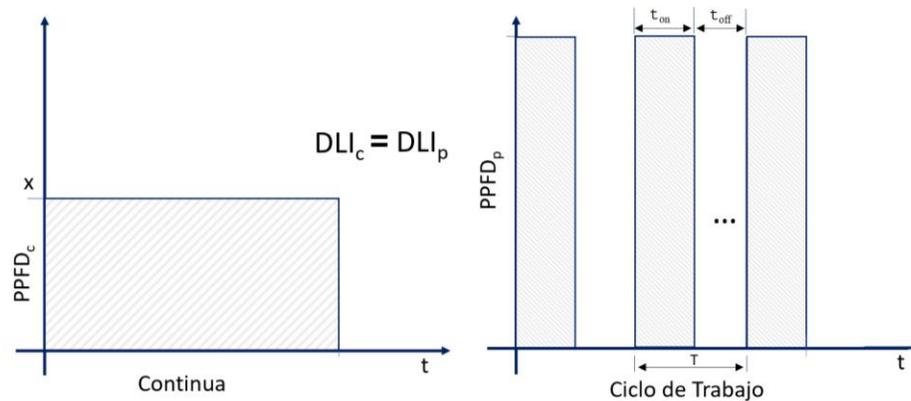


Figura 21.- Señal pulsada y continua.

3.3.2.- Monitoreo De La Temperatura En El Sistema De Radiación Artificial Tipo Led A Través De La Configuración De Las Recetas De Luz.

Se realizaron pruebas preliminares en el sistema de iluminación artificial donde se estableció un estudio comparativo sobre los beneficios de la luz pulsada versus la luz continua, implementando recetas de luz en diferentes condiciones de color mix (rojo-azul) en diferentes porcentajes (50 - 50%, 30 - 70% 70 - 30%) a una frecuencia de luz pulsada de 100 Hz en ciclos de trabajo de 40%, 50% 80%, en un tiempo de 60 minutos siendo monitoreadas y estudiadas por dos métodos, el primero por medio de termografías (cámara FLIR One Pro) y el otro por medio de un watt metro.

Para el primer método se realizaron 3 pruebas para cada una de las condiciones acerca de la luz pulsa y continua en diferentes intensidades y ciclos de trabajo para realizar un estudio con una cámara de imagen térmica con la finalidad de obtener diferencias de temperatura entre LP y LC, puesto que entre más temperatura generen las lámparas o en su defecto el LED que está irradiando luz podemos determinar que está ejecutando un consumo de energía mayor.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

3.4.- CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE RADIACIÓN ARTIFICIAL PARA EL CULTIVO DE MICROGREENS.

Las áreas donde se cultivaron los Microgreens que se muestran en la Figura 23 fueron sanitizadas comenzando a partir de las zonas más limpias a las más sucias, sanitizados con Hipoclorito de sodio al 1-3 % y etanol al 70 % utilizando equipo de protección individual (guantes, bata, lentes, por mencionar algunos.)



Figura 22.- Espacio de siembra de Microgreens.

3.4.1- Esterilización y Preparación de la Semilla.

De igual forma, el sustrato siguió un procedimiento de esterilización en una autoclave a 15 PSI durante 15 min, transcurrido el tiempo se extrajo la humedad, se pesó y se colocaron 200g en cada charola previamente desinfectada (Cada uno de los pasos se muestran en la Figura 24). La semilla fue pesada y se dejó 24 h sumergida en agua, antes de ser colocadas las semillas en el sustrato fueron retiradas del agua con la ayuda de una Servitoalla, y una vez seca fue colocada en cada charola. La cantidad de agua suministrada en cada charola fue establecida en un rango de 50-60 ml, la aplicación se realizó con una jeringa de 5 ml diariamente.



Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas



Figura 23.- Preparación de cultivo de Microgreens.

3.4.2.- Tratamientos de Radiación Artificial tipo LED.

Los niveles de densidad del flujo fotónico fotosintético (PPFD) se conFiguraron a $110 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, la luz pulsada fue conFigurada a una frecuencia de 100, 500 y 1000 Hz con ciclos de trabajo de 50%, la calidad utilizada para este experimento fue Blanca. El fotoperiodo establecido para todos los tratamientos fue de 16/8 h. Como se muestra en la Figura 25.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas



Figura 24.- Sistema de iluminación artificial.

3.4.3.- Crecimiento y Desarrollo del Cultivo de Microgreens a Través del Tiempo.

El crecimiento y desarrollo del cultivo de Microgreens fue monitoreado y se establecieron dos etapas para realizar el corte. Además, para evaluar la concentración de nutrientes de las plantas a través del tiempo.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

3.5.- MEDICIÓN DE NUTRIENTES.

3.5.1.- Clorofila.

Para la determinación de clorofila total (M1) se utilizaron dos métodos aplicando las ecuaciones descritas por Arnon (1949), usando los coeficientes de absorción específicos dados por Mackinney de acuerdo con $\text{Clorofila Total} = (20.2 \times \text{Abs } 645) + (8.02 \times \text{Abs } 663)$. Para el segundo método se mide a 625 nm y se multiplica por el valor de 5.8 (M2). Se pesa un gramo de cada muestra en peso fresco, y se realiza una extracción con 3 ml de acetona al 80% en agua V/V, se colocó en Vortex durante 5 min y en Sonicador por 10 min, para después filtrarse, este proceso se repitió 8 veces. Al final, se llevó a un volumen de 25 ml para leerse en posteriormente por espectrofotometría UV-visible.

3.5.2.- Humedad.

Para determinación de humedad, 6 gramos de cada planta fresca fue pesada, posteriormente se colocó cada muestra a 50°C en una estufa durante un tiempo de 24 horas. De lo obtenido (materia seca de la planta) se mezcló con ácido nítrico 1:1 en agua V/V por el método de ebullición, se filtró y se aforó en 20 ml.

3.5.3.- Vitamina C.

Las verduras de hoja verde aportan pocas calorías y tienen un gran valor alimentario por su riqueza en vitaminas (especialmente A, C, el complejo B, E y K), minerales. La técnica utilizada para la medición de Vitamina C fue por HPLC. Fueron pesados 0.5 g de plantita fresca, se agregaron 2 ml de ácido meta fosfórico al 1 % P/V en agua, después de mancharse completamente fueron colocados en el sonificador y se centrifugó a 13,000 rpm durante 5 min. Posteriormente, con la columna Swiner y un filtro de 25 micrómetros se purificaron y colocaron en los viales del auto muestreador. El equipo fue programado de la siguiente forma. El equipo utilizado es de la marca Perkin Elmer, Series 200, la columna utilizada fue una C18 fase reversa, la fase móvil fue un buffer de acetatos 0.1M a un pH 4.25, el flujo de la fase móvil fue de 1 ml/min (volumen de calcio, hierro, magnesio y potasio) y la fibra. Evaluando que las muestras se encuentren dentro del LOQ (Límite de Cuantificación).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

3.6.- MEDICIÓN DE METALES PESADOS.

La espectrofotometría de absorción atómica, es una técnica instrumental donde, los átomos presentes en la llama absorben parte de la radiación, por lo tanto, la señal disminuye y ese dato es lo que mide el detector, para transformarse en una concentración. Con la medición de la cantidad de luz absorbida se puede hacer una determinación cuantitativa de la cantidad de analito. El equipo de Absorción atómica nos dice cuántas partes por millón tiene la solución de la muestra que digerimos y lo compara con la curva estándar. Los cálculos son en base a cuanto uno pesa, en que volumen se llega al final y la tabla que le mande son ya los cálculos de la cantidad de mg/Kg en base a peso seco. La cantidad de clorofila haciendo los cálculos son microgramos de clorofila por gramo de peso fresco. Con frecuencia, la técnica de absorción atómica se utiliza en la determinación del contenido de metales pesados. Fue utilizada para medir hierro y magnesio. El equipo de absorción atómica para las segundas muestras de Microgreens fue programado para realizar 3 lecturas (1, 5 y 10 ppm) de 0.1 s para generar una curva de calibración y el equipo efectúa una regresión lineal por mínimos cuadrados y cuando las muestras son introducidas se genera el promedio de cada repetición. La variación de voltaje de la lámpara de Fe fue de alrededor 0.02 ppm y la de Magnesio de 0.01 ppm. Los mA configurados a las lámparas de cátodo hueco de cada uno de los metales, son 6 mA para la lámpara de Mg y 30 mA para la lámpara de Fe. El monocromador para Fe, se calibra el monocromador del equipo a 248.3 nm con un slit de salida de 0.2 nm y el Mg a una longitud de onda de 279.8 nm con un slit de 0.7 nm.

3.6.1.- Hierro.

El hierro se encuentra en varios de los alimentos que se consumen a diario, aunque generalmente sólo se absorbe alrededor de un diez por ciento. Se encuentra en las carnes magras, los mariscos y las aves. Otros de los alimentos que lo contiene son los cereales, algunas legumbres como los frijoles, las lentejas, los vegetales verdes, las nueces y otros frutos secos.

3.6.2.- Magnesio.

Se conoce que diversos alimentos sin procesar contienen magnesio en diferentes concentraciones, los alimentos con mayor contenido son las semillas enteras, nueces, legumbres y granos no molidos. Otra fuente de magnesio (Mg) son los vegetales verdes.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

3.7.- MONTAJE DEL SISTEMA HIDROPÓNICO PARA CULTIVO DE LENTEJA.

Para realizar el montaje del sistema hidropónico se diseñó y construyó un rack con 4 niveles y con un temporizador y una bomba para riego de 15 minutos cada 8 horas. Se colocaron 4 charolas por nivel, como se observa en la Figura 26.



Figura 25.- Sistema hidropónico con un sistema de iluminación artificial tipo LED. a) Configuración de variables para el sistema de iluminación artificial. b) Rack hidropónico con 4 calidades de luz.

3.7.1- Esterilización del Material Vegetal.

Las semillas de lenteja que se utilizaron adquiridas en un comercio local en bolsas para consumo humano, las semillas se pesaron y se esterilizaron sumergiéndolas en bolsitas de gasa cuádruples durante 1 minuto en etanol, seguidas por inmersión en Cloralex al 15% durante 15 minutos y finalmente se enjuagaron para ser colocadas en las charolas contenidas en el rack hidropónico en los cuatro niveles de forma homogeneizada.

3.7.2.- Establecimiento para Tratamientos de Radiación Artificial tipo LED.

Para el desarrollo de este experimento las semillas de lentejas fueron expuestas a cuatro tratamientos de radiación emitidos por LEDs ultrabrillantes en calidades de luz Verde, Azul, Rojo y Blanco en modo de operación continua como se muestra en la Figura 27. El experimento se desarrolló en un período de 30 días a 21 ± 5 °C con una

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

intensidad de luz de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, con un fotoperiodo de 16/8 h. La Figura 27 muestra la configuración de los tratamientos.



Figura 26.- Sistema hidropónico con un sistema de iluminación artificial tipo LED. a) Configuración de variables para el sistema de iluminación artificial. b) Rack hidropónico con 4 calidades de luz.

3.8.- SOLUCIONES PARA CULTIVO HIDROPÓNICO DE LENTEJA.

Para los cultivos hidropónicos se utilizaron dos tratamientos. En el primero, se utilizó agua con 1% de Captan y Cloralex al 0.5% para evitar el crecimiento de hongos y bacterias. Por su parte el segundo tratamiento consistió en la preparación de una solución agregando 2.5 mL/L de la solución A y 1 mL/L de la solución B, de las soluciones que vende el Grupo Fronde S. de R.L. de C.V. para cultivos hidropónicas más 1% de Captan y Cloralex al 0.5 %.

Tabla 3.- Configuración de tratamientos con semillas de lenteja a diferentes condiciones de luz.

Número de tratamiento	Semilla	Tratamiento de hidroponía	Tratamiento de luz artificial tipo LED
1	Lenteja	1	Blanca
2	Lenteja	1	Verde
3	Lenteja	1	Azul
4	Lenteja	1	Roja
6	Lenteja	2	Blanca

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

7	Lenteja	2	Verde
8	Lenteja	2	Azul
9	Lenteja	2	Roja

3.9.- CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS.

Para observar el crecimiento de las plantas, se le tomaron fotos a diferentes días de germinación y a los 8 días, se midió el crecimiento en cada diferente tratamiento.

3.9.1.- Determinación de Humedad.

Para determinación de humedad, se pesaron 6 gramos de plantita fresca a los 8 días de cultivo en cada tratamiento y se colocaron en estufa a 50 °C durante 48 horas. La humedad se determinó por la diferencia entre peso fresco y peso seco.

3.9.2.- Determinación de Fe y Mg.

Para la determinación de Fe y Mg, se pesaron 0.3 g de planta seca, se digirieron con ácido nítrico 1;1 V/V por ebullición hasta que dejaron salir vapores amarillos, se filtraron, se llevaron a un volumen final de 20 mL. Y se midió la concentración en un equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica, utilizando estándares de 1, 5, 10 y 15 ppm para calibrar el equipo.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

3.9.3.-Radiación Led Pulsada como una Técnica Alternativa de Ahorro de Energía para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas.

