



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL
DEL AGUA.**

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MINI-FÁBRICA DE
PLANTAS: EFICIENCIA HÍDRICA, NUTRICIONAL Y
ENERGÉTICA BAJO DISTINTOS FOTOPERIODOS Y
VELOCIDADES DE FLUJO DE AIRE**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

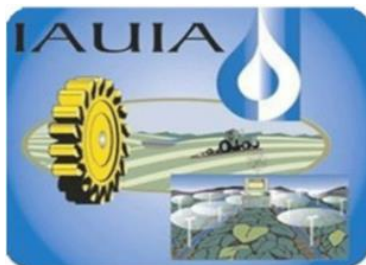
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Presenta:

FERNANDO SALINAS PANIAGUA

Bajo la supervisión de:

DRA. RAQUEL SALAZAR MORENO



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2025

**DISEÑO Y EVALUACION DE UNA MINI-FABRICA DE PLANTAS:
EFICIENCIA HIDRICA, NUTRICIONAL Y ENERGETICA BAJO
DISTINTOS FOTOPERIODOS Y VELOCIDADES DE FLUJO DE AIRE**

Tesis realizada por el C. Fernando Salinas Paniagua bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERIA


DIRECTOR: _____

DRA. RAQUEL SALAZAR MORENO


CODIRECTOR: _____

DR. JOSÉ ERNESTO OLVERA GONZÁLEZ


ASESOR: _____

DR. EFRÉN FITZ RODRÍGUEZ


ASESOR: _____

DR. JORGE FLORES VELÁZQUEZ

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades y Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico para efectuar mis estudios de posgrado.

A la universidad Autónoma Chapingo y al posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), por concederme la oportunidad realizar mis estudios de posgrado.

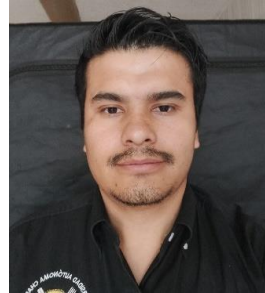
A mi directora de tesis, Dra. Raquel Salazar Moreno por su indispensable apoyo conocimiento y su valioso tiempo que me dedico para guiarme en mi trabajo de investigación.

A mi comité, Dr. José Ernesto Olvera, Dr. Efrén Fitz Rodríguez y Dr. Jorge Flores Velázquez, por su valioso tiempo en la revisión y aprobación de mi proyecto aportándome su valioso conocimiento y experiencia.

Al centro de investigación CIISCINASyC y a su coordinador el M.C Luis Tonatiuh Castellanos Serrano que me permitieron el acceso a herramientas y tecnologías con las que se me facilito trabajar mi proyecto de investigación.

A mis amigos y compañeros que me han prestado un gran apoyo y grandes experiencias.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos Personales

Nombre: Fernando Salinas Paniagua

Fecha de nacimiento: 6 de octubre de 1996

Lugar de nacimiento: Cortázar, Guanajuato

CURP: SAPF96100HGTLNR08

Profesión: Ingeniero Mecánico Agrícola

Cedula Profesional: 13381928

Desarrollo académico

Bachillerato: SABES loma de Zempoala, Yuriria
Guanajuato

Licenciatura: Ingeniería Mecánica Agrícola,
Universidad Autónoma Chapingo

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iii
DATOS BIOGRÁFICOS	iv
CONTENIDO	v
LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMEN GENERAL	xi
GENERAL <i>ABSTRACT</i> ¹	xii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	13
1.1. Objetivo general	15
1.2. Objetivo específico	15
1.3. Estructura tesis	16
1.4. Referencias	16
2. REVISIÓN DE LITERATURA	18
2.1. Panorama Histórico de las PFALs	18
2.2. PFALs en zonas urbanas	18
2.3. Panorama en México	19
2.4. PFAL	20
2.4.1. Iluminación LED	20
2.4.2. Sistemas de riego	22
2.4.3. Sistema de control del ambiente aéreo	24
2.5. Cultivo de lechuga	27
2.6. Referencias	29
3. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA, NUTRIENTES Y ENERGÍA EN UNA MINI-PFAL, BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE VELOCIDAD DEL FLUJO DE AIRE Y FOTOPERIODO	33
Resumen	33
Abstract	34
3.1. Introducción	35
3.2. Materiales y métodos	38

3.2.1.	Experimentos con velocidades de flujo de aire.....	39
3.2.2.	Experimento de fotoperiodos.....	42
3.2.3.	Metodología general	42
3.3.	Resultados y discusión.....	46
3.3.1.	Variables morfológicas	46
3.3.2.	Uso de recursos	48
3.3.3.	Análisis nutrimental	49
3.4.	Conclusiones	53
3.5.	Referencias	54
4.	DISEÑO DE UNA MINI-PFAL PARA AMBIENTES URBANOS.....	57
	Resumen	57
	Abstract.....	58
4.1.	Introducción	59
4.2.	Materiales y métodos	59
4.2.1.	Subsistema estructural.....	61
4.2.2.	Subsistema de Fertirriego	62
4.2.3.	Subsistema de iluminación artificial	64
4.2.4.	Subsistema de ventilación y recirculación de aire.....	65
4.2.5.	Subsistema de instrumentación para monitoreo y control	
	66	
4.3.	Resultados	79
4.4.	Conclusiones	81
4.5.	Referencias	82
	ANEXO A: Cuadro relación de precios material	84
	ANEXO B: Diagrama Electrónico	86
	ANEXO C: Vistas Controlador	87
	ANEXO D: Vistas Explosionada Controlador	88

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1. Estructura general de los ciclos de producción, sus tratamientos y fechas en las que se llevaron a cabo	38
Cuadro 3.2. Comparación de variables morfológicas de crecimiento de lechuga 28 días después del trasplante para el ciclo de producción C1..	46
Cuadro 3.3. Variables morfológicas de crecimiento de lechuga a los 28 días después del trasplante correspondiente a los ciclos de cultivo C2 y C3	47
Cuadro 3.4. Comparación de variables morfológicas de crecimiento de lechuga 28 días después del trasplante correspondiente a los tratamientos de fotoperiodo:	48
Cuadro 3.5. Consumo energético de los ciclos de producción	48
Cuadro 3.6. Comparación del uso de recursos durante tres ciclos de producción de lechuga, bajo diferentes velocidades de viento (C2 y C3) y un bajo diferentes fotoperiodos (C4).....	49
Cuadro 3.7. Comparaciones medias en la concentración de nutrientes en las hojas de lechuga 28 días después del trasplante correspondiente al ciclo de producción C2.....	50
Cuadro 3.8. Comparación de medias en la concentración de nutrientes en la lechuga 28 días después del trasplante correspondiente al ciclo de producción C4 (tratamientos de fotoperiodo).....	50
Cuadro 3.9. Concentración de nutrientes en la solución nutritiva para los ciclos de producción C2 y C4.....	52
Cuadro 3.10. Concentración de nutrientes en el tejido de la hoja para los ciclos C2 y C4	52
Cuadro 4.1. Características de los sensores seleccionados para el módulo sensor	68
Cuadro 4.2. Relación del costo de los materiales y componentes de fabricación, las categorías se encuentran desglosadas en el ANEXO A:	
Cuadro relación de precios material	80
Cuadro 4.3. Costos para un ciclo de producción de Lechuga Mantequilla en MXN	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. a) Módulo mini-PFAL y b) Vista en planta de la distribución de plantas en un nivel.	39
Figura 3.2. Distribución 2D de la intensidad luminosa a 30 cm de la fuente de iluminación en el módulo de germinación (datos proporcionados por el Instituto Tecnológico Pabellón de Arteaga)	41
Figura 3.3. Distribución de ventiladores para el tercer ciclo de producción (C3).....	42
Figura 3.4. Distribución 2D de la intensidad de luz a diferentes distancias de la fuente: (a) a 30 cm, (b) a 20 cm, (c) a 10 cm.	43
Figura 3.5. Calidad espectral proporcionado por las lámparas LED. (Fuente: Instituto Tecnológico Pabellón de Arteaga)	44
Figura 3.6. Concentración promedio de nutrientes en tejido foliar de Lactuca sativa L. var. francesa por tratamiento y muestreo para ciclo de cultivo C2	51
Figura 3.7. Concentración promedio de nutrientes en tejido foliar de Lactuca sativa L. var. francesa por tratamiento y muestreo para ciclo de cultivo C4.	51
Figura 4.1. Diagrama esquemático de los subsistemas en la mini-PFAL 1) en azul: sistema de riego; 2) en rojo : sistema de sensores; 3) en verde : entradas de aire y los extractores; 4) en naranja: lámparas LED, 5) en amarillo : ventiladores internos; 6) en negro: controlador principal	60
Figura 4.2. Render 3D del módulo mini-PFAL	61
Figura 4.3. Estructura principal de la mini-PFAL.....	62
Figura 4.4. Componentes del subsistema de fertirriego en el módulo mini-PFAL.....	63
Figura 4.5. a) Estructura principal del módulo mini-PFAL en conjunto con el arreglo de lámparas b) y c) ejemplo visual de la relación de colores de LED ´s de las lámparas comerciales de la empresa Hitekgro (fuente: recuperadas de led grow light plant light)	64

Figura 4.6. Distribución de intensidad de radiación PAR a 20 cm de la fuente	65
Figura 4.7. Ubicación de ventiladores de flujo de aire horizontal	65
Figura 4.8. Esquema de entradas y salidas para ventilación forzada con sus principales componentes.....	66
Figura 4.9. Esquema del diagrama eléctrico y electrónico del controlador principal para el módulo mini-PFAL	67
Figura 4.10. Diagrama Eléctrico / Electrónico del subsistema de potencia	67
Figura 4.11. Diagrama de conexión de un módulo sensor individual.....	69
Figura 4.12. Diagrama eléctrico y electrónico de la etapa de distribución y actuadores.	70
Figura 4.13. Diagrama electrónico del controlador principal	70
Figura 4.14. Esquema del diseño de PCB	71
Figura 4.15. PCB fabricada de manera manual a) Primera etapa: capa de pintura con el diseño de la PCB, b) Segunda etapa: proceso del baño en cloruro férrico y limpieza, c) PCB terminada vista posterior, d) PCB terminada vista frontal.....	72
Figura 4.16. Vistas del Controlador principal con todos los componentes conectados	73
Figura 4.17. Diferentes perspectivas del controlador principal construido y sus componentes, a) Vista frontal pantalla táctil, b) Vista trasera conectores, c) Vista lateral izquierda, acceso al reloj RTC y la tarjeta micro SD y d) Vista frontal sin tapa, pantalla táctil y conexión con PCB.....	74
Figura 4.18. Diagrama de flujo del código de programación.....	75
Figura 4.19. Imagen de la interfaz táctil , sus diferentes variantes a) Mas de un sensor conectado, b) Un solo sensor conectado y c) ningún sensor conectado	76
Figura 4.20. Pantalla de ajustes para los módulos a) configuración individual y b) configuración general.....	77

Figura 4.21. Pantallas de ajustes individuales a) Ajuste del Riego, b)	
Ajuste del Periodo de luz, c) Ajuste de la potencia de los ventiladores y d)	
Opción de volver a hacer el Test	78
Figura 4.22. módulo mini-PFAL terminado	79
Figura 4.23. Distribución de costos de un módulo mini-PFAL	80

RESUMEN GENERAL¹

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MINI-FÁBRICA DE PLANTAS: EFICIENCIA HIDRICA, NUTRICIONAL Y ENERGETICA BAJO DISTINTOS FOTOPERIODOS Y VELOCIDADES DE FLUJO DE AIRE

La creciente demanda en alimentos ha impulsado el desarrollo de sistemas de producción sustentables enfocados al uso eficiente de recursos y a una reducción en la emisión de contaminantes. En este sentido las PFALs (*Plant Factories with Artificial Lighting*) juegan un papel esencial, ya que son sistemas de cultivo en ambiente controlado que permiten una producción intensiva y estable con una mayor eficiencia en el uso de recursos mediante el control preciso de los factores ambientales. En este trabajo se diseñó un módulo mini-PFAL orientado a la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L. var. francesa) adaptado para entornos urbanos en donde no se tienen las condiciones para establecer algún tipo de cultivo. Se realizaron experimentos para evaluar el efecto de diferentes velocidades de flujo de aire (0.0, 0.5, 0.9, y 1.4 m s⁻¹) sobre el cultivo, además de distintos fotoperíodos con la mismo Integral de luz diaria (DLI), pero dividido en subperiodos (16h/8h, 5h 20 min /2h 40 min, 8 h/4h, luz/oscuridad) sobre rendimientos, uso de recursos (agua/energía) y contenido nutrimental en hoja (N, P, K, Ca, Mg, B). El módulo tiene una capacidad de 81 con un costo de producción de \$15 MXN por cada planta; el costo total de fabricación únicamente de materiales y componentes fue de casi \$26 mil MXN. Los resultados indican que proporcionar un flujo de aire a una velocidad entre 0.9 a 1.4 m s⁻¹ sobre el dosel de la planta mejora los rendimientos en promedio un 18 % con respecto a un flujo nulo; El fotoperíodo correspondiente a 8h/4h favoreció un aumento del 17.66 % en área foliar y 25.25 % en peso fresco con respecto a 16h/8h. El trabajo demostró la viabilidad técnica del módulo mini-PFAL como herramienta de investigación y producción urbana, y plantea recomendaciones para optimizar su viabilidad económica.