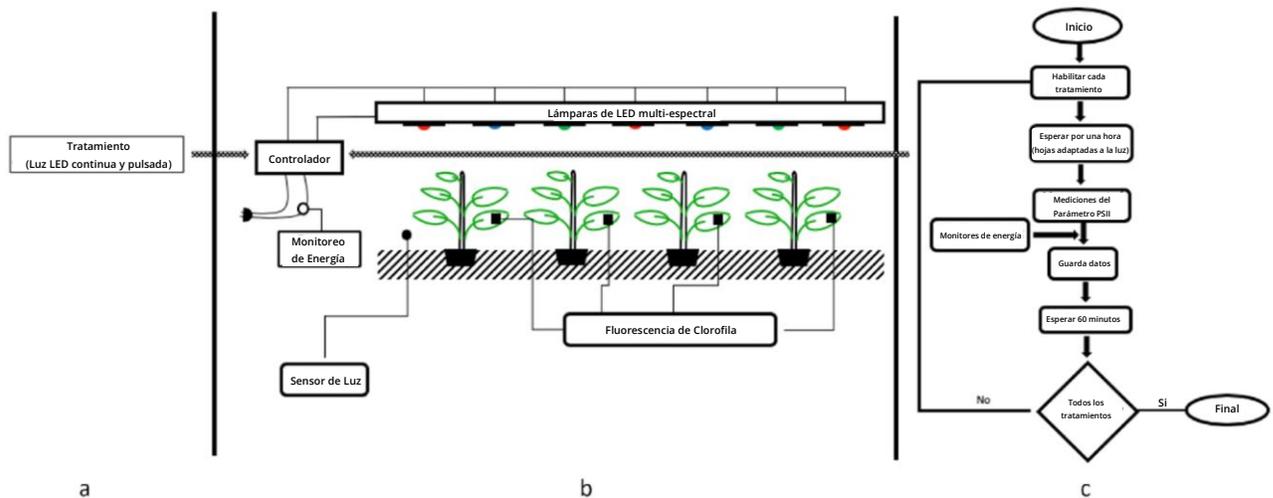


Figura 27.- ConFiguración experimental, a) Tratamiento de luz LED b) Esquema general del experimento c) Secuencia de las medidas

La atención de la luz LED pulsada como una técnica de ahorro de energía no ha sido estudiada ni documentada dentro de los CPPS. Con el objetivo de generar bases preliminares se desarrolló una estrategia de luz LED pulsada como modo de irradiación en un cultivo de chile serrano. Para demostrar el potencial de la emisión de luz pulsada sobre el ahorro de energía y sin afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas. La metodología para este experimento consistió en dos etapas. Primero, medir los efectos sobre el crecimiento de las plantas por la luz LED pulsada. La eficiencia cuántica del fotosistema II (ϕ PSII) se utilizó como parámetro para definir si existe un efecto de crecimiento positivo y negativo de las plantas de chile (*Capsicum annuum* var. Serrano) en ambos modos de luz (luz LED continua y pulsada). La segunda el uso de recetas de luz reportadas en la literatura conFiguradas en sistemas de irradiación artificial basados en LED para medición de consumo de energía.

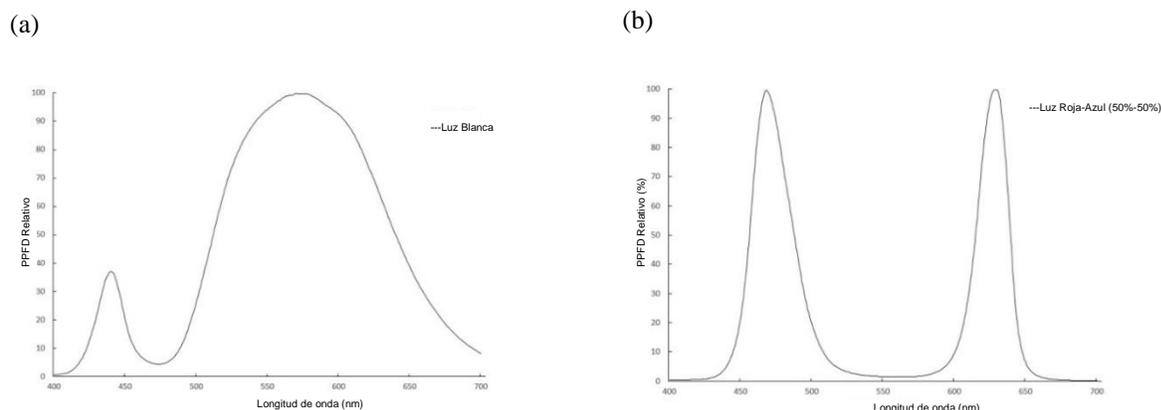
Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

3.10.- LUZ PULSADA Y CONTINUA EN LA EVALUACIÓN DEL ϕ PSII.

Plantas de chile serrano de dos meses edad (*Capsicum annum var. Serrano*) cultivadas previamente en invernadero a una temperatura promedio de 30°C y una temperatura nocturna de 18 °C se trasladaron a cuatro cuartos de crecimiento equipadas con sistemas de iluminación multiespectral basada en LED. Cada sistema se equipó con tratamientos de luz diseñados a medida con una temperatura de la cámara y una humedad relativa mantenidas a 25±1 °C del 60%, respectivamente. La densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) de cada tratamiento con luz LED fue 40, 50, 80, 110, 170 y 230 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, una frecuencia de modo de luz pulsada de 100 Hz y ciclo de trabajo del 50%. La configuración general y el control del sistema de iluminación. Se llevaron a cabo experimentos por triplicado para todas las condiciones con modos de luz LED tanto continua como pulsada. La eficiencia fotoquímica del fotosistema II (ϕ PSII) o el parámetro Genty [142] se midió en línea y se utilizó para evaluar el efecto en los diferentes modos de funcionamiento después de 60 min de irradiación de luz. Este parámetro está directamente asociado con la cantidad de luz absorbida por la clorofila en ϕ PSII y utilizada para procesos fotoquímicos. El ϕ PSII se midió en línea con el sistema de monitorización de fluorescencia Junior-PAM (WALZ, Alemania). Según Maxwell y Johnson [143], el tiempo necesario para alcanzar el estado estable es de unos 15 a 20 minutos y puede cambiar significativamente entre las especies de plantas.

3.10.1.- Tratamientos de Luz LED (Luz Pulsada y Continua).

Se aplicaron tratamientos de luz LED blanca y rojo-azul (50-50%, 70-30% y 30-70%) a las plantas en modo continuo y pulsado medidas con un espectrofotómetro Red Tide (Ocean Optics, Largo, FL, USA), como se muestra en la Figura 29.



Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

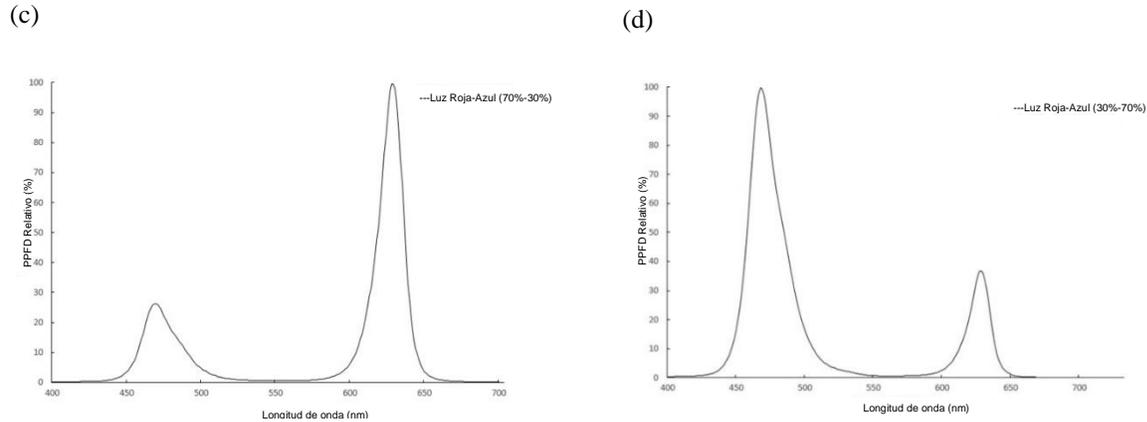


Figura 28.- Tratamientos de luz LED. (a) Blanco. (b) Rojo–Azul (50-50%).
(c) Rojo–Azul (70-30%). (d) Rojo-Azul (30-70%).

3.10.2.- Medición de la Eficiencia Fotoquímica del Fotosistema II (ϕ PSII).

En las emisiones de fluorescencia de clorofila, se midió la eficiencia fotoquímica del fotosistema II (ϕ PSII) o parámetro de Genty (Genty et al., 1989). Este parámetro está directamente asociado con la cantidad de luz absorbida por la clorofila en ϕ PSII y utilizada para procesos fotoquímicos. La ϕ PSII se midió en línea con el sistema de monitorización de fluorescencia Junior-PAM (WALZ, Alemania). Según Maxwell y Johnson (2000), el tiempo necesario para alcanzar el estado estable es de aproximadamente 15 a 20 minutos y puede cambiar significativamente entre especies de plantas.

3.11.- EFECTO EN EL CONSUMO DE ENERGÍA DE LA LUZ LED CONTINUA Y PULSADA.

Existe una amplia literatura sobre la calidad espectral de la radiación en el desarrollo y crecimiento de cultivos. La investigación muestra que la combinación de diferentes longitudes de onda (recetas de luz o tratamientos de luz) puede mejorar la capacidad antioxidante, los niveles de calcio, potasio, magnesio y fósforo, así como el número de frutos, el peso seco, el peso fresco de los cultivos de hortalizas, incluida la lechuga, espinaca, col rizada, albahaca y pimiento dulce, entre otros [144]. Para realizar este estudio se implementaron diez recetas de luz en los modos pulsado y continuo. Estas recetas de luz (Tabla 2) fueron seleccionadas de la literatura para conFigurar en el sistema de iluminación utilizado en este estudio. Las letras de cada receta corresponden a la primera letra de cada color en inglés Rojo (R), Azul (B), Verde (G) y Blanco (W). Los niveles de PPFD fueron 180, 110 y 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y la

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

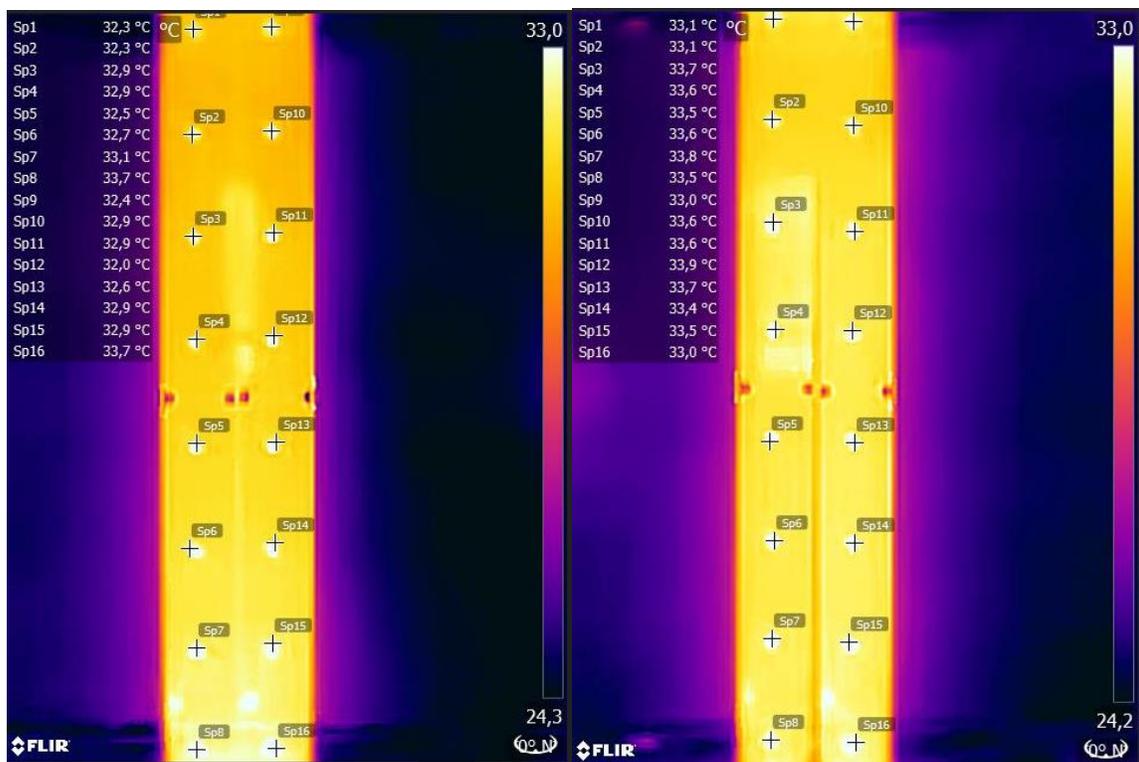
frecuencia establecida en 100, 500 y 1000 Hz con ciclos de trabajo del 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% para cada tratamiento, de acuerdo a la Figura 1 (a). A continuación, se midió el consumo de energía para comparar la eficiencia de ambos modos de operación de la luz. El experimento se llevó a cabo en tres veces.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

IV.- RESULTADOS

4.1.- MONITOREO DE TEMPERATURA LAS LÁMPARAS DE ILUMINACIÓN LED.

En la Figura 30 se presentan resultados obtenidos con la cámara de imagen térmica de uno de los experimentos realizados. Donde se analizaron específicamente la temperatura de los LEDs en cada una de las lámparas por medio de FLIR tools software que nos permite importar, editar y analizar imágenes.



a) Lámpara con luz pulsada

b) Lámpara con luz continua.

Figura 29.- Se muestran 2 lámparas de 20 watts para cada tipo de luz trabajando en condiciones específicas en un periodo de 60 minutos.

Las temperaturas obtenidas en las lámparas de 20 watts presentaron una temperatura mínima de 24.3 °C y como máximo 33 °C en un tiempo de 60 min de fotoperiodo.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

4.2.- EVALUACIÓN DE CRECIMIENTO DE CULTIVOS DE MICROGREENS A TRAVÉS DEL TIEMPO.

El crecimiento y desarrollo del cultivo de Microgreens con respecto al tiempo, en cada uno de los 4 tratamientos se muestra en la Figura 31.



Figura 30.- Desarrollo y crecimiento de Microgreens de lechuga.

De acuerdo a la Figura 31 se observa cómo evolucionó el crecimiento de Microgreens a través del tiempo, además sorprende que en 13 días ya se tenga un rendimiento efectivo en ambos modos de operación de la luz (continua y pulsada), para el día 26 se observó que el área de germinación era mayor en los tratamientos de 1kHz y el tratamiento continuo. Para el día de corte a los 33 días se observa que los Microgreens tratados con radiación pulsada a 100 y 500 Hz se observan con menor follaje que los del tratamiento 1kHz y luz continua.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

4.2.1.- Medición de Clorofilas.

La concentración de clorofila obtenida a los 23 días de cultivo en los 4 tratamientos y utilizando los dos métodos de cuantificación se muestra en la Figura 32.

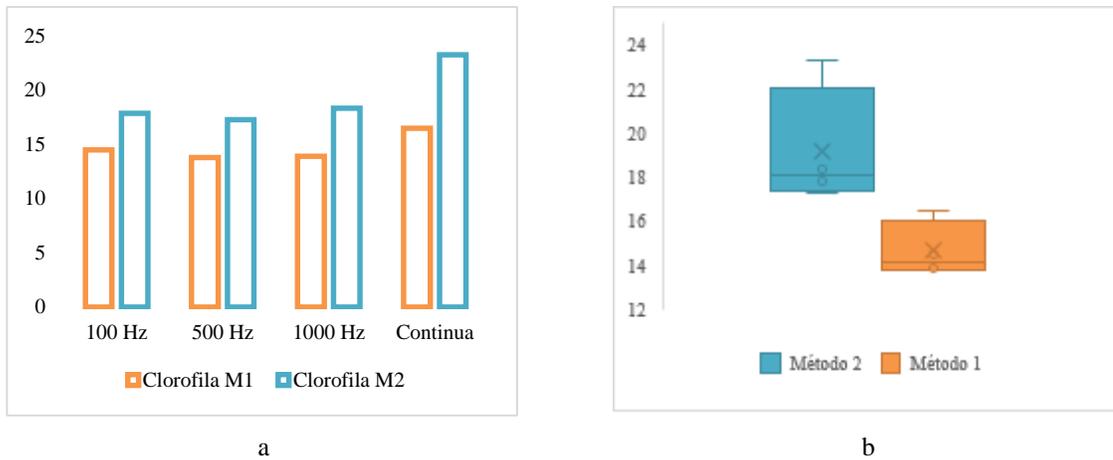


Figura 31. Concentración de clorofila. a) Evaluación de clorofila por tratamiento (Luz pulsada/continua). b) Concentración de clorofila por método de extracción.

Para la concentración de clorofila a los 33 días de cultivo se hicieron dos repeticiones, los resultados de la primera muestra se muestran en la Figura 33.

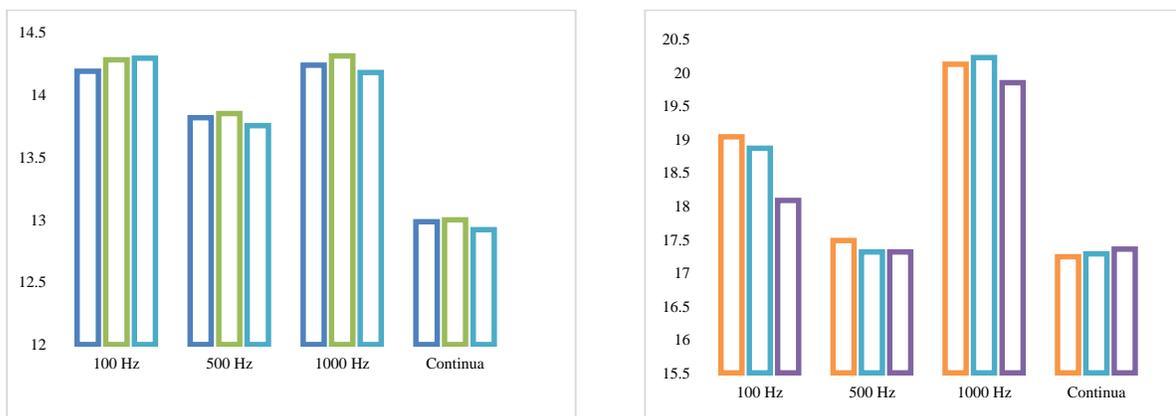


Figura 32.-Contenido de clorofila por tratamiento a los 33 días de cultivo. a) Cuantificación de clorofila por el Método 1. b) Evaluación de clorofila Método 2.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

Los resultados correspondientes a las segundas repeticiones se muestran en la Figura 34.

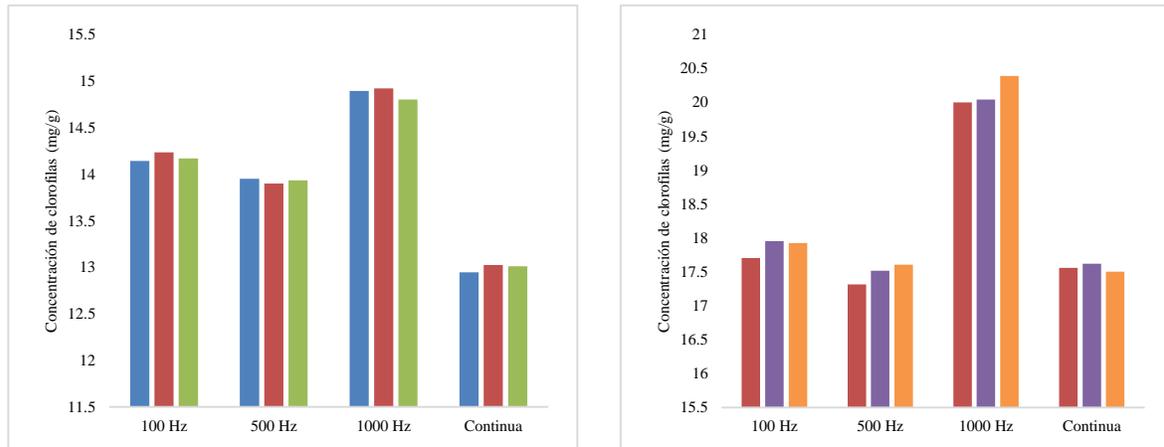


Figura 33.- Segunda repetición de contenido de clorofila por tratamiento a los 33 días de cultivo. a) Cuantificación de clorofila por el Método 1. b) Evaluación de clorofila Método 2.

De acuerdo a los resultados obtenidos para el primer corte el tratamiento de luz continua destaco sobre los de luz pulsada, pero para la segunda medición realizada el tratamiento de luz pulsada a 1 kHz mostró mayor contenido en la cuantificación de clorofilas con las dos metodologías utilizadas, nuevamente se comprueba que la luz pulsada no influye en el contenido nutrimental de las plantas, y que al contrario favorece la concentración de nutrientes.

4.2.2.- Medición de Humedad.

Para determinación de humedad, se pesaron 6 gramos de las plantas cultivadas durante 33 días y se colocaron en estufa a 50 °C durante 24 horas. Los porcentajes de humedad por dos repeticiones se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.- Porcentaje de humedad por cada tratamiento de luz pulsada y continua.

	Tratamiento	Peso Inicial	Peso Final	% Humedad
R1	100 Hz	6.04	0.32	94.70198675
	500hz	5.99	0.3	94.99165275
	1000 Hz	6.04	0.31	94..86754967
	Continua	6.08	0.33	94.57236842
R2	100 Hz	6.08	0.32	94.73684211

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

500 Hz	6	0.29	95.16666667
1000 Hz	6.01	0.32	94.67554077
Continua	5.99	0.34	94.32387312

En relación a los resultados de humedad presentados en la Tabla 4 se presentó que el tratamiento de luz pulsada a 500 Hz preservó la mayor cantidad de humedad con un 95%. Respecto a los demás tratamientos las diferencias son mínimas. La humedad se convierte en un factor ambiental difícil de controlar en espacios de cultivo cerrados. Con buenos niveles de humedad nos indican que nuestra planta cumple con las funciones de transpiración y fotosíntesis lo que ayuda al buen rendimiento del cultivo.

4.2.3.- Determinación de Hierro (Fe) y Magnesio (Mg).

Las concentraciones de Fe y Mg en los Microgreens cultivados durante 23 días se muestran en las Tablas 5 y 6, En los Microgreens cultivados durante 33 días se hicieron 6 repeticiones para cada metal. De acuerdo con las mediciones realizadas a través de absorción atómica se obtuvieron los siguientes datos.

4.2.4.- Hierro.

Tabla 5.- Cantidad de hierro por tratamiento a los 23 días.

Repetición	Tratamientos de luz pulsada y continua				
	#	100 Hz	500 Hz	1 Hz	Continua
R1		1.22	1.12	1.14	1.3

En la Tabla 5 se puede observar que la mayor cantidad de hierro se presenta en el tratamiento de 1 kHz, recordemos que el hierro se ve afectado por factores como un mal manejo de riego, dado que un exceso de humedad en el suelo o sustrato disminuye la presencia de oxígeno, limitando así el crecimiento radicular y por consiguiente la absorción de Fe. El evaluar el hierro también es un parteaguas para nutrir el organismo con los niveles adecuados y que se encuentren en los alimentos que se ingieren día a día.

Para el corte a los 33 días se obtuvieron los valores registrados en la Tabla 6.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

Tabla 6.- Resultados obtenidos de contenido de Hierro (Fe) a los 33 días.

Repetición	Tratamientos de luz pulsada y continua				
	#	100	500	1 kHz	Continua
R1		0.99	0.99	1.01	0.99
R2		1.01	1.01	1	1
R3		1	1	0.99	1.01
R4		1.01	1.01	1.02	1
R5		1	0.99	1.01	0.99
R6		1	1	1.01	1

La Tabla 6 se muestran los resultados del segundo corte de Microgreens, de acuerdo a un análisis rápido en la uniformidad y desviación estándar de los datos se muestra que no existen diferencias significativas en el contenido de Hierro por los tratamientos de luz pulsada y continua. Aunque destaca un poco el tratamiento de 1 kHz.

4.2.5.- Magnesio.

Para la estimación del magnesio se procedió de igual forma que con el hierro, evaluando las primeras muestras del primer corte y las muestras a los 33 días de germinación. El magnesio se determinó dado que se encuentra en los grupos pirrólicos de la clorofila. Los datos obtenidos en las primeras muestras indican que existe una mayor cantidad de magnesio en los tratamientos de luz continua (Ver Tabla 7).

Tabla 7.- Medición de Mg en Microgreens de lechuga

Repetición	Tratamientos de luz pulsada y continua				
	#	100 Hz	500 Hz	1 kHz	Continua
R1		2.25	2.19	2.28	2.99

Resultados del segundo corte de plántulas de lechuga con tratamientos de radiación artificial tipo LED en modo pulsado y continuo, como se muestra en la Tabla 8.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

Tabla 8.- Cantidad obtenida de Magnesio para el segundo corte (Mg), 33 días.

Repetición	Tratamientos de luz pulsada y continua				
	#	100	500	1 kHz	Continua
R1		2.31	2.21	2.54	2.18
R2		2.38	2.19	2.55	2.19
R3		2.37	2.18	2.51	2.19
R4		2.21	2.19	2.52	2.22
R5		2.27	2.2	2.53	2.23
R6		2.26	2.22	2.56	2.21

Los resultados obtenidos de acuerdo a la Tabla 8 indican que se presenta una mayor cantidad de magnesio en el tratamiento de luz pulsada con una frecuencia de 1KHz (1000 Hz), determinando que el uso de luz pulsada puede ser una opción para el crecimiento de Microgreens sin afectar la calidad de los cultivos y además ahorrando en el consumo de energía eléctrica.

4.3.- RESULTADOS DE CULTIVO HIDROPÓNICO.

4.3.1.- Crecimiento de las semillas de lenteja.