Palabras Clave: sustentabilidad, lechuga, agricultura urbana, ventilación forzada, LED.

¹ Tesis de Maestría en Ingeniería, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua
Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Fernando Salinas Paniagua
Directora de Tesis: Raquel Salazar Moreno

GENERAL ABSTRACT¹

DESIGN AND EVALUATION OF A MINI-PLANT FACTORY: WATER, NUTRITIONAL, AND ENERGY EFFICIENCY UNDER DIFFERENT PHOTOPERIODS AND AIRFLOW VELOCITIES

The growing demand for food has driven the development of sustainable production systems, focuses on efficient resource use and reduce pollutant emissions. In this context, PFALs (Plant Factories with Artificial Lighting) play an essential role as controlled-environment cultivation systems that enable intensive and stable production through precise control of environmental factors, resulting in higher resource-use efficiency. In this study, a mini-PFAL was designed, built and evaluated for the production of Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Francesa*) in urban environments. Experiments were conducted to evaluate the effect of different airflow velocities (0.0, 0.5, 0.9, and 1.4 m s⁻¹) on crop performance, as well as different photoperiods with the same daily light integral (DLI), but divided into sub-periods (16 h/8 h, 5 h 20 min/2 h 40 min, and 8 h/4 h light/dark), on yield, resource use (water/energy), and leaf nutrient content (N, P, K, Ca, Mg, B). The module has a capacity of 81 plants, with a production cost of \$15 MXN per plant; the total cost of materials and components for fabrication was approximately \$26,000 MXN. The results indicate that providing airflow between 0.9 and 1.4 m s⁻¹ over the plant canopy improves yields by an average of 18% compared with no airflow. The photoperiod of 8 h/4 h increased leaf area by 17.66% and fresh weight by 25.25% compared with the 16 h/8 h treatment. This work demonstrates the technical feasibility of the mini-PFAL module as both a research tool and an urban production system, and provides recommendations to enhance its economic viability.

Keywords: sustainability, lettuce, urban agriculture, forced ventilation, LED

¹ Tesis de Maestría en Ingeniería, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua
Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Fernando Salinas Paniagua
Directora de Tesis: Raquel Salazar Moreno

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Uno de los desafíos más grandes a los que se enfrenta la agricultura, es la creciente demanda de productos agrícolas atribuida principalmente al crecimiento poblacional, al incremento en el consumo de carne y lácteos y al uso de biocombustibles (Ray *et al.*, 2013). Se estima que para el año 2050 la población mundial supere los 9,000 millones de personas, lo que implica un aumento sustancial en la demanda mundial de cultivos proyectada entre un 70 y un 110 % con respecto del año 2005 (Tilman *et al.*, 2011; Ray *et al.*, 2013; Wise, 2013).

En este contexto la agricultura convencional podría no ser suficiente para satisfacer tal demanda, debido a problemáticas como la disminución de las áreas cultivables, la reducción en el rendimiento de las cosechas ocasionada por la acumulación de sales en el suelo, así como, el deterioro de la capa arable a causa de la erosión, también el aumento de las industrias, la baja disponibilidad de recursos y la contaminación ambiental producto de la actividad humana. (Tambakhe & Gulhane, 2022; Torres & Rojas, 2018; Pennock & Mckenzie 2016) .

En este sentido, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) en colaboración con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), destacó en el informe OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032 (OECD/FAO, 2023), la necesidad de incrementar en un 28 % la producción agrícola en esta década. Este crecimiento deberá lograrse con un enfoque de sustentabilidad y optimización de recursos en la producción de alimentos, promoviendo la adopción de prácticas agrícolas sostenibles, la reducción del desperdicio de alimentos y la mejora en la eficiencia en el uso de los recursos naturales, con el fin de garantizar la seguridad alimentaria y nutricional, preservar el medio ambiente, proteger los recursos y apoyar medios de vida rurales sostenibles.

Por su parte los planificadores urbanos y líderes agrícolas han propuesto a la agricultura urbana como una alternativa para atender la creciente demanda de alimentos al fusionar la producción y el consumo en un solo lugar (Al-Kodmany, 2018). Dentro de este concepto, la agricultura vertical se posiciona

como la más adecuada cuando el área cultivable disponible es limitada y costosa (Kodmany, 2018; Yuan *et al.*, 2022). Además, los avances recientes en tecnologías de invernadero, como la hidroponía, la aeroponía y la acuaponía, han brindado un futuro prometedor a la agricultura vertical impulsando el desarrollo de sistemas más eficientes en el uso de recursos teniendo el potencial para desempeñar un papel fundamental en la sostenibilidad de la producción de alimentos en las zonas urbanas (Al-Kodmany, 2018; Rajendran *et al.*, 2024).

En este contexto, han tomado gran importancia sistemas de producción como las granjas verticales, los sistemas de agricultura en ambiente controlado y las Plant Factory with Artificial Lighting (PFAL) o fábrica de plantas con iluminación artificial. Estos últimos son sistemas de producción cerrados, casi herméticamente aislados y en su mayoría altamente tecnificados, diseñados para proporcionar las condiciones idóneas para el óptimo crecimiento del cultivo mediante el control preciso de factores como la luz, la temperatura, la humedad relativa (% HR) y las condiciones de la solución nutritiva. (Kozai y Niu, 2019).

Estos sistemas de producción han sido desarrollados para entornos en ambientes urbanos en donde se han planteado como oportunidades y nuevos modelos de negocios surgiendo principalmente en países con alta densidad urbana y/o una limitación de tierra cultivable como Japón, Corea y China (Kozai *et al.*, 2015). Sobre este enfoque algunos residentes de zonas urbanas con pocas posibilidades de cultivar han incorporado sistemas de producción como mini-PFAL o micro-PFAL en sus hogares para producir sus propios alimentos; además, de promover un estilo de vida más sostenible al instalar estos sistemas de producción en escuelas, oficinas, pequeños mercados y restaurantes. (Takagaki *et al.*, 2020).

Aunque estos sistemas no sustituirán completamente a la agricultura en campo abierto o a los invernaderos, se espera alivie preocupaciones sociales y ambientales relacionadas con la seguridad alimentaria y la emisión de contaminantes, ya que permiten una producción estable durante todo el año, producto de calidad uniforme y un mayor aprovechamiento en el uso de los

recursos naturales como el agua y los nutrientes (Chavan *et al.*, 2022; Csambalik *et al.*, 2024; Kozai & Niu, 2020).

No obstante, los principales problemas de los sistemas PFAL incluyen los altos costos de inversión, la limitada variedad de cultivos (principalmente de hoja o de tamaño pequeño), los altos costos de terreno en zonas urbanas y los altos costos de producción lo que ha dificultado su adopción generalizada (Csambalik *et al.*, 2024; Kozai & Niu, 2020). A pesar de los desafíos económicos y técnicos las PFAL representan una alternativa prometedora para la producción de alimentos en entornos urbanos. Su desarrollo continuo, impulsado por la innovación tecnológica busca mejorar la sustentabilidad y su eficiencia posicionando estos sistemas como un componente clave para la agricultura del futuro (Csambalik *et al.*, 2024).

En ese sentido, en este trabajo se desarrolla un sistema de producción mini-PFAL para la producción de cultivos como la lechuga, adaptada a entornos urbanos como departamentos o pequeños restaurantes, con un sistema de hidroponía NFT e iluminación artificial para el crecimiento del cultivo. Además, se incorporó una interfaz gráfica de usuario (GUI), que permite la interacción con el módulo mini-PFAL, para fomentar un estilo de vida más sostenible, también se abordarán los desafíos que enfrentan estos sistemas de producción a gran escala, como la necesidad de grandes inversiones en tecnología y equipo, al mismo tiempo, el desarrollo plantea nuevos retos, como la necesidad de garantizar la viabilidad técnica y económica del sistema en un espacio reducido.

1.1. Objetivo general

Diseñar un módulo mini-PFAL para la producción de lechugas y evaluar su desempeño en cuestión de rendimientos, calidad, costos, consumo de recursos y eficiencia energética, para determinar su potencial para contribuir a la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental en las ciudades.

1.2. Objetivo específico

- Diseñar y construir los módulos mini-PFAL para la producción de lechugas en ambientes urbanos.

- Evaluar el efecto de tres velocidades flujo de aire sobre los rendimientos del cultivo de lechuga
- Evaluar el efecto de tres fotoperiodos en el rendimiento de lechuga
- Analizar contenido nutrimental de la lechuga en los tratamientos
- Evaluar la eficiencia de los sistemas de producción mini-PFAL, en términos del uso eficiente del agua y energía.

1.3. Estructura tesis

Este trabajo se estructuró en cuatro capítulos. El primero plantea una introducción general al tema. En el segundo capítulo se expone la revisión de literatura enfocada a los sistemas de producción PFAL, sus inicios, principales subsistemas y componentes y por último el cultivo de lechuga. El tercer capítulo se compone de los diferentes experimentos realizados en estos sistemas de producción enfocados en la evaluación del efecto del flujo de aire a diferentes velocidades y del fotoperiodo con un Daily Light Integral constante pero distribuida en diferentes subperiodos, sobre los rendimientos del cultivo de lechuga. Finalmente, en el cuarto capítulo se expone el desarrollo tecnológico de un módulo mini-PFAL enfocado con un enfoque hacia un entorno urbano donde no se tienen las condiciones para establecer cultivos.

1.4. Referencias

- Al-Kodmany, K. (2018). The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City. *Buildings*, 8(2), 24. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
- Chavan, S. G., Chen, Z.-H., Ghannoum, O., Cazzonelli, C. I., & Tissue, D. T. (2022). Current Technologies and Target Crops: A Review on Australian Protected Cropping. *Crops*, 2(2), 172-185. <https://doi.org/10.3390/crops2020013>
- Csambalik, L., Gál, I., Madaras, K., Tóbiás, A., & Pusztai, P. (2024). Beyond Efficiency: The Social and Ecological Costs of Plant Factories in Urban Farming—A Review. *Urban Science*, 8(4), 210. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040210>
- Kozai, T., & Niu, G. (2020). Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In *Plant factory* (pp. 7-34). Academic Press.

- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). (2019). Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. Academic press.
- Kozai, T., Fang, W., Chun, C., Yang, Q., Tong, Y., Cheng, R., ... & Lu, C. (2015). PFAL business and R&D in the world: Current status and perspectives.
- OECD/FAO (2023), OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>.
- OECD. (s. f.). Agriculture and sustainability. Recuperado de <https://www.oecd.org/en/topics/agriculture-and-sustainability.html>
- Pennock, D., & McKenzie, N. (2016). Estado mundial del Recurso suelo.
- Rajendran, S., Domalachenpa, T., Arora, H., Li, P., Sharma, A., & Rajauria, G. (2024). Hydroponics: Exploring innovative sustainable technologies and applications across crop production, with Emphasis on potato mini-tuber <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26823>
- Ray, D. K., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley, J. A. (2013). Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. PloS one, 8(6), e66428. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428>
- Saavedra, G., Corradini, F., & Antúnez, A. (2017). Manual de producción de lechuga. cultivation. Heliyon, 10(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26823>
- Takagaki, M., Hara, H., & Kozai, T. (2020). Micro-and mini-PFALs for Improving the quality of life in urban areas. In Plant factory (pp. 117-128). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00006-6>
- Tambakhe, M. D., & Gulhane, V. S. (2022). An intelligent crop growth monitoring system using IoT and machine learning. International Journal of Health Sciences, 6(S8), 230–241.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Proceedings of the national academy of sciences, 108(50), 20260-20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Torres, F., & Rojas, A. (2018). Suelo agrícola en México: retrospectiva y prospectiva para la seguridad alimentaria. Realidad, datos y espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía, 9(3), 137-155.
- Yuan, G. N., Marquez, G. P. B., Deng, H., Lu, A., Fabella, M., Salonga, R. B., ... & Cartagena, J. A. (2022). A review on urban agriculture: technology, socio-economy, and policy. Heliyon, 8(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11583>
- Wise, T. A. (2013). Can we feed the world in 2050. A scoping paper to assess the evidence. Global Development and Environment Institute Working Paper, (13-04).