La Figura 35 muestra la colocación de la semilla en las bandejas de crecimiento, la aplicación de la radiación artificial multiespectral y el desarrollo y crecimiento de cultivos en cada bandeja del rack hidropónico, además como evolucionaron a través del tiempo. Desde el día 1 hasta el día 7.



Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

DIA 1

En la imagen se observan las canastas con las lentejas desinfectadas, para ser sometidas al tratamiento de luz

DIA 3

Se muestra un pequeño crecimiento de las semillas y hasta este punto no se observan diferencias en el crecimiento de las semillas con su respectiva luz.

DIA 7

Se muestra el crecimiento de las plantas de semilla de lentejas es variado y abundante.

Figura 34.- Resultados sobre crecimiento de lenteja en hidroponía.

LUZ BLANCA



En el análisis se observó un tallo más grueso y obtuvo una altura de 13 cm, germino la mayoría de las semillas.

LUZ ROJA



En el análisis se observó el crecimiento más alargado con 18 cm, pero tallo delgado. La mayoría de las semillas germinó.

LUZ AZUL



En el análisis se observó un crecimiento similar a la luz blanca con una altura de 14 cm y un tallo menos grueso. Gran parte de las semillas germinó.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

LUZ VERDE



En el análisis se observó muy poco crecimiento, una altura de 11 cm, solo una minoría de las semillas germinó y presentó un tallo delgado.

Figura 35.- Resultados sobre el crecimiento de lenteja en los diferentes tratamientos de luz.

De acuerdo con lo observado en la Figura 37, se realizaron mediciones del tallo para evaluar el comportamiento de la lenteja durante su desarrollo, puede notarse que la elongación más alta se presentó en el tratamiento de luz artificial tipo LED color rojo. Siguiendo el color de luz blanco, azul y finalmente el verde. La longitud obtenida se encontró en un rango de 20-25 cm en todos los tratamientos.



Figura 36.- Medición de tallo durante el transcurso del tratamiento.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas



a.



b.



c.



d.

Figura 37.- Características Físicas de los Cultivos. (a) Luz LED Blanca. (b) Luz LED Roja. (c) Luz LED Azul. (d) Luz LED Verde.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

4.4.- CULTIVO TRATAMIENTO CON AGUA.

4.4.1.- Medición Humedad.

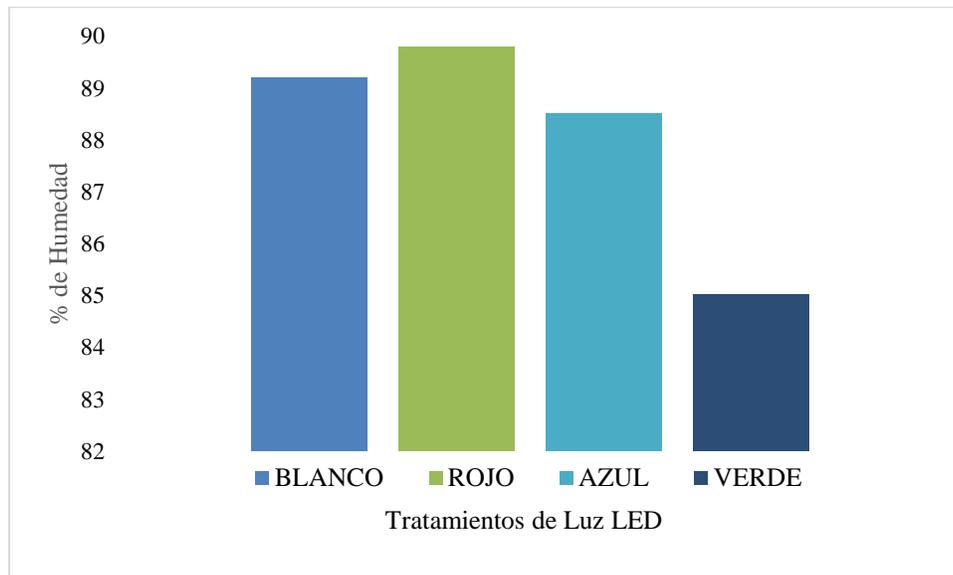


Figura 38.- Medición de humedad en los diferentes colores (blanco, rojo azul y verde).

La concentración de humedad se muestra en la Figura 39, de acuerdo con los resultados obtenidos los tratamientos de radiación en color Rojo son los que almacenaron un mayor nivel de humedad.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

4.4.2.- Medición de peso con técnica de Liofilizado.

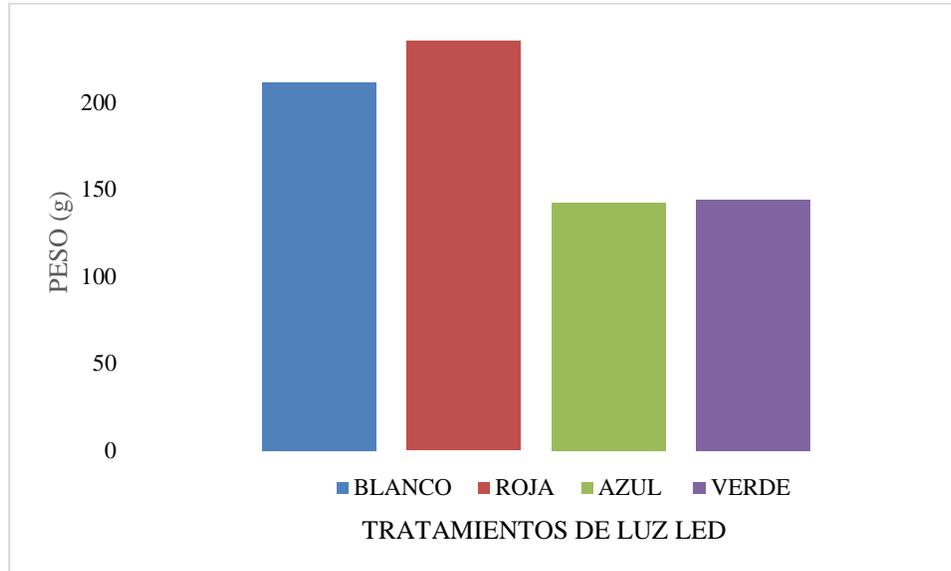


Figura 39.-Medición de peso (en los diferentes colores).

Los estudios se derivan de la problemática existente en el cultivo de alimentos que afectan el crecimiento y desarrollo de los cultivos por factores como el tiempo, espacio, temporada y condiciones del suelo. Durante el periodo de un año se estuvieron buscando fuentes bibliográficas y análisis experimental sobre los cambios en el crecimiento y contenido de clorofila en semilla y lenteja por diferentes tratamientos y longitudes de onda que enfocadas en la técnica de absorción atómica y espectrofotometría con base al método de Hansman.

4.5.- RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE METALES PESADOS

4.5.1.- Para el tratamiento de agua.

En el contenido de hierro y magnesio encontramos variaciones significativas, en cuestiones de hierro la diferencia es muy notable, siendo la luz azul la que tiene mejores resultados con 1.74 ppm de hierro y el rojo 1.20 ppm comparado con luz blanca que es de 0.28 ppm y verde dando un resultado nulo en el contenido de hierro, esto puede deberse ya que, en las observaciones físicas de la planta, existió muy poco crecimiento y germinación.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

4.5.2.- Hierro.

Tabla 9.- Resultados sobre hierro.

Hierro ppm			
Blanco	Rojo	Azul	Verde
0.28	1.20	1.74	0
0.55	0.11	0.094	0.06

4.5.3.- Magnesio.

En el caso de magnesio, encontramos que la luz roja contiene 12.01 ppm mayor que cualquier otro seguido por la luz azul 11.80 ppm, la luz verde 8.68 ppm, mientras que la luz blanca con 5.10 ppm no muestra significancia en los resultados.

Tabla 10.- Resultados sobre magnesio.

Magnesio ppm			
Blanco	Rojo	Azul	Verde
5.10	12.01	11.80	8.68
0.02	0.070	0.066	0.13

4.5.4.- Clorofilas.

En la lectura de clorofilas en tratamiento de agua, la luz roja nos muestra que contiene más clorofila en las diferentes longitudes que las luces, verdes, blanco y azul, sin embargo, la longitud de onda de 623 nos muestra que la diferencia entre los valores de concentración de clorofila no es tan variada entre la luz roja, luz verde.

Tabla 11.- Técnicas sobre lectura de clorofila en diferentes colores.

λ	Verde	Azul	Blanco	Rojo
623	0.5767	0.58745	0.5184	0.61865
645	0.575	0.5486	0.45695	0.6473
625	0.5251	0.46865	0.3598	0.613

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

3.11.1.- Procedimiento para Monitoreo de Energía.

De acuerdo con la Figura 29, al final de cada tratamiento, el consumo de energía se midió con un amperímetro de CA de enganche (Peak Teach, Salerno, Italia) se expresó en Watt \times h usando la siguiente relación en ecuación 1.

$$W = A \times V \times t \quad (1)$$

Dónde,

V es igual a la diferencia de potencial en voltios (V).

A se refiere al flujo de electricidad como una corriente eléctrica en amperios (A).

t es el tiempo en horas (h).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

TABLA 12.- CONSUMO DE ENERGÍA POR DOS LÁMPARAS EN MODO PULSADO Y CONTINUO.

Parámetros Iniciales			*Parámetros Calculados										Parámetros Medidos										
Tratamientos de Luz (recipes)	PPFD _c (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Fotoperiodo	F _c (Hz)	*T	*N _p	*PPFD _p (μmol m ⁻² s ⁻¹)						Consumo de Energía ± 0.1 (W/h)											
						Ciclo de Trabajo (%)						(mol m ⁻² d ⁻¹)		Ciclo de Trabajo (%)									
						40	50	60	70	80	90	*DLI _p	*DLI _c	Continua	40	50	60	70	80	90			
95R5B	50	18/6	100	0.01	6.48E+06													21.3	21.6	22.2	22.7	23.0	23.7
			500	0.002	3.24E+07	125	100	83	71	63	56			23.8	22.1	23.1	23.1	23.4	23.7	23.8			
			1000	0.001	6.48E+07										23.0	23.1	23.4	23.5	23.5	23.7			
83R17B	50	18/6	100	0.01	6.48E+06													21.4	21.7	22.1	22.7	23.1	23.8
			500	0.002	3.24E+07	125	100	83	71	63	56			24.0	22.8	23.1	23.2	23.5	23.8	24.0			
			1000	0.001	6.48E+07							3.24	3.24		23.0	23.3	23.3	23.7	23.9	24.0			
60R40B	50	18/6	100	0.01	6.48E+06													21.7	22.3	22.7	23.1	23.5	24.3
			500	0.002	3.24E+07	125	100	83	71	63	56			24.8	22.3	23.3	23.8	23.9	24.1	24.5			
			1000	0.001	6.48E+07										23.7	23.7	24.1	24.2	24.4	24.5			
57W43B	50	18/6	100	0.01	6.48E+06													23.1	23.7	24.2	24.6	25.0	25.6
			500	0.002	3.24E+07	125	100	83	71	63	56			26.0	23.2	23.2	23.7	25.4	25.5	26.0			
			1000	0.001	6.48E+07										25.4	26.5	25.6	25.8	25.8	26.0			

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

			1000	0.001	6.48E+07													24.5	24.4	24.5	24.6	24.9	24.8	
			100	0.01	6.48E+06													27.5	27.4	28.1	28.4	28.9	29.5	
95R5B	110	18/6	500	0.002	3.24E+07	275	220	183	157	138	122							30.1	26.6	26.6	26.9	28.0	29.4	29.8
			1000	0.001	6.48E+07													30.3	30.0	29.9	29.9	29.9	30.0	
			100	0.01	6.48E+06													27.5	27.4	28.1	28.6	29.1	29.7	
83R17B	110	18/6	500	0.002	3.24E+07	275	220	183	157	138	122							30.2	26.7	26.6	27.9	27.8	29.4	29.8
			1000	0.001	6.48E+07													30.4	30.0	30.0	29.9	30.3	30.2	
			100	0.01	6.48E+06													28.2	28.3	28.8	29.1	29.6	30.3	
60R40B	110	18/6	500	0.002	3.24E+07	275	220	183	157	138	122							31.0	27.2	27.1	27.1	27.7	30.0	30.6
			1000	0.001	6.48E+07							7.13	7.13					31.1	30.8	30.6	30.7	30.7	30.6	
			100	0.01	6.48E+06													32.2	32.0	32.1	32.3	32.8	33.4	
57W43B	110	18/6	500	0.002	3.24E+07	275	220	183	157	138	122							34.4	30.6	30.2	30.3	30.9	33.5	33.9
			1000	0.001	6.48E+07													35.0	34.3	34.1	34.0	34.1	34.1	
			100	0.01	6.48E+06													27.5	27.8	28.3	28.9	29.6	30.3	
67R11B22G	110	18/6	500	0.002	3.24E+07	275	220	183	157	138	122							31.2	27.0	27.1	27.6	28.6	29.9	30.4
			1000	0.001	6.48E+07													30.3	30.3	30.3	30.4	30.7	30.8	
67R33G	110	18/6	100	0.01	6.48E+06	275	220	183	157	138	122							29.8	27.6	27.6	28.0	28.2	27.5	29.2