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Panorama Histórico de las PFALs

El concepto de producción de plantas bajo luz artificial, con objetivos comerciales comenzó en Japón a mediados de 1970. En 1980 en Estados Unidos se incorporó el término PFAL para sus instalaciones donde producían cultivos de hoja bajo la técnica hidropónica de flujo profundo (DFT) y lámparas de descarga de alta intensidad (HID). Pero no fue hasta 1983 cuando se estableció la primera PFAL comercial en la Prefectura de Shizuoka en Japón, seguida de una PFAL establecida en un centro comercial en la Prefectura de Chiba en 1985. En estas se utilizaron como fuente de luz, lámparas de sodio de alta presión. El inconveniente con este tipo de lámparas era que generaban bastante calor, obligando a localizarlas hasta a un metro de distancia de la planta. Esto cambió para 1990 cuando se comenzaron a utilizar lámparas fluorescentes, debido a su alto PAR de salida por Watt, además de permitir una separación a 40 cm de la planta. El siguiente avance en iluminación fue el del uso de lámparas LED en el año de 2005, momento en el cual China había comenzado sus investigaciones en el 2002, posterior a esto más países se sumaron al desarrollo de PFALs, como Corea en 2009 y Taiwán en 2012, dando así un incremento de manera exponencial en la cantidad de PFALs a lo largo del mundo impulsado por diversos actores como investigadores, gobiernos y empresas privadas (Kozai *et al.*, 2015).

2.2. PFALs en zonas urbanas

En general, las PFAL se desarrollan en el marco de una agricultura urbana, que busca atender necesidades o demandas específicas debido al escenario que se prevé para el año 2050 con el aumento de población a 9,000 millones de las cuales un 70 % vivirán en zonas urbanas y la reducción de la superficie cultivable (Kozai & Niu, 2020)

Aunque en su mayoría estos sistemas de producción se ven limitados a cierto reducido grupo de cultivos, en su mayoría de hoja como lechuga, espinaca y algunas plantas medicinales debido a sus características específicas, como el tamaño (menor a 30 cm), de ciclos cortos, de alto valor económico y margen de valor agregado debido a calidad y modo de producción. (Kozai & Niu, 2020).

Lo anterior implica que las PFAL no sustituirán el sistema de producción en campo abierto o a la producción en invernaderos (Kozai & Niu, 2019); pero abren nuevos campos y modelos de negocios atendiendo demandas como generación de empleos, seguridad alimentaria en consistencia de anaquel, precio y producción constante a lo largo del año de producción sin alteraciones debido a condiciones ambientales, uso eficiente de áreas libres como bodegas abandonadas y bases en áreas urbanas, uso eficiente de los recursos en regiones con problemas de sequía además de la reducción de contaminantes que se emiten por el transporte y refrigeración del cultivo (Kozai & Niu, 2020).

2.3. Panorama en México

Desde hace varias décadas México se ha ubicado entre los países de América Latina y del mundo con inseguridad alimentaria. La tendencia internacional de urbanización sostenible indujo a la Ciudad de México a adherirse en 2015 al Pacto de Política Alimentaria Urbana de Milán, la firma de dicho instrumento internacional trajo consigo una serie de compromisos que derivaron en la creación del Sistema de Sustentabilidad Alimentaria, del que forma parte la Ley de Huertos Urbanos en la Ciudad de México promulgada en 2017 (Alcántara & Larroa, 2022). La ley establece en un marco general las condiciones y requisitos para la creación y operación de huertos urbanos y periurbanos en la ciudad. También se establecen los mecanismos de coordinación y colaboración entre los distintos actores involucrados en la promoción y el desarrollo de la agricultura urbana (Borbón *et al.*, 2020).

En general las granjas urbanas en la Ciudad de México pueden encontrarse en diferentes tipos de ubicaciones, como azoteas, jardines comunitarios, parques y otros espacios públicos. Estudios recientes revelan que los contaminantes efecto de la actividad antropogénica pueden ser acumulados en el sustrato, agua, aire o masa vegetal siendo presentes metales pesados como arsénico, cadmio, cromo, níquel y plomo en cultivos de lechuga y tomate Cherry en granjas urbanas en la ciudad de México lo que representa un problema grave para la salud de los consumidores (Pérez *et al.*, 2023).

Actualmente en México ya se están desarrollando sistemas de producción tipo PFAL, aunque solo de forma de investigación pues aún a la fecha no se ha establecido una fábrica de plantas de forma comercial.

2.4. PFAL

Las fábricas de plantas con luz artificial, por sus siglas en inglés Plant Factory with Artificial Lighting (PFAL), son sistemas de producción que consisten fundamentalmente en una instalación para la producción vegetal sobre una estructura tipo estante . Esta instalación suele estar completamente cerrada y casi térmicamente aislada (Kozai & Niu, 2019). Sus componentes principales son: estructura base con múltiples estantes de cultivo dispuestos verticalmente, Lámparas LED que suministran la fuente de radiación PAR (radiación fotosintéticamente activa, por sus siglas en inglés) para el desarrollo del cultivo (Kozai & Niu, 2016 & Alrajhi *et al.*, 2023), sistema de suministro de nutrientes utilizando comúnmente técnicas hidropónicas, sistema de acondicionamiento de aire, sistema de circulación de aire y sistema de inyección de CO₂. Estos componentes hacen a las PFALs altamente tecnificados con entornos relativamente bien controlados, dándole las condiciones ambientales ideales para el óptimo crecimiento y desarrollo de los cultivos.

2.4.1. Iluminación LED

Como se mencionó anteriormente la iluminación en las PFALs comenzó con las lámparas de descarga de alta intensidad (HID), en particular las lámparas de sodio de alta presión (HPS). Posterior a esto se utilizaron lámparas fluorescentes, por último y hasta la fecha las lámparas LED (Light Emitting Diode) (Kozai *et al.*, 2015). La evolución de las lámparas marcó diferentes etapas en las PFAL ya que dependiendo del tipo de lámpara se realizaba el diseño de las PFAL. En cuanto a la evolución de las lámparas LED, prácticamente las más utilizadas hoy en día. En sus inicios eran solo una herramienta experimental, limitada en muchos aspectos como espectros limitados, altos costos y de difícil fabricación. Con los avances tecnológicos, paso de ser una herramienta experimental a convertirse en una tecnología viable y escalable para la horticultura debido a la posibilidad de modificar el espectro (Morrow, 2008).

La iluminación es uno de los factores ambientales más importantes para el crecimiento y desarrollo del cultivo. Al ser un factor que sustituye completamente la radiación solar, básicamente la luz influye en las plantas de dos maneras: proporcionando energía y como medio de información, en el primer caso la energía luminosa es capturada por la planta, una proporción de esta se convierte en energía química (carbohidratos) a través de la fotosíntesis, y una mayor cantidad de la energía se convierte en energía térmica (Niu, 2019).

Como medio de información la luz participa en la regulación de varios procesos de crecimiento y desarrollo, como la foto morfogénesis y el fotoperiodismo. Esto a través de los fotorreceptores de las plantas que proporcionan información sobre cambios sutiles en la composición de la luz en el ambiente de crecimiento y controlan respuestas fisiológicas y morfológicas independientemente de la fotosíntesis (Niu, 2019; Vereshchagin *et al.*, 2024)

En general, la luz en una PFAL varía en al menos tres aspectos, calidad, cantidad y duración (Niu, 2019). La calidad se refiere al espectro de luz que se le proporciona a la planta, la cual tiene un efecto directo en su morfología y fisiología. En campo abierto, de la radiación que viene del sol solo una parte se considera útil para las plantas denominada como Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) la cual comprende un rango del espectro electromagnético comprendida entre 400 y 700 nm, casi la del espectro visible (Noriega *et al.*, 2021). En cambio, en las PFAL normalmente se utilizan lámparas LED con emisiones seleccionables de espectro de acuerdo con la etapa y cultivo que estamos produciendo (Mitchell *et al.*, 2015), el cual se modifica con el arreglo de los LED, Rojo (~620-750 nm), Verde (~495-570 nm) y Azul (~450 – 495 nm) (Pennisi *et al.*, 2019). Siendo comúnmente más utilizadas combinaciones de Rojo y Azul en diferentes proporciones debido al incremento en la eficiencia de la producción (Pennisi *et al.*, 2019).

En cuanto a la cantidad o intensidad de radiación PAR esta se refiere a la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (μmol) por unidad de área (m^2) por unidad de tiempo (s) en el rango del espectro electromagnético de 400 y 700

nm.(Niu, 2019; Noriega *et al.*, 2021). Otra medida utilizada es la cantidad de PAR proporcionada en un día o DLI (Daily Light Integral) con unidades $\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ estando muy relacionada con el tercer aspecto, la duración o fotoperiodo. El cual es básicamente la cantidad de horas que la planta recibe luz durante un día. Estos dos aspectos son componentes clave en la regulación del crecimiento, desarrollo y valores nutricionales de la planta, por ejemplo, el aumento de PPFD promueve la acumulación de carbohidratos y mejora la tasa neta de fotosíntesis, mientras que el aumento del fotoperiodo permite el incremento en el peso fresco de la lechuga, azúcares solubles y ácidos orgánicos (Yan *et al.*, 2019; Sumi *et al.*, 2025). Debido a todo esto la calidad, cantidad y duración dependen de cada cultivo, de su etapa y de su producto a obtener resaltando la facilidad que en las PFAL con el uso de LEDS ofrecen para modificar estos aspectos (Vereshchagin, et al 2024).

2.4.2. Sistemas de riego

En las PFALs las plantas típicamente son producidas en sistemas hidropónicos o aeropónicos que, comparado con la agricultura convencional en suelo, el agua y nutrientes puede ser controlado con gran precisión permitiendo el uso completo de los nutrientes disponibles y a través de un sistema de captación y reciclado de agua su gasto o desperdicio se ve significativamente reducido. Más de un 90 % en comparación con el gasto de agua en la agricultura tradicional (Jaeger, 2024; Regmi *et al.*, 2024).

Aeroponía

Este es un método de riego y crecimiento de plantas en condición libre de suelo y sustrato, en donde las raíces de la planta se encuentran suspendidas en el aire y son rociadas con pequeñas partículas de solución nutritiva. Lo que mejora el uso eficiente del agua y la oxigenación en la zona radicular, obteniendo así ventajas como tasas de crecimiento más rápidas, mayores rendimientos de cultivo y una mayor eficiencia de los recursos (Garzón *et al.*, 2023; He *et al.*, 2025). La mayor desventaja de estos sistemas es la ineficiencia en la fijación de nitrógeno, resultando en la poca disponibilidad de nutrientes y un aumento en el estrés de las plantas debido a la nebulización incontrolada (Qureshi, 2025). Además, detalles técnicos, pues las

instalaciones con este sistema de riego son más complejas y a menudo deben ser más tecnificadas (Eldridge *et al.*, 2020).

En general el sistema para pulverizar la solución nutritiva que ofrece mejores resultados es el de alta presión que consiste básicamente en forzar a los líquidos a pasar a través de un orificio diminuto generando tamaño de partículas entre 10-100 μm , su desventaja es el alto costo de los sistemas por otro lado el sistema de baja presión es mucho accesible y su uso dependerá de la finalidad del sistema y por otro lado existe la atomización ultrasónica que usa vibraciones a alta frecuencia que genera partículas extremadamente finas aunque su uso por ahora es limitado a investigaciones (Eldridge *et al.*, 2020; Qureshi, 2025; Salma, S. B. (2024)).

NFT

Esta técnica es de las más utilizadas en sistemas como granjas verticales y PFALs. El acrónimo NFT significa técnica con película nutritiva (Nutrient Film Technique). Se basa en la recirculación continua o periódica de una proporción adecuada de solución nutritiva que pasa a través de las raíces del cultivo por medio de conductos o tubos cerrados que cuentan con una pendiente para posibilitar la recirculación de nutrientes (Bedoya & Suárez, 2020). Esta técnica de cultivo hidropónico deja como resultado la producción de hortalizas frescas y de alta calidad, promueve una alta tasa de crecimiento (Pastor & Rodríguez-Delfín, 2025). Las raíces permanecen en contacto constante con el agua y elementos minerales que permiten a las plantas obtener el potencial productivo.

Aunque este sistema de riego es bastante simple, se deben considerar factores importantes que pueden afectar los rendimientos. Como la cantidad de agua que circula por los conductos, en general esta película no debe exceder los 3 mm de espesor ya que se puede ver comprometida la oxigenación en la raíz alta (Pastor y Rodríguez-Delfín, 2025). Una oxigenación elevada 8.7 a 9 (mg L^{-1}), sumado a luz artificial puede conducir a mejoras sustanciales en el rendimiento y calidad del cultivo en particular de lechuga (Nitu *et al.*, 2024). Además, otro factor es la tasa de flujo de solución nutritiva que se refleja directamente en la absorción de nutrientes. (Khater & Ali, 2015)

En general los dos sistemas han sido utilizados en las PFAL. La ventaja que tiene el sistema aeropónico a comparación del sistema Hidropónico NFT es el gasto de agua pues este es significativamente menor en sistemas aeropónicos (Regmi *et al.*, 2024), sin embargo, es ampliamente más utilizado el sistema NFT por la facilidad y sencillez de su funcionamiento. Además de utilizar un espacio más reducido para la zona radicular ideal para las granjas verticales y PFALs que se concentran en hacer un uso eficiente de superficie.

Sistemas de alberca profunda (Deep Flow Technique)

El sistema DFT, consiste en hacer circular la solución nutritiva a intervalos de tiempo constantes sobre la raíz de la planta cubriendo una gran parte está, el contenedor ligeramente puede tener una pendiente de 1/100 regulando así el nivel de agua a lo establecido (Son *et al.*, 2020), el parámetro de prioridad a regular es el oxígeno disuelto en la solución nutritiva que se regula en la mayoría de los casos son solo la recirculación siendo una gran ventaja que tiene con otros sistemas no circulantes es la capacidad de proporcionar constantemente solución nutritiva fresca permitiendo mayor densidad de cultivo y producción por área (Vega *et al.*, 2023)

La solución nutritiva permanece lo suficientemente profunda como para cubrir las raíces y normalmente se utiliza una circulación constante para asegurar que el contenido de oxígeno en la zona de las raíces se mantenga adecuado [39]. Un beneficio del DFT en comparación con los sistemas no circulantes es la capacidad de proporcionar constantemente solución nutritiva fresca, lo que permite una mayor densidad de cultivo y producción por área. Existe la necesidad de una forma simplificada de DFT que pueda usarse para cultivar una variedad de cultivos en espacios reducidos. Este sistema DFT simplificado debe ser capaz de cultivar cultivos de alto valor, requerir insumos de agua razonables para un agricultor pequeño y requerir únicamente una circulación que pueda realizarse manualmente sin aporte eléctrico.

2.4.3. Sistema de control del ambiente aéreo

La gran ventaja que se tiene en los PFAL es que son sistemas cerrados y no son tan vulnerables a climas extremos como heladas y granizadas, permitiendo el control de las variables del ambiente aéreo, como humedad

relativa, temperatura del aire, concentración de CO₂ y en investigaciones recientes el flujo de aire, proporcionando con precisión los valores idóneos para cada cultivo, maximizando así los rendimientos.

Temperatura

El factor temperatura influye de diferentes maneras, por ejemplo: se tiene bien establecido que altas temperaturas diurnas y nocturnas disminuyen el contenido de polifenoles y flavonoides, aumentando consecuentemente la amargura y la incidencia de necrosis en los márgenes de hojas jóvenes en desarrollo (Macias-González *et al.*, 2021). Además, acelera el espigado prematuro afectando su comercialización (Kumsong *et al.*, 2023). Esta variable afecta de dos formas directa e indirecta el crecimiento de la planta. El efecto directo es en la superficie de la hoja y la temperatura del aire en general. La temperatura de la hoja determina la tasa de crecimiento del cultivo en mayor medida que la del aire, de forma indirecta es sobre la absorción y transporte de agua y nutrientes a través de las raíces (Ahmed *et al.*, 2020).

Es por esto que es importante monitorear la temperatura del aire, la temperatura de la hoja, la temperatura de la solución nutritiva y según sea el caso la temperatura del sustrato (Niu *et al.*, 2020).

Flujo de aire

El movimiento de aire, además de regular la temperatura, es esencial para el intercambio de gases, proceso indispensable para la fotosíntesis de la planta que mejora los rendimientos, favorece la sanidad del cultivo, previene el Tip-Burn y, además, contribuye a mantener condiciones ambientales uniformes dentro del dosel de las plantas (Peiro *et al.*, 2020; Zhang & Kacira, 2018; Ahmed *et al.*, 2020). Esta mejora se debe a la reducción efecto del flujo de viento sobre la capa límite en las hojas (BL, por sus siglas en inglés), una fina capa de aire adherida a la superficie foliar generada por la fricción del aire. Esta capa actúa como una resistencia a la transpiración y es proporcional a su espesor que influye directamente en el intercambio de gases (Zhang & Kacira, 2018). Cuando la velocidad del aire reduce el grosor de la capa límite, se promueve la transpiración de las hojas, lo que impulsa el flujo de agua por el xilema y, por consiguiente, la absorción de agua y nutrientes por las raíces.

Humedad

La humedad es la medida de la cantidad de vapor de agua presente en el aire atmosférico, la cual se puede expresar de diversas formas siendo la humedad relativa (% HR) la más utilizada. La HR se define como la relación entre la presión parcial de vapor de agua y la presión parcial de vapor de agua en condiciones de saturación, sin embargo, el valor de HR no proporciona información directa sobre la fuerza impulsora de la evaporación y transpiración, por ello se utiliza el déficit de presión de vapor (DPV o VPD por sus siglas en ingles). El DPV es la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión de vapor actual este valor se expresado en términos de presión kPa (kilo Pascal)

El valor del DPV es de suma importancia en los cultivos, ya que las tasas de transpiración y evaporación son proporcionales a este valor, en otras palabras, a altos valores de DPV (baja humedad relativa) la tasa de evaporación en las hojas aumenta, resultando en el cierre de estomas, disminuye la absorción de CO₂ y consecuentemente se detiene la fotosíntesis. En el rango opuesto, cuando DPV es bajo (Alta Humedad Relativa) se reduce la transpiración, llegando a inhibirla, lo que favorece la condensación sobre la superficie foliar. Este aspecto en combinación con la velocidad del aire es crucial debido a su efecto sobre la transpiración y el desarrollo del cultivo. Se ha demostrado que la humedad relativa más adecuada para optimizar la tasa fotosintética en lechuga es aproximadamente de 80 % acompañado de una velocidad de aire de 0.7 (m s⁻¹), condiciones que contribuyen a mantener un balance optimo entre apertura estomática y perdida de agua (Niu *et al.*, 2020; Ahmed *et al.*, 2020; Chia *et al.*, 2022).

Sistema de inyección de CO₂

El dióxido de carbono (CO₂) se encuentra naturalmente presente en la atmósfera, como parte del ciclo de carbono de la tierra a una concentración promedio mundial de 425.48 ppm (partes por millón) (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2025). Aunque esta concentración varía de acuerdo con la hora del día, el lugar y depende de la absorción y respiración de plantas, animales y de la actividad humana, en las plantas estas

asimilan CO₂ durante el proceso de fotosíntesis y liberan CO₂ en el proceso de respiración. Aunque es esencial para la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas este factor probablemente sea el factor menos controlado a precisión en los invernaderos y en las cámaras de crecimiento (Niu *et al.*, 2020).

Generalmente en los invernaderos es donde se realiza un enriquecimiento de CO₂ al aire y se ha demostrado que altas concentraciones de CO₂ aumentan los rendimientos y la acumulación compuestos fenólicos en cultivos de lechuga (Becker & Kläring, 2016). Sin embargo, se ha reportado una disminución en el contenido de clorofila en las hojas además de una disminución de la concentración de minerales en el tejido de la hoja de forma variable para diferentes variedades de lechuga (Singh *et al.*, 2020).

En cuanto a estudios en sistemas PFAL se han desarrollado investigaciones con diferentes concentraciones de CO₂ en cultivos de lechuga desde 800 ± 50 μmol mol⁻¹ hasta 1600 ± 50 μmol mol⁻¹ resultando en incrementos de la tasa promedio de crecimiento de peso seco en 28.76 y 37.55 % y en rendimientos en un 33.65 y 44.16 % comparado con concentraciones normales de CO₂ (Chen *et al.*, 2021). Aunque muchos investigadores aseguran que los mejores rendimientos se obtienen a concentraciones de 800-1000 μmol mol⁻¹ (Wang, *et al.*, 2019; Poudel & Dunn, 2017).

2.5. Cultivo de lechuga

La lechuga es uno de las más cultivadas en sistemas de producción como invernaderos, granjas verticales y PFALs, debido a sus características, como su tamaño, necesidades de luz, ciclo de producción corto y su mayor demanda. La lechuga pertenece a la familia dicotiledónea más grande del reino vegetal, la Asteraceae, conocida anteriormente como Compositae. La lechuga presenta una gran diversidad, dado principalmente por los diferentes tipos de hojas y hábitos de crecimiento de las plantas. Esto ha llevado a diversos autores a distinguir variedades botánicas en la especie, existiendo varias que son importantes como cultivos hortícolas en distintas regiones del mundo, (Saavedra *et al.*, 2017).

La lechuga es un cultivo hortícola que es producido prácticamente en todo el mundo, es una hortaliza de clima frío, con cierta tolerancia a heladas, la

temperatura óptima de crecimiento está entre 15 y 18 °C, la mínima es de 12 °C y la máxima entre 18 y 24 °C. Temperaturas superiores producen deterioro de la lechuga por crear cabezas más sueltas y con tendencia a emisión de tallo floral o “subida”. Sin embargo, estas temperaturas son generales, cada tipo de lechuga, e inclusive variedad, tiene requerimientos propios de temperatura para su crecimiento, (Saavedra *et al.*, 2017).

Las condiciones que tienen mayor influencia en el crecimiento del cultivo, son: fotoperiodo de 16-18h luz y una intensidad luminosa de entre 200-250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; velocidad de aire entre 0.3 a 0.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; temperatura entre 22-25°C, humedad relativa de entre 70-80 %, y concentración de CO₂ entre 1000 - 1500 de $\mu\text{mol mol}^{-1}$; (Ahmed *et al.*, 2020). En conjunto con estas variables también se puede considerar la velocidad de flujo de solución nutritiva en sistemas que utilizan técnicas de hidroponía como NFT siendo recomendado una velocidad de flujo de 1 a 1.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Dalastra *et al.*, 2020). Por lo que para garantizar el óptimo crecimiento es de suma importancia controlar las condiciones siendo la base de ello la correcta obtención de datos por medio de sensores precisos y exactos, bien calibrados y en óptimo funcionamiento.

En cuanto a la nutrición no hay estudios que permitan recomendar con exactitud cuál es la mejor fórmula nutritiva para la producción de lechuga hidropónica en NFT. Los requerimientos y fórmulas nutricionales pueden variar debido a las diferencias de variedades y manejo, por tanto, no existe una solución nutritiva ideal. La literatura al respecto es amplia y dispersa, afirmando que una solución nutritiva a ser utilizada en un cultivo hidropónico depende de la variedad, la estrategia de crecimiento, las condiciones climáticas, el estado del año, la luminosidad y la altitud local de cada país, por lo que es necesaria la adecuación de las fórmulas nutritivas según la región lo que se puede asegurar es que la lechuga inicialmente consume cantidades relativamente pequeñas de nutrientes, pero es muy exigente en nutrientes en la fase final del ciclo (Soto, 2018).

Con el manejo adecuado en nutrición, la calidad de la lechuga puede incrementarse, características tales como tamaño, sabor, turgencia y apariencia. Es importante señalar que normalmente los consumidores le dan

más atención a atributos como la apariencia y la textura, que a los atributos nutricionales (Soto ,2018).