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

			500	0.002	3.24E+07										26.8	26.4	26.6	26.9	29.0	29.3
			1000	0.001	6.48E+07										30.4	29.9	29.9	29.7	29.9	29.7
			100	0.01	6.48E+06										34.7	34.1	33.9	33.5	33.8	34.3
100W	110	18/6	500	0.002	3.24E+07	275	220	183	157	138	122			35.1	33.1	32.1	32.2	34.5	34.8	34.8
			1000	0.001	6.48E+07										37.7	36.4	35.9	35.4	35.0	34.9
			100	0.01	6.48E+06										28.8	28.6	28.8	29.1	29.9	30.7
50R50B	110	18/6	500	0.002	3.24E+07	275	220	183	157	138	122			31.2	27.6	27.5	27.6	28.0	30.3	30.8
			1000	0.001	6.48E+07										31.6	31.3	30.9	31.0	30.8	31.1
			100	0.01	6.48E+06										27.4	27.7	28.3	28.5	28.9	29.5
70R30B	110	18/6	500	0.002	3.24E+07	275	220	183	157	138	122			30.2	26.6	26.6	26.8	27.1	29.3	29.7
			1000	0.001	6.48E+07										30.3	30.1	30.0	30.1	30.1	30.0
			100	0.01	6.48E+06										31.0	30.6	30.6	30.5	30.8	31.5
30R70B	110	18/6	500	0.002	3.24E+07	275	220	183	157	138	122			32.2	29.8	29.1	29.2	29.5	31.4	31.8
			1000	0.001	6.48E+07										33.8	33.1	32.6	32.2	32.2	32.3
			100	0.01	6.48E+06										36.8	36.1	36.0	35.6	35.7	36.2
95R5B	180	18/6	500	0.002	3.24E+07	450	360	300	257.1	225	200	11.66	11.66	36.9	35.4	34.4	35.8	37.1	36.9	36.9
			1000	0.001	6.48E+07										40.1	38.7	37.8	37.6	37.0	36.8

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

			100	0.01	6.48E+06								36.1	35.8	35.7	35.4	35.6	36.1
83R17B	180	18/6	500	0.002	3.24E+07	450	360	300	257	225	200	37.1	34.7	33.8	33.7	36.1	36.7	36.8
			1000	0.001	6.48E+07								39.3	38.4	37.9	37.4	37.0	36.9
			100	0.01	6.48E+06								37.6	37.1	37.0	36.6	36.8	37.2
60R40B	180	18/6	500	0.002	3.24E+07	450	360	300	257	225	200	37.8	36.1	35.2	35.2	38.0	38.1	38.1
			1000	0.001	6.48E+07								41.1	39.5	38.8	38.6	38.3	38.0
			100	0.01	6.48E+06								45.5	44.1	43.3	43.2	43.4	43.5
57W43B	180	18/6	500	0.002	3.24E+07	450	360	300	257	225	200	43.5	43.7	42.1	45.2	44.8	44.4	43.8
			1000	0.001	6.48E+07								48.6	46.9	45.7	45.1	44.3	44.2
			100	0.01	6.48E+06								36.0	35.7	35.9	35.9	36.0	36.7
67R11B22G	180	18/6	500	0.002	3.24E+07	450	360	300	257	225	200	37.3	34.9	34.0	34.0	36.5	37.1	37.4
			1000	0.001	6.48E+07								39.5	38.4	37.8	37.6	37.4	37.3
			100	0.01	6.48E+06								37.7	36.8	36.4	35.8	35.9	36.5
67R33G	180	18/6	500	0.002	3.24E+07	450	360	300	257	225	200	36.9	36.4	35.2	34.7	37.3	37.2	37.2
			1000	0.001	6.48E+07								41.4	39.5	38.4	37.8	37.5	37.1
			100	0.01	6.48E+06								53.2	50.2	48.1	47.0	47.1	47.0
100W	180	18/6	500	0.002	3.24E+07	450	360	300	257	225	200	46.7	52.4	48.6	50.6	49.2	48.1	47.3

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

			1000	0.001	6.48E+07									56.6	51.8	49.7	49.3	48.3	47.5
			100	0.01	6.48E+06									39.6	38.4	38.2	37.8	37.8	38.0
50R50B	180	18/6	500	0.002	3.24E+07	450	360	300	257	225	200		38.4	38.3	36.8	36.5	39.2	39.0	38.9
			1000	0.001	6.48E+07									43.6	41.4	40.2	39.7	39.5	38.9
			100	0.01	6.48E+06									36.3	35.8	35.7	35.5	35.8	36.4
70R30B	180	18/6	500	0.002	3.24E+07	450	360	300	257	225	200		37.1	34.7	34.0	33.9	36.5	36.9	37.1
			1000	0.001	6.48E+07									39.4	38.3	37.8	37.5	37.1	37.0
			100	0.01	6.48E+06									46.5	43.6	41.8	41.2	40.9	40.7
30R70B	180	18/6	500	0.002	3.24E+07	450	360	300	257	225	200		40.6	45.4	41.9	43.3	42.8	42.1	41.4
			1000	0.001	6.48E+07									50.3	47.0	44.6	43.1	42.3	41.7

* Estos parámetros fueron calculados por el modelo matemáticas.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

V.- CONCLUSIONES.

Los sistemas de iluminación artificial multiespectral presentan diversas ventajas sobre las demás en su tiempo de vida, eficiencia en el consumo de energía con respecto a la luz emitida, espectro de emisión controlable, además tienen diferentes longitudes de onda y diferentes colores que son: azul, blanco, rojo, verde, amarillo, naranja, que permiten la radiación con distintas intensidades, también se puede trabajar con luz artificial continua y pulsada para una alta fluencia. La intensidad y cantidad de la luz adecuada para la planta es de suma importancia debido a que si no es acondicionada la fotosíntesis no se lleva a cabo correctamente, y surgen varios fenómenos como la etiolación (fenómeno que se presenta cuando la iluminación es muy débil o inadecuada) y fotoinhibición (inhibición de la fotosíntesis causada por el exceso de radiación) que limitan su productividad.

Los análisis nutrimentales para Microgreens de lechuga se observó que las primeras mediciones arrojaron que la luz Blanca en modo continuo tenía una mayor fijación de nutrientes, por el contrario, las segundas mediciones (33 días) las hojas tenían un mayor tamaño y en el caso del magnesio y la clorofila fueron mayores en el tratamiento de 1kHz y en la fijación de hierro no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. La Vitamina C no pudo ser cuantificable, debido al tamaño de la muestra. Establecer la equivalencia de energía es la tarea más importante necesaria para trabajar con luces LED en modo pulsado. De lo contrario, es complicado conocer la cantidad de plantas o cultivos energéticos que se están suministrando en un CPPS sin hacerlo.

Los análisis estadísticos de la eficiencia cuántica de los valores del fotosistema II mostraron que no existen diferencias significativas entre los modos de funcionamiento (luz LED pulsada y continua). En otras palabras, las técnicas de luz LED pulsada se pueden utilizar en CPPS sin alterar el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los tratamientos de luz en el modo pulsado redujeron significativamente el consumo de energía. Así, los resultados de este estudio pueden ser utilizados como una guía rápida para las personas involucradas en el sector agroindustrial que estén interesadas en mejorar la eficiencia energética de sus sistemas productivos actuales. Por lo tanto, esta técnica se puede implementar potencialmente en granjas verticales y fábricas de plantas para mejorar la eficiencia en el uso y generar ahorros de costos sin afectar negativamente la producción de plantas o cultivos.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

VI.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, EL ESTADO MUNDIAL DE LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION 2017: aprovechar los sistemas ... alimentarios para lograr una transformacion rural. Place of publication not identified: FOOD & AGRICULTURE ORG, 2017.
- [2] E. Darko, P. Heydarzadeh, B. Schoefs, y M. R. Sabzalian, "Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism", *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 369, núm. 1640, abr. 2014, doi: 10.1098/rstb.2013.0243.
- [3] OECD y Food and Agriculture Organization of the United Nations, OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2014. OECD, 2014. doi: 10.1787/agr_outlook-2014-es.
- [4] "30249305009.pdf". Consultado: el 4 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/302/30249305009.pdf>
- [5] E. Olvera-González et al., "Chlorophyll fluorescence emission of tomato plants as a response to pulsed light based LEDs", *Plant Growth Regul.*, vol. 69, núm. 2, pp. 117–123, mar. 2013, doi: 10.1007/s10725-012-9753-8.
- [6] L. C. Corrales Ramírez MSc, L. Caycedo Lozano MSc, M. A. Gómez Méndez, S. J. Ramos Rojas, y J. N. Rodríguez Torres, "Bacillus spp: una alternativa para la promoción vegetal por dos caminos enzimáticos", *Nova*, vol. 15, núm. 27, p. 45, ago. 2017, doi: 10.22490/24629448.1958.
- [7] M. F. Villarreal-Delgado et al., "El género Bacillus como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola", *Rev. Mex. Fitopatol.*, vol. 36, núm. 1, pp. 95–130, abr. 2018, doi: 10.18781/r.mex.fit.1706-5.
- [8] G. D. Massa, H.-H. Kim, R. M. Wheeler, y C. A. Mitchell, "Plant Productivity in Response to LED Lighting", *HortScience*, vol. 43, núm. 7, pp. 1951–1956, dic. 2008, doi: 10.21273/HORTSCI.43.7.1951.
- [9] A. M. Moreno-Jiménez, S. Loza-Cornejo, y M. Ortiz-Morales, "Efecto de luz LED sobre semillas de Capsicum annum L. var. serrano", *Biotechnol. Veg.*, vol. 17, núm. 3, Art. núm. 3, jul. 2017, Consultado: el 4 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/552>
- [10] R. Chacón-Avilés, C. Meza-Benavides, H. A. C.-Braga, P. S.-Almeida, y C. G.-Casagrande, "Proceso de diseño de sistemas de iluminación LED energéticamente autónomos", *Rev. Tecnol. En Marcha*, vol. 30, núm. 4, p. 52, dic. 2017, doi: 10.18845/tm.v30i4.3411.
- [11] C. D'Souza, H.-G. Yuk, G. H. Khoo, y W. Zhou, "Application of Light-Emitting Diodes in Food Production, Postharvest Preservation, and Microbiological Food Safety", *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 14, núm. 6, pp. 719–740, 2015, doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12155>.
- [12] A. Y. Lara-Izaguirre, A. N. Rojas-Velázquez, M. J. Romero-Méndez, E. Cruz-Crespo, y J. A. Alcalá-Jáuregui, "CRERCEIMLAIECNITONEYSANCIUTMRAUTLOA/CAIMÓNONDIEONEON3-DEONSLEESCTHAUCGIOANHEISDDREOPCÓUNLTICIVAOCN GRONWITTRHATAEN/DAMNMO30- ANCIUCMUMRUATLAIOTSIOINN IN HYDROPONIC LETTUCE WITH TWO CULTIVATION SEASONS", vol. 42, p. 10, 2019.
- [13] V. H. C, M. Rodríguez, J. F. Cárdenas-Hernández, y H. E. Balaguera-López, "Análisis del crecimiento de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) bajo el efecto de diferentes fuentes y dosis de nitrógeno", *Rev. Colomb. Cienc. Hortícolas*, vol. 3, núm. 2, Art. núm. 2, 2009, doi: 10.17584/rcch.2009v3i2.1211.
- [14] J. R. Campos, H. E. R. Flores, y R. E. S. Guerrero, "UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA", p. 207.
- [15] R. J. V. Sarabia, "Modelado y simulación de la distribución de energía eléctrica en sistemas genéricos consistentes en diversas fuentes y múltiples modos de transmisión. Optimización del uso de las fuentes con criterios de sostenibilidad", p. 402.
- [16] G. Dávila Aragón, F. Ortiz Arango, F. Cruz Aranda, G. Dávila Aragón, F. Ortiz Arango, y F. Cruz Aranda, "Cálculo del valor en riesgo operacional mediante redes bayesianas para una empresa financiera", *Contad. Adm.*, vol. 61, núm. 1, pp. 176–201, mar. 2016, doi: 10.1016/j.cya.2015.09.009.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