2.6. Referencias

- Ahmed, H. A., Yu-Xin, T., & Qi-Chang, Y. (2020). Optimal control of environmental conditions affecting lettuce plant growth in a controlled environment with artificial lighting: A review. *South African Journal of Botany*, 130, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.018>
- Alcántara Nieves, Nehiby, & Larroa Torres, Rosa María. (2022). La multifuncionalidad de los huertos urbanos en la Ciudad de México. *Espiral (Guadalajara)*, 29(83), 187-229. Epub 26 de septiembre de 2022. Recuperado en 15 de noviembre de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-05652022000100187&lng=es&tlng=es.
- Alrajhi, A. A., Alsahli, A. S., Alhelal, I. M., Rihan, H. Z., Fuller, M. P., Alsadon, A. A., & Ibrahim, A. A. (2023). The effect of LED light spectra on the growth, yield and nutritional value of red and green lettuce (*Lactuca sativa*). *Plants*, 12(3), 463. <https://doi.org/10.3390/plants12030463>
- Becker, C., & Kläring, H. P. (2016). CO₂ enrichment can produce high red leaf lettuce yield while increasing most flavonoid glycoside and some caffeic acid derivative concentrations. *Food chemistry*, 199, 736-745. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.059>
- Bedoya Restrepo, L., & Suárez Velasco, S. (2020). Automatización de la técnica de hidroponía NFT en invernadero, con monitoreo web.
- Chen, D., Mei, Y., Liu, Q., Wu, Y., & Yang, Z. (2021). Carbon dioxide enrichment promoted the growth, yield, and light-use efficiency of lettuce in a plant factory with artificial lighting. *Agronomy Journal*, 113(6), 5196-5206. <https://doi.org/10.1002/agj2.20838>
- Chia, S. Y., & Lim, M. W. (2022, October). A critical review on the influence of humidity for plant growth forecasting. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 1257, No. 1, p. 012001). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33855-z>
- Eldridge, B. M., Manzoni, L. R., Graham, C. A., Rodgers, B., Farmer, J. R., & Dodd, A. N. (2020). Getting to the roots of aeroponic indoor farming. *New Phytologist*, 228(4), 1183-1192. <https://doi.org/10.1111/nph.16780>
- Garzón, J., Montes, L., Garzón, J., & Lampropoulos, G. (2023). Systematic Review of Technology in Aeroponics: Introducing the Technology Adoption and Integration in Sustainable Agriculture Model. *Agronomy*, 13(10), 2517. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102517>
- He, Y., Zhang, X., Wang, T., Tan, X., & Liu, S. (2025). Design of a nutrient solution supply device for a vertical aeroponic cultivation system. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1615927. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1615927>

- Jaeger, S. R. (2024). Vertical farming (plant factory with artificial lighting) and its produce: consumer insights. *Current opinion in food science*, 56, 101145. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101145>
- Khater ESG, Ali SA (2015) Effect of Flow Rate and Length of Gully on Lettuce Plants in Aquaponic and Hydroponic Systems. *J Aquac Res*
- Kozai, T., Fang, W., Chun, C., Yang, Q., Tong, Y., Cheng, R., ... & Lu, C. (2015). PFAL business and R&D in the world: Current status and perspectives.
- Kozai, T., & Niu, G. (2016). Plant factory as a resource-efficient closed plant production system. 289 In *Plant Factory* (pp. 69-90). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-2903.00004-4291>
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). (2019). *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic press.
- Kozai, T., & Niu, G. (2020). Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In *Plant factory* (pp. 7-34). Academic Press.
- Kumsong, N., Thepsilvisut, O., Imorachorn, P., Chutimanukul, P., Pimpha, N., Toojinda, T., ... & Ehara, H. (2023). Comparison of different temperature control systems in tropical-adapted greenhouses for green romaine lettuce production. *Horticulturae*, 9(12), 1255. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121255>
- Mitchell, C. A., Dzakovich, M. P., Gomez, C., Lopez, R., Burr, J. F., Hernández, R., ... & Both, A. J. (2015). Light-emitting diodes in horticulture. *Horticultural reviews: volume 43*, 1-88. <https://doi.org/10.1002/9781119107781.ch01>
- Morrow, R. C. (2008). LED lighting in horticulture. *HortScience*, 43(7), 1947–1950
- National Oceanic and Atmospheric Administration, Global Monitoring Laboratory. (s. f.). Trends in CO₂ — NOAA. Recuperado el 20 de Noviembre 2025 de <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- Nitu, O. A., Ivan, E. Ș., Tronac, A. S., & Arshad, A. (2024). Optimizing Lettuce Growth in Nutrient Film Technique Hydroponics: Evaluating the Impact of Elevated Oxygen Concentrations in the Root Zone under LED Illumination. *Agronomy*, 14(9), 1896. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091896>
- Niu, G., Kozai, T., & Sabeh, N. (2020). Physical environmental factors and their properties. In *Plant factory* (pp. 185-195). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00011-X>
- Niu, G. Light. En T. Kozai, G. Niu, & M. Takagaki (Eds.), (2019). *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production* (2nd ed., pp. 115–128). Academic Press.
- Noriega Gardea, M. M. Á., Corral Martínez, L. F., Anguiano Morales, M., Trujillo Schiaffino, G., & Salas Peimbert, D. P. (2021). Modeling photosynthetically active radiation: A review. *Atmósfera*, 34(3), 357-370. <https://doi.org/10.20937/ATM.52737>

- Pastor, P., & Rodríguez-Delfín, A. (2025). Enhancing the growth, yield and physiological response of two lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars through NFT system optimization. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1639002. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1639002>
- Peiro, E., Pannico, A., Colleoni, S. G., Bucchieri, L., Rouphael, Y., De Pascale, S., ... & Gòdia, F. (2020). Air distribution in a fully-closed higher plant growth chamber impacts crop performance of hydroponically-grown lettuce. *Frontiers in plant science*, 11, 537. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00537>
- Pennisi, G., Orsini, F., Blasioli, S. et al. Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting. *Sci Rep* **9**, 14127 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50783-z>
- Pérez-Figueroa, C. E., Salazar-Moreno, R., Rodríguez, E. F., Cruz, I. L. L., Schmidt, U., & Dannehl, D. (2023). Heavy Metals Accumulation in Lettuce and Cherry Tomatoes Cultivated in Cities. *Polish Journal of Environmental Studies*, 32(3), 2293-2308. <https://doi.org/10.15244/pjoes/157316>
- Poudel, M., & Dunn, B. (2017). Greenhouse carbon dioxide supplementation [superseded].
- Qureshi, W. A., Gao, J., Elsherbiny, O., Mosha, A. H., Tunio, M. H., & Qureshi, J. A. (2025). Boosting Aeroponic System Development with Plasma and High-Efficiency Tools: AI and IoT—A Review. *Agronomy*, 15(3), 546. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030546>
- Regmi, A., Rueda-Kunz, D., Liu, H., Trevino, J., Kathi, S., & Simpson, C. (2024). Comparing resource use efficiencies in hydroponic and aeroponic production systems. *Technology in Horticulture*, 4(1). <https://doi.org/10.48130/tihort-0024-0002>
- Saavedra, G., Corradini, F., & Antúnez, A. (2017). Manual de producción de lechuga. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile. <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40978.pdf>
- Salma, S. B. (2024). Aeroponics: An emerging food growing system in sustainable agriculture for food security. *Int. J. Res. Agron*, 7, 93-97. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i11b.1947>
- Singh, H., Poudel, M. R., Dunn, B. L., Fontanier, C., & Kakani, G. (2020). Effect of greenhouse CO₂ supplementation on yield and mineral element concentrations of leafy greens grown using nutrient film technique. *Agronomy*, 10(3), 323. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030323>
- Son, J. E., Kim, H. J., & Ahn, T. I. (2020). Hydroponic systems. In *Plant factory* (pp. 273-283). Academic Press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00017-2>
- Soto Bravo, F. Producción de lechuga con la técnica de lámina de nutrientes modificada (NFT). Universidad de Costa Rica. <https://hdl.handle.net/10669/86391>

- Sumi, M. J., Jahan, N., Thamid, S. S., Tarik, M. E. I., Hassannejad, S., Rahimi, M., & Imran, S. (2025). LED light effect on growth, pigments, and antioxidants of lettuce (*Lactuca sativa* L.) baby greens. *BMC Plant Biology*, 25(1), 582.
- Vega, I., Bien-Amié, D., Augustin, G., Heiden, W., & Heiden, N. (2023). Intermittent circulation of simplified deep flow technique hydroponic system increases yield efficiency and allows application of systems without electricity in Haiti. *Agriculture & Food Security*, 12(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00422-8>
- Vereshchagin, M., Pashkovskiy, P., & Tarakanov, I. (2024). Adding Phyto-LED Spectrum to White-LED Light Increases the Productivity of Lettuce Plants. *Horticulturae*, 10(8), 795.
- Wang, Y., Zhang, Y. J., Han, J. M., Li, C. H., Wang, R. J., Zhang, Y. L., & Jia, X. (2019). Improve plant photosynthesis by a new slow-release carbon dioxide gas fertilizer. *ACS omega*, 4(6), 10354-10361. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.8b03086>
- Yan, Z., He, D., Niu, G., & Zhai, H. (2019). Evaluation of growth and quality of hydroponic lettuce at harvest as affected by the light intensity, photoperiod and light quality at seedling stage. *Scientia horticulturae*, 248, 138-144.
- Zhang, Y., & Kacira, M. (2018). Air distribution and its uniformity. *Smart Plant Factory: The Next Generation Indoor Vertical Farms*, 153-166. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2_10

3. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA, NUTRIENTES Y ENERGÍA EN UNA MINI-PFAL, BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE VELOCIDAD DEL FLUJO DE AIRE Y FOTOPERIODO¹

Resumen

Las fábricas de plantas con luz artificial (PFALs) son sistemas de producción de cultivos que tienen grandes ventajas con respecto a sistemas de producción convencionales, principalmente por su capacidad de controlar de forma precisa las condiciones del entorno de crecimiento. En este estudio se evaluaron los efectos del flujo horizontal de aire a diferentes velocidades (1.4, 0.9, 0.5 y 0 m s⁻¹), sobre el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* var. *Francesa*) en una mini-PFAL. De igual manera se evaluó el impacto de distintos fotoperíodos (TF1: 16h/8h, TF2: 5h 20 min /2h 40 min y TF3: 8 h/4h, luz/oscuridad) en el rendimiento, uso eficiente de recursos y contenido de nutrientes (N, Ca, Mg, B, P y K) en las hojas. Los resultados mostraron que el flujo de aire mejoró el rendimiento del cultivo, en aproximadamente un 18 % con respecto a las velocidades de viento bajas o nulas (0.5 y 0 m s⁻¹). Además, evidenció un incremento en la concentración de Boro a mayores velocidades. Respecto al fotoperiodo, el tratamiento TF3 presentó un mayor desarrollo de área foliar y peso fresco con un aumento de 17.66 % y 25.25 % con respecto a TF1. Estos resultados contribuyen a la mejora en el diseño de los sistemas mini-PFA, para la producción de lechuga.

Palabras clave: Lechuga, macronutrientes, micronutrientes, luz

¹ Tesis de Maestría en Ingeniería, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad autónoma Chapingo

Autor: Fernando Salinas Paniagua

Directora de Tesis: Raquel Salazar Moreno

3. EFFICIENCY IN WATER, NUTRIENT, AND ENERGY USE IN A MINI-PFAL UNDER DIFFERENT AIRFLOW VELOCITIES AND PHOTOPERIOD CONDITIONS¹

Abstract

Plant Factories with Artificial Lighting (PFALs) are crop production systems that offer major advantages over conventional production methods, mainly due to their ability to precisely control environmental growth conditions. In this study, the effects of horizontal airflow at different velocities (1.4, 0.9, 0.5, and 0 m s⁻¹) were evaluated on the cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* var. Francesa) in a mini-PFAL. Similarly, the impact of different photoperiods (TF1: 16h/8h, TF2: 5h 20min / 2h 40min, and TF3: 8h/4h light/dark) was assessed on yield, resource use efficiency, and nutrient content (N, Ca, Mg, B, P, and K) in the leaves. Results showed that airflow improved crop yield by approximately 18% compared to low or zero wind speeds (0.5 and 0 m s⁻¹). Additionally, higher airflow velocities resulted in an increase in boron concentration. Regarding photoperiod, treatment TF3 presented greater leaf area development and fresh weight, with increases of 17.66% and 25.25% compared to TF1. These results contribute to the improvement of mini-PFAL system designs for lettuce production.

Keywords: Lettuce, macronutrients, micronutrients, light

¹ Tesis de Maestría en Ingeniería, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad autónoma Chapingo
Autor: Fernando Salinas Paniagua
Directora de Tesis: Raquel Salazar Moreno

3.1. Introducción

Una fábrica de plantas con luz artificial (PFAL por sus siglas en inglés) es un tipo de sistema de producción cerrado donde la luz artificial reemplaza la luz solar en el crecimiento del cultivo (Kozai, & Niu, 2016a). Estos sistemas de producción en su mayoría son altamente tecnificados, con entornos relativamente bien controlados que proporcionan las condiciones idóneas para el óptimo crecimiento del cultivo (Kozai *et al.*, 2019). Esto les otorga grandes ventajas sobre los sistemas convencionales tanto en campo abierto como en invernaderos (Kozai, & Niu, 2016b), ya que permiten mejorar la eficiencia de la producción agrícola mediante la regulación de las condiciones ambientales (Haibo *et al.*, 2023), pues, estas no dependen directamente de factores externos, como en los invernaderos, en donde variables como la temperatura del aire, la humedad relativa y la radiación fluctúan en función de la hora del día, estación del año y la nubosidad. (Kozai, & Niu, 2016b).

En contraste, las PFAL al hacer uso de luz artificial tienen un suministro estable de radiación, no solo en términos de intensidad (cantidad), sino también en el espectro (calidad) y fotoperiodo (duración) (Kozai, Niu, & Takagaki, 2016). En las PFALs se puede modificar con facilidad el fotoperiodo. Factor de importancia debido a su impacto directo sobre la fotosíntesis, la acumulación de biomasa y el desarrollo morfológico del cultivo lo que al final se ve reflejado en términos de rendimiento (Kozai, 2018).

En general el fotoperiodo más utilizado es de 16L/8D (luz/ oscuridad, L/D) pues en diversas investigaciones se ha demostrado mejor respuesta por parte de las plantas en comparación de otras combinaciones, por ejemplo, fotoperiodos continuos de 24 horas de luz pueden incrementar la tasa fotosintética y la producción de biomasa, aunque generan estrés fisiológico y desordenes como Tip-Burn (Kozai & Niu, 2016b; Zhen & Bugbee, 2020).

Otros trabajos han evaluado fotoperiodos más cortos (12L/D6, 8L/D y 4L/2D) encontrando en algunos una mayor acumulación de peso fresco y peso seco a corto plazo, pero sin diferencias significativas con fotoperiodos más largos en un periodo de producción más amplio, aunque si con diferencias en el uso los recursos (Li, Zhong, Ji, Wang, & He, 2025). En general esta capacidad de

modificar el fotoperiodo representa una ventaja clave de las PFALs para mejorar rendimientos y el uso eficiente de los recursos con la implementación de un fotoperiodo óptimo.

Las PFAL utilizan las técnicas hidropónicas, como la técnica de película nutritiva (NFT, por sus siglas en inglés), la cual mejora significativamente la eficiencia en el uso del agua, incrementa la calidad del cultivo, la productividad, reduce el área necesaria para la producción, entre otras ventajas (Al-Tawaha *et al.*, 2018). Las técnicas consisten básicamente en mantener en contacto la zona radicular de la planta con una solución de agua y nutrientes, en donde se mantienen regulados bajo un estricto control factores como pH y conductividad eléctrica (Ce) (Baiyin, 2021), de igual forma en recientes estudios se ha remarcado la importancia de la tasa de flujo de solución nutritiva ya que actúa como un estrés positivo debido a que estimula mecánicamente las raíces, promoviendo su crecimiento, mejorando la absorción de nutrientes y, en consecuencia, impulsando el desarrollo general de la planta (Baiyin, 2021).

Otro factor fundamental es el flujo de aire, un adecuado movimiento de aire es esencial para el intercambio de gases, un proceso indispensable para la fotosíntesis y transpiración de la planta y, consecuentemente, para su crecimiento. Además, contribuye a mantener condiciones ambientales uniformes dentro del dosel de las plantas (Ahmed *et al.*, 2020; Peiro *et al.*, 2020; Zhang & Kacira, 2018;). Asimismo, la correcta circulación del aire favorece la sanidad del cultivo, ayudando a prevenir problemas fisiológicos como el Tip-Burn (Peiro *et al.*, 2020). Esta afección se caracteriza por una necrosis en los márgenes de hojas jóvenes en desarrollo (Macias-González *et al.*, 2021) y es una de las principales enfermedades que afectan la producción en las PFAL. El Tip-Burn es provocado por una deficiencia de calcio (Ca^{2+}), la cual puede ser consecuencia de diversos factores, entre ellos: un suministro inadecuado de Ca^{2+} en la solución nutritiva, temperaturas inadecuadas, alta humedad, un periodo de luz o intensidad lumínica incorrectos y, como se mencionó anteriormente, una velocidad del viento inadecuada.

El efecto que tiene la velocidad de flujo de aire es la reducción de la capa límite en las hojas (LBL, por sus siglas en inglés), una fina capa de aire adherida a la superficie foliar generada por la fricción del aire. Esta capa actúa como una resistencia a la transpiración y es proporcional a su espesor que influye directamente en el intercambio de gases (Zhang & Kacira, 2018). Cuando la velocidad del aire reduce el grosor de la capa límite, se promueve la transpiración de las hojas, lo que impulsa el flujo de agua por el xilema y, por consiguiente, la absorción de agua y nutrientes por las raíces. Por lo tanto, regular la tasa de transpiración a niveles adecuados mediante el control del flujo de aire, es fundamental para mantener un estado hídrico y nutricional óptimo en las plantas. Además, la transpiración contribuye a la disipación de la energía absorbida por las hojas hacia la atmósfera en forma de calor latente (Matsuda, 2016).

La velocidad del flujo de aire y la tasa de incremento de Tip-Burn tienen una relación negativa durante la etapa de crecimiento. Sin embargo, la velocidad del flujo de aire debe ser, como máximo, el valor crítico de 1.4 m s^{-1} , de lo contrario, las hojas de lechuga se romperán, lo que reducirá el rendimiento y la calidad de la planta. Según Haibo, et al. (2023) en los experimentos de flujo de aire los umbrales en la etapa de plántula fueron de 0.1 a 0.5 m s^{-1} el umbral de flujo de aire de la etapa de crecimiento fue de 1.1 a 1.4 m s^{-1} . Además, los autores mostraron que la velocidad adecuada del flujo de aire reduce el desorden fisiológico de necrosis marginal de hojas.

En resumen, el movimiento del aire es crucial ya que influye en la transpiración, la fotosíntesis y el rendimiento de los cultivos. Un flujo de aire adecuado mejora el intercambio de gases y favorece la salud de las plantas. Además, combinado con un fotoperiodo óptimo puede incrementar los rendimientos de los cultivos y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos. Es por eso que el objetivo de este trabajo es evaluar diferentes velocidades del flujo de aire, así como el fotoperiodo dentro de una mini-PFAL y su efecto sobre los rendimientos y la eficiencia en el uso del agua y energía para el cultivo de lechuga de la variedad francesa.

3.2. Materiales y métodos

Los experimentos se llevaron a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo con coordenadas de latitud norte 19° 29' 30"y Longitud oeste 98° 53' 18"; con una altitud de 2,262 msnm. Se realizaron cuatro ciclos de producción, y en cada ciclo se implementaron tres tratamientos (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Estructura general de los ciclos de producción, sus tratamientos y fechas en las que se llevaron a cabo

Ciclo	Fechas		Tratamientos
	Trasplanté y cosecha		
C1	9/08/2025 a 6/09/2025		Velocidad de flujo de aire T1- 1.4 m s ⁻¹ ; T2- 0.9 m s ⁻¹ ; T3- 0.0 m s ⁻¹
C2	24/01/2025 a 21/02/2025		Velocidad de flujo de aire T1- 1.4 m s ⁻¹ ; T2- 0.9 m s ⁻¹ ; T4- 0.5 m s ⁻¹
C3	2/05/2025 a 30/05/2025		Velocidad de flujo de aire T1- 1.4 m s ⁻¹ ; T2- 0.9 m s ⁻¹ ;T4- 0.5 m s ⁻¹
C4	30/05/2025 a 27/06/2025		Fotoperiodo TF1- 16 horas luz / 8 horas oscuridad
			TF2- 5 h 20 min luz / 2 h 40 min oscuridad (3 por día)
			TF3- 8 h luz / 4 h oscuridad (2 por día)

Un tratamiento por cada módulo mini-PFAL, los cuales cuentan con tres niveles de producción representando tres repeticiones por tratamiento. Cada nivel cuenta con un área de cultivo de 0.74 m² (1.2 m de largo x 0.62 m de ancho) con una capacidad de 27 plantas distribuidas en 3 tramos de canaletas hidropónicas (Figura 3.1).

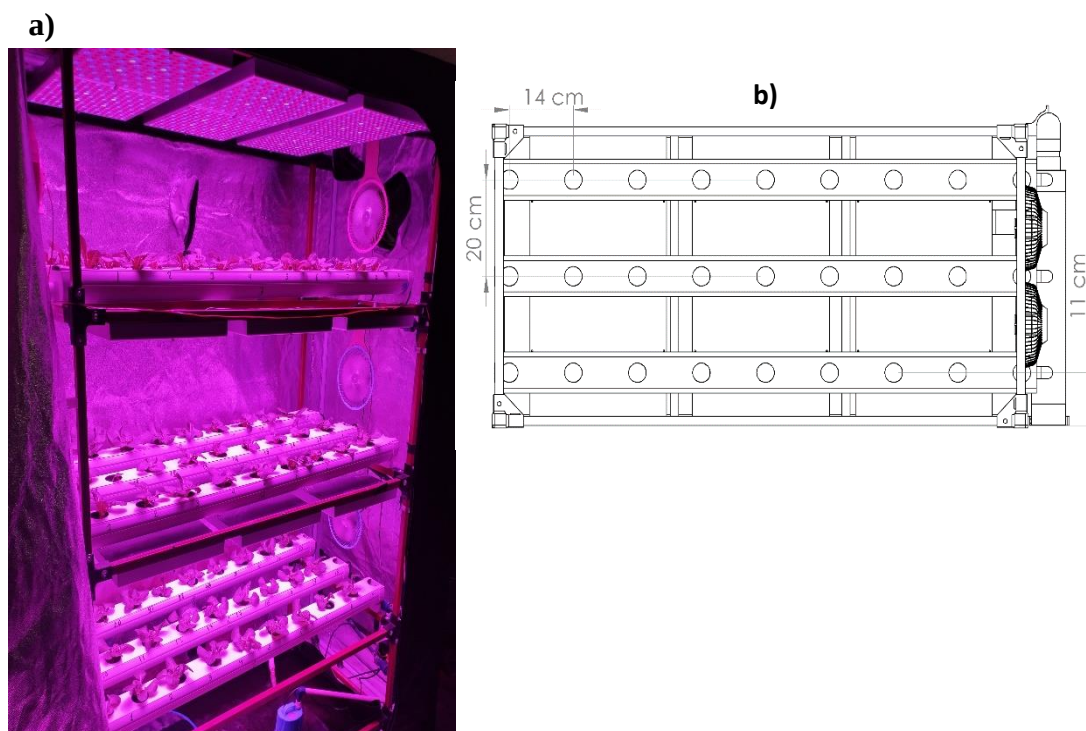


Figura 3.1. a) Módulo mini-PFAL y b) Vista en planta de la distribución de plantas en un nivel.

3.2.1. Experimentos con velocidades de flujo de aire

Hipótesis Experimental: la implementación de un flujo de aire en el dosel de la planta incrementa la tasa de transpiración y, en consecuencia, mejora los rendimientos en peso fresco y seco.