- [17] M. Kanechi, "Growth and Photosynthesis under Pulsed Lighting", *Photosynth. - Its Evol. Future Improv. Photosynth. Effic. Using Nanomater.*, sep. 2018, doi: 10.5772/intechopen.75519.
- [18] A. Jain, N. Kumari, y V. Jha, "A review on hydroponic system: hope and hype", 2019.
- [19] J. Marroquín Arreola, H. Ríos Bolívar, J. Marroquín Arreola, y H. Ríos Bolívar, "Crecimiento económico, precios y consumo de energía en México", *Ens. Rev. Econ.*, vol. 36, núm. 1, pp. 59–78, may 2017.
- [20] T. Kozai, K. Fujiwara, y E. S. Runkle, Eds., *LED Lighting for Urban Agriculture*. Springer Singapore, 2016. doi: 10.1007/978-981-10-1848-0.
- [21] C. Vásquez, "La luz en la obra de Le Corbusier", *ARQ Santiago*, núm. 76, pp. 20–27, dic. 2010, doi: 10.4067/S0717-69962010000300003.
- [22] G. L. Gutiérrez-Urueta, D. Colorado, J. A. Hernández, P. Rodríguez-Aumente, y W. Rivera, "Estimación de desempeño y optimización de un sistema de absorción adiabático H₂O-LiBr usando redes neuronales artificiales", *Ing. Investig. Tecnol.*, vol. 20, núm. 1, pp. 0–0, mar. 2019, doi: 10.22201/ft.25940732e.2019.20n1.007.
- [23] E. A. M. Pérez, "LA AGRICULTURA VERTICAL COMO ESTRATEGIA PARA GARANTIZAR LA SEGURIDAD ALIMENTARIA EN TERMINOS DE ABASTECIMIENTO Y CALIDAD DE PRODUCTOS EN EL MUNICIPIO DE GACHETÁ CUNDINAMARCA.", p. 45.
- [24] C. Huang et al., "Proteogenomic insights into the biology and treatment of HPV-negative head and neck squamous cell carcinoma", *Cancer Cell*, vol. 39, núm. 3, pp. 361-379.e16, mar. 2021, doi: 10.1016/j.ccell.2020.12.007.
- [25] M. Gopal, *Digital Control and State Variable Methods: Conventional and Neural-fuzzy Control Systems*. Tata McGraw-Hill Education, 2003.
- [26] M. Kanechi, "Growth and Photosynthesis under Pulsed Lighting", 2018. doi: 10.5772/intechopen.75519.
- [27] 조명환 et al., "LED pulse lighting system for plant growth regulation", KR101229389B1, el 5 de febrero de 2013 Consultado: el 29 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/KR101229389B1/en>
- [28] "Exploring the effects of pulsed lighting application in controlled environmental agriculture", *LEDs Magazine*, noviembre de 2019. <https://www.ledsmagazine.com/blogs/article/14071213/exploring-the-effects-of-pulsed-lighting-application-in-controlled-environmental-agriculture> (consultado el 29 de abril de 2021).
- [29] C. D'Souza, H.-G. Yuk, G. H. Khoo, y W. Zhou, "Application of Light-Emitting Diodes in Food Production, Postharvest Preservation, and Microbiological Food Safety", *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 14, núm. 6, pp. 719–740, 2015, doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12155>.
- [30] G. ElMasry et al., "Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: Principles and applications", *Food Res. Int.*, vol. 131, p. 109025, may 2020, doi: 10.1016/j.foodres.2020.109025.
- [31] L. Zheng, H. He, y W. Song, "Application of Light-emitting Diodes and the Effect of Light Quality on Horticultural Crops: A Review", *HortScience*, vol. 54, núm. 10, pp. 1656–1661, oct. 2019, doi: 10.21273/HORTSCI14109-19.
- [32] D. J. Tennessen, R. J. Bula, y T. D. Sharkey, "Efficiency of photosynthesis in continuous and pulsed light emitting diode irradiation", *Photosynth. Res.*, vol. 44, núm. 3, pp. 261–269, jun. 1995, doi: 10.1007/BF00048599.
- [33] H. Arnkil, K. Fridell Anter, y U. Klarén, *Colour and Light: Concepts and Confusions*. 2012.
- [34] L. Dark, "Pasa! Asi Funciona las Gafas de Vision Nocturna", *Taringa!*, el 1 de junio de 2018. https://www.taringa.net/+ciencia_educacion/pasa-asi-funciona-las-gafas-de-vision-nocturna_1674lk (consultado el 29 de abril de 2021).
- [35] A. Tanaka y A. Makino, "Photosynthetic Research in Plant Science", *Plant Cell Physiol.*, vol. 50, núm. 4, pp. 681–683, abr. 2009, doi: 10.1093/pcp/pcp040.
- [36] "optica-geometrica.pdf". Consultado: el 25 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://quantosystems.neocities.org/library/libros/fisica/optica-geometrica.pdf>
- [37] R. B. Price, J. L. Ferracane, y A. C. Shortall, "Light-Curing Units: A Review of What We Need to Know", *J. Dent. Res.*, vol. 94, núm. 9, pp. 1179–1186, sep. 2015, doi: 10.1177/0022034515594786.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

- [38] J. C. López, “Las cuatro propiedades de la luz que tenemos que dominar, con todo detalle”, Xataka Foto, el 21 de junio de 2015. <https://www.xatakafoto.com/trucos-y-consejos/las-cuatro-propiedades-de-la-luz-que-tenemos-que-dominar-con-todo-detalle> (consultado el 29 de abril de 2021).
- [39] H. A. E. Keitz, *Light Calculations and Measurements: An introduction to the system of quantities and units in light-technology and to photometry*. Macmillan International Higher Education, 1971.
- [40] Y. Zong, “From candle to candela”, *Nat. Phys.*, vol. 12, núm. 6, Art. núm. 6, jun. 2016, doi: 10.1038/nphys3787.
- [41] “LEC Expert blog - Thoughts and expert solutions in LEDs”. <https://www.lec-expert.com/topics/units-of-light> (consultado el 4 de mayo de 2021).
- [42] “What is the difference between Lux, Lumen and Candela?”, *Imbema*, el 11 de marzo de 2019. <https://www.imbema.com/en/transport-and-logistics/what-is-the-difference-between-lux-lumen-and-candela/> (consultado el 4 de abril de 2021).
- [43] M. Rea, “The lumen seen in a new light: Making distinctions between light, lighting and neuroscience”, *Light. Res. Technol.*, vol. 47, núm. 3, pp. 259–280, may 2015, doi: 10.1177/1477153514527599.
- [44] A. Hänel et al., “Measuring night sky brightness: methods and challenges”, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 205, pp. 278–290, ene. 2018, doi: 10.1016/j.jqsrt.2017.09.008.
- [45] “Brightness Unit - Definitions, Units and Conversions of Commonly Used Brightness Units”, *AZoOptics.com*, el 27 de junio de 2008. <https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=154> (consultado el 4 de mayo de 2021).
- [46] Y. Tyukhova, “THE ASSESSMENT OF HIGH DYNAMIC RANGE LUMINANCE MEASUREMENTS WITH LED LIGHTING”, 2012.
- [47] Unknown, “La Fotografía: Luminancia”, *La Fotografía*, el 3 de mayo de 2016. <http://fotografiaenfasis.blogspot.com/2016/05/luminancia.html> (consultado el 20 de abril de 2021).
- [48] “Plantas, las nuevas lámparas”, *www.nationalgeographic.com.es*, el 14 de diciembre de 2017. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/plantas-las-nuevas-lamparas_12178 (consultado el 4 de mayo de 2021).
- [49] A. Limited, . “Floristerías’ Review [microforma]. La floricultura. ARENSDI ASTILBE este nuevo tipo es el resultado del cruce de A. Davidii con A. Japonica com- pacta, y astilboides Thunbergi. Las plantas son de muy vigoroso crecimiento, 2^a a 4 pies de alto, produciendo muchos ramificada con plumas, cabezas de flores. Se pre- fer una semi-sombra, posición húmeda, en cualquier suelo ordinario de jardín. Ceres. Muy ramificada en panículas de delicadas flores, luz de color rosa, con peculiar brillo plateado. Juno. Fuerte, vertical growej; penachos de un profundo color rosa-violeta. Reina de salmón. Muy ramificado, agraciado panículas de un hermoso salmón - rosa. Venu Fotografía de stock”, *Alamy*. <https://www.alamy.es/floristerias-review-microforma-la-floricultura-arensdi-astilbe-este-nuevo-tipo-es-el-resultado-del-cruce-de-a-davidii-con-a-japonica-com-pacta-y-astilboides-thunbergi-las-plantas-son-de-muy-vigoroso-crecimiento-2-a-4-pies-de-alto-produciendo-muchos-ramificada-con-plumas-cabezas-de-flores-se-pre-fer-una-semi-sombra-posicion-humeda-en-cualquier-suelo-ordinario-de-jardin-ceres-muy-ramificada-en-paniculas-de-delicadas-flores-luz-de-color-rosa-con-peculiar-brillo-plateado-juno-fuerte-vertical-growej-penachos-de-un-profundo-color-rosa-violeta-reina-de-salmon-muy-ramificado-agraciado-paniculas-de-un-hermoso-salmon-rosa-venu-image238445761.html> (consultado el 4 de mayo de 2021).
- [50] “PMC.pdf”. Consultado: el 20 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.preparadores.eu/temamuestra/Secundaria/PMC.pdf>
- [51] “Óptica en la Física - Fisicalandia”. <https://sites.google.com/site/ultrafisica/indice-de-contenido/optica> (consultado el 26 de enero de 2022).
- [52] “PMC.pdf”. Consultado: el 20 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.preparadores.eu/temamuestra/Secundaria/PMC.pdf>
- [53] “La naturaleza de la luz | Revista Digital Universitaria| UNAM”, RDU UNAM, el 25 de abril de 2018. <https://www.revista.unam.mx/2018v19n3/la-naturaleza-de-la-luz/> (consultado el 20 de abril de 2021).
- [54] “Cómo debe ser la luz y por qué las plantas la necesitan?”, *GROW-SPEC*. <http://grow-spec.com/?p=568&lang=es> (consultado el 5 de mayo de 2021).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

- [55] “Conversion – PPFd to Lux”, Hort Americas, el 17 de febrero de 2020. <https://hortamericas.com/grower-resources/conversion-ppfd-to-lux/> (consultado el 5 de mayo de 2021).
- [56] I. Ashdown, “Photometry and Photosynthesis: From Photometry to PPFd (Revised)”, Wordpress Blog, nov. 2015.
- [57] J. Wang, T. Ming, Z. Jin, J. Wang, L.-D. Sun, y C.-H. Yan, “Photon energy upconversion through thermal radiation with the power efficiency reaching 16%”, *Nat. Commun.*, vol. 5, núm. 1, Art. núm. 1, nov. 2014, doi: 10.1038/ncomms6669.
- [58] M. Norton, A. M. G. Amillo, y R. Galleano, “Comparison of solar spectral irradiance measurements using the average photon energy parameter”, *Sol. Energy*, vol. 120, pp. 337–344, oct. 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.06.023.
- [59] O. Karslıoğlu et al., “Aqueous solution/metal interfaces investigated in operando by photoelectron spectroscopy”, *Faraday Discuss.*, vol. 180, pp. 35–53, 2015, doi: 10.1039/C5FD00003C.
- [60] “Espectrofotometría 2019 versión final.pdf”. Consultado: el 19 de febrero de 2021. [En línea]. Disponible en:
https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/43546/mod_resource/content/3/Espectrofotometr%C3%ADa%202019%20versi%C3%B3n%20final.pdf
- [61] J. Asignado, “Presidente: M. en I. L. Arturo Haro Ruiz”, p. 89.
- [62] “2.1.5: Spectrophotometry”, *Chemistry LibreTexts*, el 2 de octubre de 2013. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Kinetics/02%3A_Reaction_Rates/2.01%3A_Experimental_Determination_of_Kinetics/2.1.05%3A_Spectrophotometry](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Kinetics/02%3A_Reaction_Rates/2.01%3A_Experimental_Determination_of_Kinetics/2.1.05%3A_Spectrophotometry) (consultado el 18 de febrero de 2021).
- [63] “Espectrofotometría 2019 versión final.pdf”. Consultado: el 5 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en:
https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/43546/mod_resource/content/3/Espectrofotometr%C3%ADa%202019%20versi%C3%B3n%20final.pdf
- [64] “Instrumentos ópticos”. <https://www.industrial-needs.com/laboratory-equipment/optical-instruments.htm> (consultado el 19 de febrero de 2021).
- [65] “3: Optical Instruments”, *Physics LibreTexts*, el 25 de enero de 2017. [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/Book%3A_Geometric_Optics_\(Tatum\)/03%3A_Optical_Instruments](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/Book%3A_Geometric_Optics_(Tatum)/03%3A_Optical_Instruments) (consultado el 19 de febrero de 2021).
- [66] “Óptica y sus Areas de Aplicación (Una Perspectiva General)”. <https://www.smf.mx/boletin/2005/Abr-05/Articulos-HHC.html> (consultado el 19 de febrero de 2021).
- [67] “What is the difference between radiometers, spectrometers, and spectroradiometers?”, *Konica Minolta Sensing*. <https://sensing.konicaminolta.us/us/blog/what-is-the-difference-between-radiometers-spectrometers-and-spectroradiometers/> (consultado el 19 de febrero de 2021).
- [68] “Fig. 17. Componentes de diseño del espectroradiómetro [12].”, *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Componentes-de-diseno-del-espectroradiometro-12_fig7_321255230 (consultado el 17 de mayo de 2021).
- [69] “Fieldscout Quantum Light Meter | Envco”. <http://envcoglobal.com/catalog/weather/manual-weather-measurement/handheld-instruments/handheld-light/fieldscout-quantum> (consultado el 4 de abril de 2021).
- [70] “3415F_Quantum_Light_Meters_(for_web_.pdf).pdf”. Consultado: el 5 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en:
[https://www.specmeters.com/assets/1/22/3415F_Quantum_Light_Meters_\(for_web_.pdf\).pdf](https://www.specmeters.com/assets/1/22/3415F_Quantum_Light_Meters_(for_web_.pdf).pdf)
- [71] “quantum | Definition & Facts”, *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/quantum> (consultado el 4 de abril de 2021).
- [72] “La luz: Espectro y color”, *La luz*. <https://labibliotecadesupertramp.blogspot.com/2013/11/espectro-marihuana-cannabis-colores.html> (consultado el 5 de mayo de 2021).
- [73] “Luxómetro - EcuRed”. <https://www.ecured.cu/Lux%C3%B3metro> (consultado el 22 de febrero de 2021).
- [74] A. Palacios, “Luxómetro como Funciona”. <https://www.protegerips.com/noticias> (consultado el 22 de febrero de 2021).
- [75] “luxometro - PDF Free Download”, *qdoc.tips*. <https://qdoc.tips/luxometro-4-pdf-free.html> (consultado el 23 de febrero de 2021).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