Para el primer ciclo de producción (C1) se experimentó con la velocidad de flujo de aire suministrada por un ventilador de escritorio de 2.5 W de 12 cm de diámetro dispuesto de forma horizontal en cada nivel. para el Tratamiento 1 la potencia del ventilador fue de 100 %, obteniendo velocidades en la parte más cercana al ventilador de 1.4 m s^{-1} . En el Tratamiento 2 se utilizó una potencia de 50 %, con velocidades en la parte más cercana al ventilador de 0.9 m s^{-1} y finalmente para el Tratamiento 3 los ventiladores se dejaron desactivados (0.0 m s^{-1}). Las plántulas utilizadas en este ciclo de cultivo fueron de la variedad Francesa o Mantequilla verde germinadas en espuma fenólica de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$ (altura x largo x ancho), el trasplante se realizó 28 días después de la siembra (9 de agosto 2024).

El segundo ciclo de producción (C2), las condiciones del experimento fueron similares que las del primer ciclo (C1) repitiendo el experimento de velocidad de flujo de aire con los mismos T1 y T2, pero ahora pero ahora como nuevo tratamiento T4 se activaron los ventiladores con velocidades de viento de 0.5 m s^{-1} .

Las plántulas de lechuga utilizadas de la variedad Francesa o Mantequilla verde fueron germinadas a partir de semillas paletizadas del híbrido Emeldia Rz (RIJK ZWAAN, Culiacán, México), con tratamiento fungicida a base de fludioxonil. El proceso de germinación inició el 27 de diciembre de 2024 y terminó con el trasplante a los módulos mini-PFAL el 24 de enero de 2025 (ciclo de 28 días), estas se germinaron en espuma fenólica inerte ($2 \times 2 \times 3.5 \text{ cm}$), completamente saturados con agua, bajo condiciones de completa oscuridad, temperaturas entre $20\text{-}24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa entre 60-75 % durante los primeros 3 días, posterior a esto se pasaron en conjunto con la espuma fenólica a un módulo para producción de plántula con dimensiones en la cama de producción de 0.24 m^2 ($0.49 \text{ m} \times 0.49 \text{ m}$), con capacidad para 289 plántulas separadas a 3 cm.

Durante esta etapa las plántulas fueron mantenidas en condiciones de riego aeropónico intermitente, este consiste en suministrar solución nutritiva por medio de microaspersión directa a las raíces suspendidas en el aire, esto se realizó durante 3 minutos cada 4 horas humedeciendo la espuma fenólica y mejorando el desarrollo radicular. El módulo de germinación suministraba luz artificial con un fotoperiodo de 12 horas, iniciando a las 4 de la tarde y terminando a las 4 de la mañana con intensidades como se muestra en la Figura 3.2

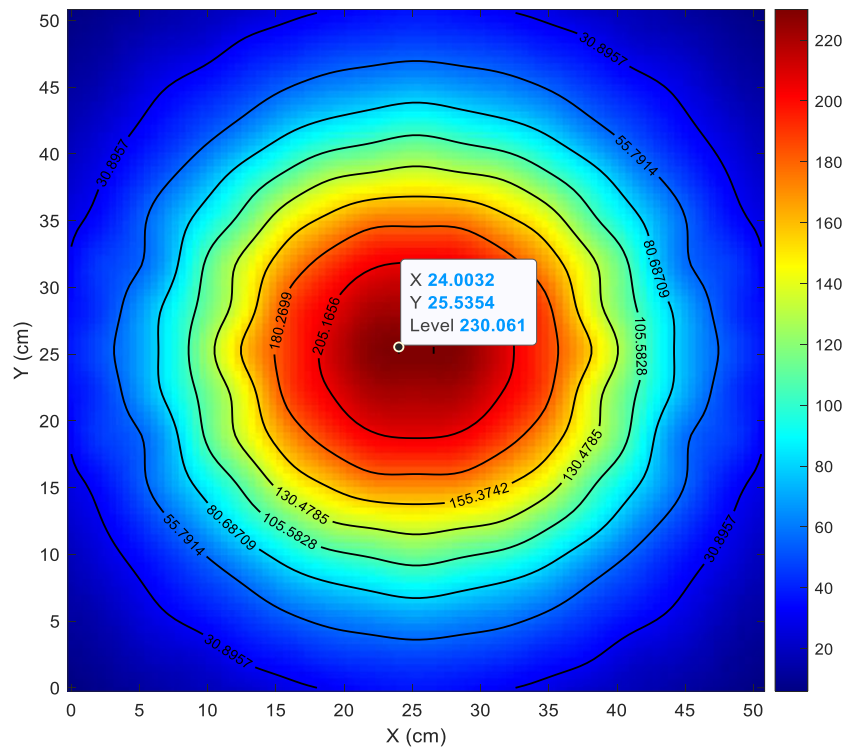


Figura 3.2. Distribución 2D de la intensidad luminosa a 30 cm de la fuente de iluminación en el módulo de germinación (datos proporcionados por el Instituto Tecnológico Pabellón de Arteaga)

Para el tercer ciclo de producción (C3) se volvieron a repetir las condiciones experimentales que en el ciclo C2 (T_1 - 1.4 m s^{-1} ; T_2 - 0.9 m s^{-1} ; T_4 - 0.5 m s^{-1}), sin embargo, en este experimento se agregaron tres ventiladores más, duplicando el de la orilla y agregando otros dos al medio de cada nivel (Figura 3.3). Además de esto, la altura de los ventiladores se ajustó conforme al crecimiento del cultivo. Con esto se mejoró la uniformidad del flujo de aire aplicado a cada nivel de producción, además de evitar la obstrucción del viento por parte de las lechugas cercanas a los ventiladores hacia las lechugas más lejanas como se muestra en la Figura 3.3.

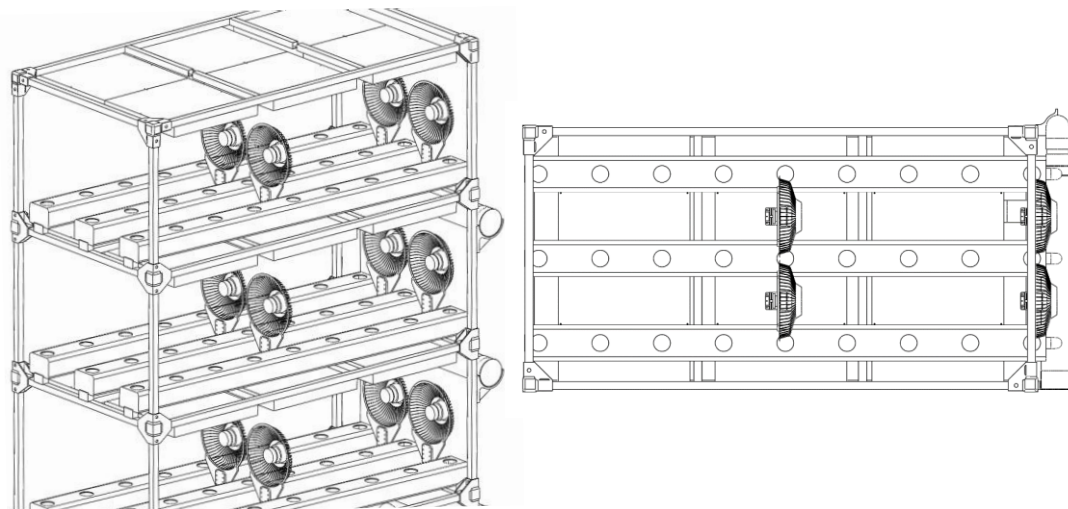


Figura 3.3. Distribución de ventiladores para el tercer ciclo de producción (C3)

3.2.2. Experimento de fotoperiodos

El ciclo de producción C4 correspondió a la evaluación del fotoperiodo, manteniendo constante el Integral de luz diaria (DLI, Daily Light Integral) aplicado a las plantas, el cual con un PPFD a 20 cm de distancia de la fuente de 190 a 240 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con 16 horas de luz al día se obtiene un DLI de 10.94 a 13.82 $\text{mol m}^{-2} \text{día}^{-1}$. Los tratamientos variaron únicamente en cómo fue la distribución temporal de la luz a lo largo del día, TF1 consistió en 16 horas luz y 8 horas oscuridad, siendo tratamiento testigo y con el fotoperiodo más recomendado por diversos autores. TF2 (fotoperiodo dividido en tres bloques: 5 h 20 min luz / 2 h 40 min oscuridad), y TF3 (fotoperiodo dividido en dos bloques: 8 h luz / 4 h oscuridad), estos cambios en el fotoperiodo pueden modificar el ritmo circadiano y la dinámica de acumulación y degradación de almidón, reserva fundamental para sostener el metabolismo nocturno.

3.2.3. Metodología general

Para los cuatro ciclos de producción (C1, C2, C3 y C4) las plántulas de lechuga se trasplantaron a los módulos mini-PFAL, en donde se les hizo circular solución nutritiva bajo la técnica NFT (Nutrient Film Technique) a una tasa de flujo de 1.5 L min^{-1} .

Esta solución nutritiva se estuvo renovando cada semana con la misma proporción de nutrientes y se registró el consumo de agua por semana restando del volumen de agua final el volumen inicial. El riego se programó en ciclos de 25 minutos activado y 5 minutos desactivado, medida adoptada por razones técnicas para proteger el equipo de bombeo.

En cada uno de los módulos se implementaron lámparas LEDs de 30.1 x 30.1 cm de L x A, de 45 W modelo GL225RBW (Hitekgro, Shenzhen China). Se utilizó un arreglo de 6 lámparas por nivel aportando intensidades PPFD de 190 a 240 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e incluso hasta más de 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ dependiendo de la distancia a la fuente (Figura 3.4).

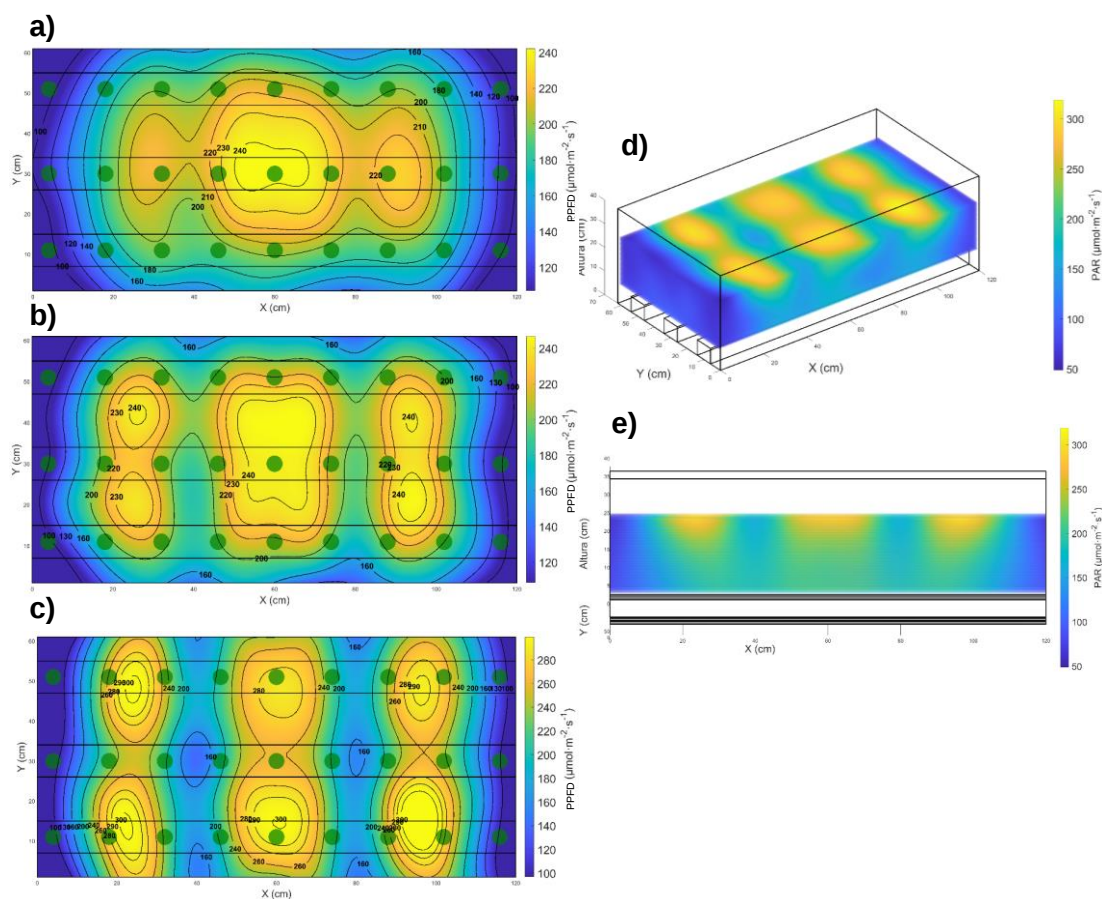


Figura 3.4. Distribución 2D de la intensidad de luz a diferentes distancias de la fuente: (a) a 30 cm, (b) a 20 cm, (c) a 10 cm.