- [76] “Medidor digital de luminosidad (luxómetro)”. <https://www.steren.com.mx/medidor-digital-de-luminosidad-luxometro.html> (consultado el 5 de mayo de 2021).
- [77] B. Sacks, G. Meyerson, y J. A. Siegel, “Epidemiology Without Biology: False Paradigms, Unfounded Assumptions, and Specious Statistics in Radiation Science (with Commentaries by Inge Schmitz-Feuerhake and Christopher Busby and a Reply by the Authors)”, *Biol. Theory*, vol. 11, núm. 2, pp. 69–101, jun. 2016, doi: 10.1007/s13752-016-0244-4.
- [78] S. Jادیappa, “Radioisotope: Applications, Effects, and Occupational Protection”, *Princ. Appl. Nucl. Eng. - Radiat. Eff. Therm. Hydraul. Radionucl. Migr. Environ.*, sep. 2018, doi: 10.5772/intechopen.79161.
- [79] “Recursos Joaquín Rodrigo: Radiación electromagnética”. <http://recursos-joaquinrodrigo.blogspot.com/2018/09/radiacion-electromagnetica.html> (consultado el 17 de mayo de 2021).
- [80] G. Friedlander y G. Friedlander, Eds., *Nuclear and radiochemistry*, 3rd ed. New York: Wiley, 1981.
- [81] A. J. Crompton, K. A. A. Gamage, A. Jenkins, y C. J. Taylor, “Alpha Particle Detection Using Alpha-Induced Air Radioluminescence: A Review and Future Prospects for Preliminary Radiological Characterisation for Nuclear Facilities Decommissioning”, *Sensors*, vol. 18, núm. 4, mar. 2018, doi: 10.3390/s18041015.
- [82] J. F. Kirwan, P. H. Constable, I. E. Murdoch, y P. T. Khaw, “Beta irradiation: new uses for an old treatment: a review”, *Eye*, vol. 17, núm. 2, Art. núm. 2, mar. 2003, doi: 10.1038/sj.eye.6700306.
- [83] J. Jorba Bisbal y M. J. Ortega Aramburu, *Las Radiaciones ionizantes : utilización y riesgos I*. Edicions UPC, 1996. Consultado: el 25 de febrero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36551>
- [84] I. Calvente, M. F. Fernandez, J. Villalba, N. Olea, y M. I. Nuñez, “Exposure to electromagnetic fields (non-ionizing radiation) and its relationship with childhood leukemia: A systematic review”, *Sci. Total Environ.*, vol. 408, núm. 16, pp. 3062–3069, jul. 2010, doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.03.039.
- [85] R. P. Gallagher y T. K. Lee, “Adverse effects of ultraviolet radiation: A brief review”, *Prog. Biophys. Mol. Biol.*, vol. 92, núm. 1, pp. 119–131, sep. 2006, doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2006.02.011.
- [86] S. Q. Wang et al., “Ultraviolet A and melanoma: A review”, *J. Am. Acad. Dermatol.*, vol. 44, núm. 5, pp. 837–846, may 2001, doi: 10.1067/mjd.2001.114594.
- [87] S. Kataria, A. Jajoo, y K. N. Guruprasad, “Impact of increasing Ultraviolet-B (UV-B) radiation on photosynthetic processes”, *J. Photochem. Photobiol. B*, vol. 137, pp. 55–66, ago. 2014, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2014.02.004.
- [88] “(PDF) Impact of Environmental Factors on Stilbene Biosynthesis”. https://www.researchgate.net/publication/348219407_Impact_of_Environmental_Factors_on_Stilbene_Bio_synthesis (consultado el 5 de mayo de 2021).
- [89] S. K. F. Syaza, R. Umar, N. Sabri, M. khairul amri Kamarudin, A. Hassan, y H. Juahir, “Non-ionizing radiation as threat in daily life”, *J. Fundam. Appl. Sci.*, vol. 9, p. 308, ene. 2018, doi: 10.4314/jfas.v9i2s.21.
- [90] P. Álvarez García y B. Martínez Toledo, “Prevención de riesgos frente a radiaciones no ionizantes en fisioterapia”, *Fisioterapia*, vol. 31, núm. 4, pp. 143–150, jul. 2009, doi: 10.1016/j.ft.2008.11.002.
- [91] S. Dutta Gupta y A. Agarwal, “Artificial Lighting System for Plant Growth and Development: Chronological Advancement, Working Principles, and Comparative Assessment”, en *Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting*, 2017, pp. 1–25. doi: 10.1007/978-981-10-5807-3_1.
- [92] R. Sanoubar, R. Calone, E. Noli, y L. Barbanti, “Data on seed germination using LED versus fluorescent light under growth chamber conditions”, *Data Brief*, vol. 19, pp. 594–600, ago. 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.05.040.
- [93] “La ONU quiere que los países erradiquen las lámparas incandescentes”, *LARED21*, el 28 de mayo de 2018. [//www.lr21.com.uy/ecologia/1369420-onu-eliminar-lamparas-led-eficiencia-energetica](http://www.lr21.com.uy/ecologia/1369420-onu-eliminar-lamparas-led-eficiencia-energetica) (consultado el 17 de mayo de 2021).
- [94] N. L. Lam, K. R. Smith, A. Gauthier, y M. N. Bates, “KEROSENE: A REVIEW OF HOUSEHOLD USES AND THEIR HAZARDS IN LOW- AND MIDDLE-INCOME COUNTRIES”, *J. Toxicol. Environ. Health B Crit. Rev.*, vol. 15, núm. 6, pp. 396–432, 2012, doi: 10.1080/10937404.2012.710134.
- [95] “LUZ MIXTA 160W 120V E27”, *Materiales Eléctricos y Plantas Eléctricas*. <https://www.prodemic.net/producto/mle160w/> (consultado el 17 de mayo de 2021).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

- [96] N. De la Cruz Ceballos, “Sistema inteligente para el ahorro de energía en lámparas fluorescentes”, oct. 2017, Consultado: el 4 de marzo de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/23622>
- [97] E. CONSUMER (<https://www.consumer.es/>), “Lámparas fluorescentes”. <https://www.consumer.es/bricolaje/lamparas-fluorescentes.html> (consultado el 17 de mayo de 2021).
- [98] “Metal Halide Grow Lights Explained and Reviewed”, Epic Gardening, el 13 de diciembre de 2016. <https://www.epicgardening.com/metal-halide-grow-lights/> (consultado el 4 de abril de 2021).
- [99] L. Cifuentes, G. M. Forsdyke, y N. W. O’Brien, “The corrosion of tungsten in metal halide lamps: A review”, *Corros. Sci.*, vol. 33, núm. 10, pp. 1581–1592, oct. 1992, doi: 10.1016/0010-938X(92)90035-2.
- [100] JeNnifer GarOfalo, “Tipos de luminarias”, 22:11:08 UTC. Consultado: el 17 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/jennifergarofalo73/tipos-de-luminarias-64492366>
- [101] S. L. Staff, “Lighting Comparison: LED vs High Pressure Sodium/Low Pressure Sodium”. <https://www.stouchlighting.com/blog/led-vs-hps-lps-high-and-low-pressure-sodium> (consultado el 4 de abril de 2021).
- [102] C. Guaman y M. Paul, “Diseño de iluminación con luminarias tipo Led basado en el concepto eficiencia energética y confort visual, implementación de estructura para pruebas.”, p. 222.
- [103] Y.-S. Chyi, M. E. Hoenecke, y J. L. Sernyk, “A genetic linkage map of restriction fragment length polymorphism loci for Brassica rapa (syn. campestris)”, *Genome*, feb. 2011, doi: 10.1139/g92-115.
- [104] “Importance of ‘Blue’ Photon Levels for Lettuce Seedlings Grown under Red-light-emitting Diodes in: HortScience Volume 27 Issue 5 (1992)”. <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/27/5/article-p427.xml> (consultado el 5 de mayo de 2021).
- [105] M. A. Islam et al., “Artificial light from light emitting diodes (LEDs) with a high portion of blue light results in shorter poinsettias compared to high pressure sodium (HPS) lamps”, *Sci. Hortic.*, vol. 147, pp. 136–143, nov. 2012, doi: 10.1016/j.scienta.2012.08.034.
- [106] Y. Li, D. Han, G. Hu, M. Sommerfeld, y Q. Hu, “Inhibition of starch synthesis results in overproduction of lipids in *Chlamydomonas reinhardtii*”, *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 107, núm. 2, pp. 258–268, 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/bit.22807>.
- [107] E. T. Arung, S. Furuta, H. Ishikawa, H. Tanaka, y K. Shimizu, “Melanin Biosynthesis Inhibitory and Antioxidant Activities of Quercetin-3’-O-β-D-glucoside Isolated from *Allium cepa*”, *Z. Für Naturforschung C*, vol. 66, núm. 5–6, pp. 209–214, jun. 2011, doi: 10.1515/znc-2011-5-603.
- [108] A. Shimada y Y. Taniguchi, “Red and blue pulse timing control for pulse width modulation light dimming of light emitting diodes for plant cultivation”, *J. Photochem. Photobiol. B*, vol. 104, núm. 3, pp. 399–404, sep. 2011, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2011.04.007.
- [109] M. Johkan, K. Shoji, F. Goto, S. Hahida, y T. Yoshihara, “Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*”, *Environ. Exp. Bot.*, vol. 75, pp. 128–133, ene. 2012, doi: 10.1016/j.envexpbot.2011.08.010.
- [110] C. Hernández-Aguilar et al., “Bioestimulación láser en semillas y plantas”, *Gayana Botánica*, vol. 73, núm. 1, pp. 132–149, jun. 2016, doi: 10.4067/S0717-66432016000100015.
- [111] M. R. Gómez, “Mecanismos de defensa y respuestas de las plantas en la interacción micorrízica: una revisión”, núm. 1, p. 15, 2012.
- [112] “Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradiations of light emitting diodes (LED) | African Journal of Biotechnology”. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/101774> (consultado el 5 de mayo de 2021).
- [113] L. Chin y K. Chong, “Study of high power light emitting diode (LED) lighting system in accelerating the growth rate of *Lactuca sativa* for indoor cultivation”, 2012, doi: 10.5897/IJPS11.1568.
- [114] G. Islam, E. Darbayeva, Z. Rymbayev, D. Dikhanbayeva, y L. Rojas-Solórzano, “Switching-off conventional lighting system and turning-on LED lamps in Kazakhstan: A techno-economic assessment”, *Sustain. Cities Soc.*, vol. 51, p. 101790, nov. 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101790.
- [115] “resource.pdf”. Consultado: el 5 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:da6e3b4b-d79b-11e8-90c0-01aa75ed71a1.0018.02/DOC_1&format=PDF

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

- [116] G. a. M. van Kuik et al., “Long-term research challenges in wind energy – a research agenda by the European Academy of Wind Energy”, *Wind Energy Sci.*, vol. 1, núm. 1, pp. 1–39, feb. 2016, doi: 10.5194/wes-1-1-2016.
- [117] L. Nkenyereye, J. Hwang, Q.-V. Pham, y J. Song, “MEIX: Evolving Multi-Access Edge Computing for Industrial Internet-of-Things Services”, *IEEE Netw.*, pp. 1–7, 2021, doi: 10.1109/MNET.011.2000674.
- [118] R. Clarisó Viladrosa et al., “Informe de l’Observatori Tecnològic dels Estudis d’Informàtica, Multimèdia i Telecommunicació. 2018”, jul. 2019, Consultado: el 5 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/handle/10609/100046>
- [119] J. L. Viveros-Legorreta et al., “Bioensayo del efecto de fenoles producidos por *Myriophyllum aquaticum* en cultivo sobre *Lactuca sativa*”, *Hidrobiológica*, vol. 28, núm. 1, pp. 109–119, abr. 2018.
- [120] T. Ramírez y H.-P. Kläring, “Effects of electric power supply for artificial illumination of greenhouse crops at volatile current supply”, *Acta Hort.*, núm. 1242, pp. 785–790, jul. 2019, doi: 10.17660/ActaHortic.2019.1242.117.
- [121] B. Franchetti, V. Ntouskos, P. Giuliani, T. Herman, L. Barnes, y F. Pirri, “Vision Based Modeling of Plants Phenotyping in Vertical Farming under Artificial Lighting”, *Sensors*, vol. 19, núm. 20, Art. núm. 20, ene. 2019, doi: 10.3390/s19204378.
- [122] “Full article: Natural summer ventilation strategies for energy-saving in high-rise buildings: a case study in the Netherlands”. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14733315.2018.1524210> (consultado el 5 de mayo de 2021).
- [123] C. Chuquimarca y E. David, “Diseño e implementación de un prototipo electro-óptico para controlar un diodo emisor de luz (LED) de alta potencia”, jun. 2020, Consultado: el 5 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20929>
- [124] “TFG_GUERRERO CAZORLA, ELENA.pdf”. Consultado: el 5 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/7193/TFG_GUERRERO%20CAZORLA,%20ELENA.pdf?sequence=1
- [125] R. Flores-Xolocotzi y S. G. Perez, “Flores-Xolocotzi, Ramiro (2020). Estudio y análisis de algunos determinantes de la actividad peatonal en México. En Ceballos, S., Villanueva, J. y Quiroa, J. (Eds). “Importancia de la Infraestructura Verde y la Planeación en el Desarrollo Urbano Sustentable”. México: Editorial Universidad Autónoma de Coahuila, Colegio del Estado de Hidalgo y Red Multidisciplinaria de Investigación en Innovación y Desarrollo Urbano Sustentable, p.p. 58-84. ISBN: 978-607-8082-24-7.”, 2020, p. p.p. 58-84.
- [126] EHT Collaboration et al., “Gravitational Test beyond the First Post-Newtonian Order with the Shadow of the M87 Black Hole”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 125, núm. 14, p. 141104, oct. 2020, doi: 10.1103/PhysRevLett.125.141104.
- [127] “Usefulness of Broad-Spectrum White LEDs to Envision Future Plant Factory | SpringerLink”. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-1065-2_13 (consultado el 5 de mayo de 2021).
- [128] R. García Paz, “Composición de pequeños roedores en bosque templado y áreas de cultivo en Sierra Norte, Oaxaca”, jun. 2019, Consultado: el 5 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/LITER_CIIDIROAX/456
- [129] J. A. E. Calani y C. R. D. C. Gutiérrez, “Uso de las luces led en la producción agrícola”, *Rev. Estud. AGRO - VET*, vol. 2, núm. 2, Art. núm. 2, dic. 2018.
- [130] J. C. Raya Pérez, “El Fototropismo en Plantas”, *Acta Univ.*, vol. 13, núm. 2, pp. 47–52, ago. 2003, doi: 10.15174/au.2003.269.
- [131] I. Aspiazú et al., “Eficiencia fotosintética y de uso del agua por malezas”, *Planta Daninha*, vol. 28, núm. 1, pp. 87–92, 2010, doi: 10.1590/S0100-83582010000100011.
- [132] “Calidad de la luz led y desarrollo in vitro de *Oncidium tigrinum* y *Laelia autumnalis* (orchidaceae)”. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952016000801065 (consultado el 4 de abril de 2021).
- [133] “OEPM_La_patente_europea.pdf”. Consultado: el 4 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: http://www.ub.edu/centrepatents/pdf/material_referencia/OEPM_La_patente_europea.pdf

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

- [134] G. Paniagua Pardo, C. Hernández Aguilar, F. Rico Martínez, F. A. Domínguez Pacheco, E. Martínez Ortiz, y C. L. Martínez González, “Efecto de la luz led de alta intensidad sobre la germinación y el crecimiento de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* L.)”, *Polibotánica*, vol. 0, núm. 40, jul. 2015, doi: 10.18387/polibotanica.40.13.
- [135] “Desarrollo_ambiente_controlado_produccion_hortalizas_empresa_indigo_drones.pdf”. Consultado: el 4 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/7261/Desarrollo_ambiente_controlado_produccion_hortalizas_empresa_indigo_drones.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [136] “tesis_n6136_EscobarTovar.pdf”. Consultado: el 5 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n6136_EscobarTovar.pdf
- [137] C. Hernández-Aguilar et al., “Bioestimulación láser en semillas y plantas”, *Gayana Botánica*, vol. 73, núm. 1, pp. 132–149, jun. 2016, doi: 10.4067/S0717-66432016000100015.
- [138] “Efecto de la intensidad de diodos electroluminosos y fotoperiodo en la optimización de la producción de biomasa de *Spirulina* (*Arthrospira*)”. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2077-99172017000100004&script=sci_abstract (consultado el 4 de abril de 2021).
- [139] “Diversificación de hortalizas asiáticas de hoja en Chile”, *Redagícola Chile*, el 1 de abril de 2020. <https://www.redagricola.com/cl/diversificacion-hortalizas-asiaticas-hoja-chile/> (consultado el 4 de abril de 2021).
- [140] E. R. Turner, Y. Luo, y R. L. Buchanan, “Microgreen nutrition, food safety, and shelf life: A review”, *J. Food Sci.*, vol. 85, núm. 4, pp. 870–882, 2020, doi: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15049>.
- [141] V. Ballance, “Revista Panamericana de Salud Publica/Pan American Journal of Public Health”, *JAMA J. Am. Med. Assoc.*, vol. 281, núm. 21, pp. 2054–2054, jun. 1999, doi: 10.1001/jama.281.21.2054.
- [142] A. Almazán-Becerril y E. García-Mendoza, “La eficiencia cuántica máxima de separación de carga del fotosistema II de la comunidad de fitoplancton en el Pacífico Nororiental Tropical Mexicano: ¿Una herramienta adecuada para diagnosticar el estrés por nutrientes?”, *Cienc. Mar.*, vol. 34, núm. 1, pp. 29–43, 2008.
- [143] S. J. V. Rojas, “EFICIENCIA FOTOQUÍMICA EN HOJAS DE DISTINTAS EDADES EN NARANJO (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) Y VID (*Vitis vinifera* L.)”, p. 71, 2011.
- [144] J. J. Reyes Pérez et al., “Crecimiento y desarrollo de variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) en condiciones de salinidad”, *Terra Latinoam.*, vol. 32, núm. 1, pp. 35–45, mar. 2014.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

Anexo 1

RADIACIÓN ARTIFICIAL EN PLANTAS DE ESTEVIA: EFECTO DE LOS COLORES E INTENSIDADES CON TECNOLOGÍA LED.

Revista Tecnológica CEA N° 7



RADIACIÓN ARTIFICIAL EN PLANTAS DE ESTEVIA: EFECTO DE LOS COLORES E INTENSIDADES CON TECNOLOGÍA LED

Alvarez-Ramirez, Israel³, Escalante-Garcia, Nivia^{3*}, Herrera-Ambroz, Victor Manuel¹, Preciado-Gutiérrez, Rafael¹, Altuzar-Diaz, Rudy Alfonso², Olvera-Gonzalez, José Ernesto³

¹Departamento de Ingenierías, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Carretera a la Estación de Rincón Km 1, C.P. 20670, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. ²Laboratorio de Análisis Instrumental, Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Carretera a San Miguel Cuyutlán Km 10, C.P. 45660, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. ³Laboratorio de Iluminación Artificial, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Carretera a la Estación de Rincón Km 1, C.P. 20670, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. Autor de correspondencia:

aivineg82@gmail.com

RESUMEN

La radiación artificial con tecnología LED permite implementar nuevos métodos de producción realizando diferentes estudios sobre los efectos que se tienen en el crecimiento de las plantas al variar el color e intensidad de la luz. Para este experimento se evalúan los espectros de absorción en cantidad y calidad (mix-mezcla de rojo y azul- y blanco) de luz; además de la fluorescencia en la clorofila *a*. Los resultados obtenidos del experimento indican que la calidad e intensidad que son óptimos en la etapa de crecimiento de las plantas son $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz LED color blanco y $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz LED mix, debido a que si no es adecuada la cantidad y calidad de luz la fotosíntesis no se lleva a cabo correctamente.

Palabras clave: Luz LED, Plantas, Absorción, colores, Eficiencia en el fotosistema II.

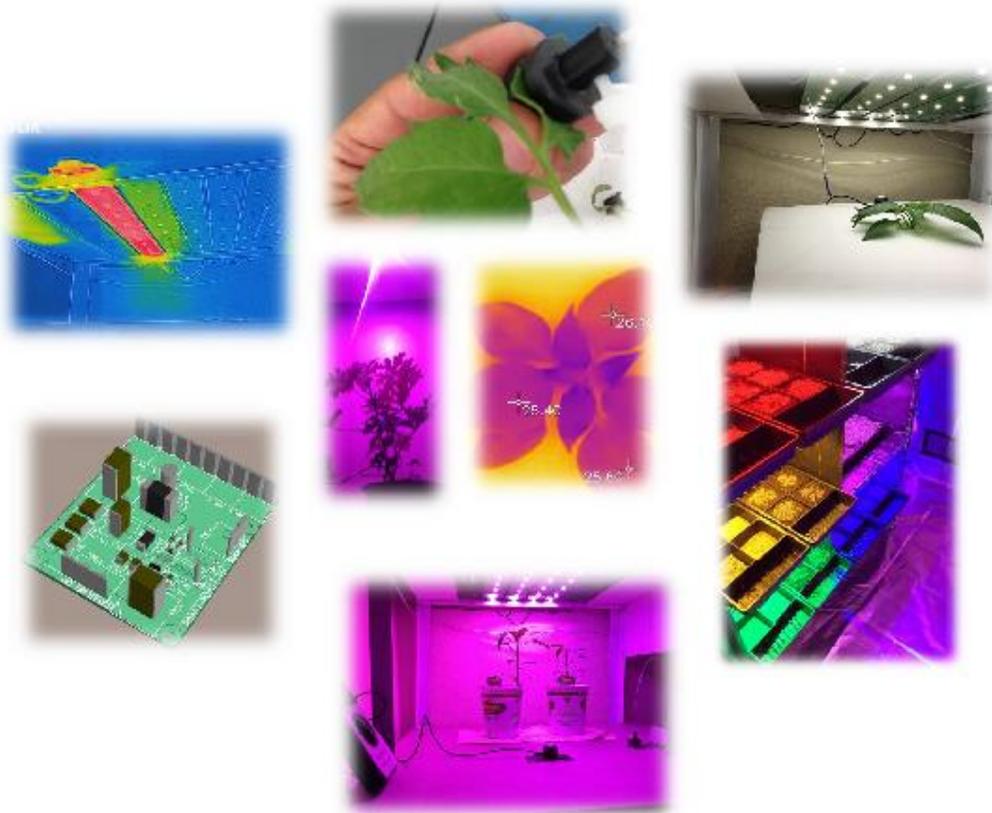
ABSTRACT

Artificial radiation with LED technology allows to implement new production methods by carrying out different studies on the effects that have on the growth of plants by varying the color and intensity of light. For this experiment the absorption spectra was evaluated in quantity and quality (mix-mix of red and blue- and white) of light; additionally, the fluorescence in chlorophyll *a*. The obtained results from the experiment indicate that the quality and intensity that are optimal in the growth stage of the plants are $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of white LED light and $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

Anexo 2

SISTEMA DE RADIACIÓN ARTIFICIAL ADAPTABLE Y MULTIESPECTRAL CON TECNOLOGÍA LED PARA GRANJAS VERTICALES (VERTICAL FARMING) Y FÁBRICA DE PLANTAS (PLANT FACTORY).



Autores:

J. Ernesto Olvera-Gonzalez¹, Nivia Escalante-García, Israel Alvarez Ramirez, Juan Manuel Bernal Medina.

¹Corresponding Author:

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Carretera a la estación de Rincón km1, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. C.P. 20670.

email: e.olvera.itp@gmail.com

Tel: +52 01 449-106-19-15

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

Anexo 3

REPORTE TÉCNICO DEL SISTEMA MECATRÓNICO PARA LA DESINFECCIÓN DE PRODUCTOS AGROALIMENTARIOS CON LUZ UV-A LED.



Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

Anexo 4

SISTEMA MECATRÓNICO SEMI-INDUSTRIAL PARA DESINFECCIÓN DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES POR MEDIO DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA A, B Y C CON TECNOLOGÍA LED.



Autores:

J. Ernesto Olvera-Gonzalez¹, Nivia Escalante-García, Eduardo Flores-Gallegos, Juan Manuel Bernal-Medina, Israel Álvarez-Ramírez.

¹Corresponding Author:

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Carretera a la estación de Rincón km1, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. C.P. 20670.

email: e.olvera.itp@gmail.com

Tel: +52 01 449-106-19-15

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Implementación de un Sistema de Radiación Artificial Multiespectral tipo LED en Modo Pulsado y Continuo
para Granjas Verticales y Fábricas de Plantas

Anexo 5

Introducción al diseño de sistemas de control para procesos industriales por medio de LabVIEW.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES**

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

Israel Álvarez Ramírez

Por haber impartido magistralmente la conferencia
**"INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL PARA PROCESOS
INDUSTRIALES POR MEDIO DE LA LABVIEW"**
a estudiantes participantes del "9° Simposio de la carrera de Ingeniería Industrial"
celebrado los días 06, 07 y 08 de noviembre del presente año.

Aguascalientes, Ags, a 08 de noviembre de 2019.



M.C. JESÚS MARIO FLORES VERDUZCO
Director