Las lámparas emiten un espectro PAR, con mayor proporción en el rojo y azul (Figura 3.5), correspondiente a un ratio R/B de $2:1 \pm 10\%$.

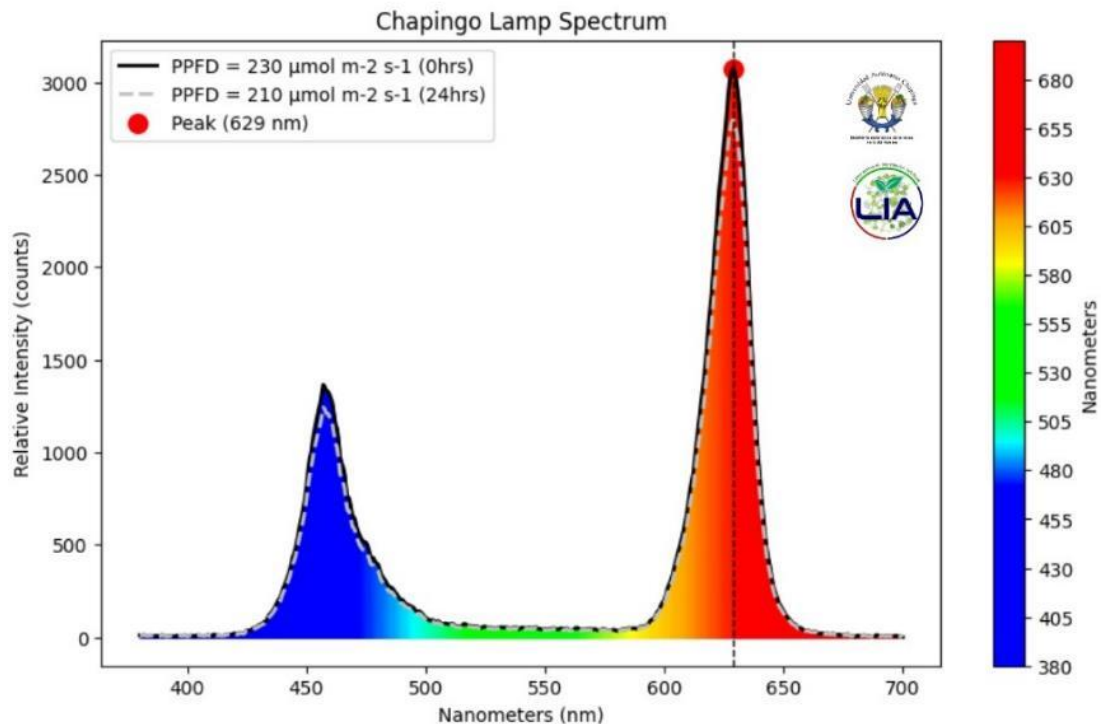


Figura 3.5. Calidad espectral proporcionado por las lámparas LED. (Fuente: Instituto Tecnológico Pabellón de Arteaga)

El fotoperiodo para C1, C2 y C3 fue de 16 horas, dando inicio a las 4 de la tarde y terminando a las 8 de la mañana, esto a causa de las altas temperaturas que pueden alcanzar las lámparas cuando están activadas.

En la solución nutritiva se estuvo monitoreando el pH, la conductividad eléctrica (CE), la temperatura (T) y el oxígeno disuelto (OD) con sensores HANNA (Hanna Instruments, Woonsocket, RI, EE. UU.). Para CE, T y pH se utilizó el sensor HI981420 GroLine Monitor, para OD se utilizó el sensor de oxígeno disuelto HI9147 tomando medidas de forma manual cada cierto periodo de tiempo.

En cuanto al control, se desarrolló una interfaz sencilla por medio de un microcontrolador Arduino ATmega2560 conectado a una pantalla táctil, encargado de mostrar la información referente a los tres módulos mini-PFAL, así como de activar las lámparas, el riego y la ventilación, a este controlador también se le conectaron sensores para monitorear la temperatura y humedad del ambiente en los tres módulos.

Durante los cuatro ciclos de cultivo con duración de 28 días (4 semanas) se tomó una muestra de lechugas cada semana en donde se registraron las variables morfológicas de las lechugas el área foliar se estimó con un integrador de área foliar modelo LI-3100 (LICOR, Lincoln, NE, EE.UU.) Las muestras de hojas de lechuga se secaron en un horno modelo FE-291AD (Felisa, Zapopan, México) durante 48 horas a 69 °C, para obtener el peso seco. Con la muestra seca para los ciclos de producción C2 y C4 se determinó el contenido de Nitrógeno total (Nitratos y Amonio), Boro, Calcio, Magnesio, Potasio y Fosforo en el Laboratorio Nacional de Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal (LANISAF). De igual forma se determinó el contenido de los mismos micro y macronutrientes para la solución nutritiva en la entrada y salida del flujo. La cosecha se llevó a cabo en el 4° muestreo en donde se registró el peso en fresco de todas las lechugas para obtener los rendimientos. Para estimar la eficiencia en el uso del agua (*EUA*) se utiliza la Ecuación 1 propuesta por Langenfeld et al. (2022):

$$EUA = \frac{\text{Masa seca total de las plantas en la cosecha (g)}}{\text{Volumen de agua agregada en la zona de raíz (L)}} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

EUA= Eficiencia en el uso del agua (g L⁻¹)

Para calcular el uso eficiente de energía se determinó el consumo eléctrico de los tratamientos mediante un medidor wattimetro modelo HER-432 (Stereon, Ciudad de México, México). Este dispositivo midió el consumo de energía del módulo mini-PFAL (lámparas, ventiladores, bomba de agua y controlador) durante un día, con el cual se obtuvo la energía total utilizada por ciclo de producción (28 días) y con la Ecuación 2 se calculó el uso eficiente de energía

$$EUE = \frac{\text{Masa seca total de las plantas en la cosecha (g)}}{\text{Energía total utilizada (kW)}} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

EUE= Eficiencia en el uso de la energía (g kW⁻¹).

Para estimar la concentración de nutrientes en la solución nutritiva se necesita multiplicar el valor de la eficiencia en el uso del agua g L⁻¹ por el valor de la

concentración de nutrientes en el tejido como en la Ecuación 3 (Langenfeld *et al.*, 2022)

$$CNS = EUA \frac{\text{g nutriente}}{\text{g masa seca planta}} \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

CNS= Concentración de nutriente en la solución nutritiva (g L⁻¹).

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Variables morfológicas

Se compararon las respuestas de las plantas al tratamiento de velocidad de aire, y se analizaron variables morfológicas de las plantas al momento de la cosecha (Cuadro 3.2 y Cuadro 3.3). Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y de comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Cuadro 3.2. Comparación de variables morfológicas de crecimiento de lechuga 28 días después del trasplante para el ciclo de producción C1.

Trat.	NH	AF (cm ²)	PF (g)	PS (g)	RPF (kg m ⁻²)	RPS (g m ⁻²)
Primer ciclo producción Agosto C1 (peso plántula 3.0 ± 0.54 g)						
T1	45 ± 4 ^a	1799.0 ± 133.3 ^a	117.90 ± 6.48 ^a	6.63 ± 0.36 ^a	12.90 ± 0.79 ^a	726.69 ± 39.94 ^a
T2	45 ± 3 ^a	1683.2 ± 70.3 ^{ab}	122.33 ± 11.02 ^a	6.88 ± 0.62 ^a	13.39 ± 1.20 ^a	753.88 ± 67.88 ^a
T3	45 ± 3 ^a	1394.0 ± 298.0 ^b	91.60 ± 7.75 ^b	5.15 ± 0.43 ^b	10.02 ± 0.84 ^b	564.49 ± 47.79 ^b
CV (%)	8.3	11	7.3	7.3	7.3	7.3

Los valores corresponden al promedio de tres repeticiones por tratamiento. Tratamientos (T1= 1.4 m s⁻¹ ; T2= 0.9 m s⁻¹ ;T3=0.0 m s⁻¹). Valores con letras iguales en la misma columna no representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.5$). NH= Número de Hojas. AF= Área foliar. PF: Peso Fresco. PS= Peso Seco. RPF: Rendimiento en Peso Fresco. RPS: Rendimiento en Peso Seco.

En general no se encontraron diferencias significativas entre T1 y T2 para la mayoría de las variables morfológicas, lo que indica que ambos tratamientos ejercen un efecto similar sobre el crecimiento de la planta. Sin embargo, si hubo diferencias significativas con respecto a T3 con velocidades de viento nulas (0.0 m s⁻¹). En este tratamiento los valores son significativamente inferiores en peso fresco, peso seco y en rendimiento. Tendencia que se mantuvo en los tres ciclos de producción, aunque con variaciones asociadas al peso inicial de plántula. Esto evidencia que para estos sistemas de producción cerrados la falta movimiento de aire afecta negativamente el desarrollo de la lechuga.

Cuadro 3.3. Variables morfológicas de crecimiento de lechuga a los 28 días después del trasplante correspondiente a los ciclos de cultivo C2 y C3

Tratamiento	NH	LH (cm)	AH (cm)	AF (cm ²)	PF (g)	PS (g)	RPF (kg m ⁻²)	RPS (kg m ⁻²)
Segundo ciclo de producción C2 (peso plántula 0.40 ± 0.11 g)								
T1 (1.4 m s ⁻¹)	24 ± 2 ^{ab}	7.06 ± 0.51 ^a	10.00 ± 0.90 ^{ab}	1137.5 ± 230.2 ^a	59.60 ± 1.5 ^a	5.22 ± 0.54 ^{ab}	6.52 ± 0.16 ^a	571.95 ± 59.50 ^{ab}
T2 (0.9 m s ⁻¹)	21 ± 3 ^b	7.50 ± 0.82 ^a	10.50 ± 0.91 ^a	1559.3 ± 293.9 ^a	66.18 ± 4.6 ^a	5.99 ± 0.68 ^a	7.24 ± 0.50 ^a	655.66 ± 74.49 ^a
T4 (0.5 m s ⁻¹)	28 ± 2 ^a	5.94 ± 0.41 ^b	9.07 ± 0.92 ^b	1331.5 ± 201.1 ^a	55.90 ± 11.74 ^a	4.75 ± 0.62 ^b	6.11 ± 1.28 ^a	519.93 ± 68.73 ^b
CV (%)	12.4	9.1	9.2	22.0	12.3	11.9	12.3	11.9
Tercer ciclo de producción C3 (peso plántula 1.18 ± 0.57 g)								
T1 (1.4 m s ⁻¹)	35 ± 4 ^a	10.26 ± 0.58 ^a	8.52 ± 0.50 ^a	1695.3 ± 81.7 ^a	68.57 ± 6.54 ^a	4.47 ± 0.52 ^a	7.50 ± 0.71 ^a	489.28 ± 57.72 ^a
T2 (0.9 m s ⁻¹)	33 ± 3 ^a	8.91 ± 0.07 ^b	7.77 ± 0.59 ^{ab}	1551.6 ± 132.4 ^a	63.55 ± 6.49 ^a	4.06 ± 0.40 ^b	6.95 ± 0.71 ^a	444.40 ± 44.47 ^b
T4 (0.5 m s ⁻¹)	25 ± 3 ^b	8.06 ± 0.15 ^c	7.49 ± 0.45 ^b	997.5 ± 78.9 ^b	47.18 ± 6.52 ^b	3.34 ± 0.52 ^c	5.16 ± 0.71 ^b	365.59 ± 57.22 ^c
CV (%)	11.6	4.2	6.5	7.0	10.9	12.2	10.9	12.2

Valores con letras iguales en la misma columna no representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.5$). NH= Número de Hojas. LH= Largo de hojas. AH= Ancho de Hojas. AF= Área foliar. PF= Peso Fresco. PS= Peso Seco. RPF: Rendimiento en Peso Fresco. RPS: Rendimiento en Peso Seco.

Analizando el Cuadro 3.3 con el T4 con menor desempeño en respuesta a la baja velocidad de flujo de aire se refuerza el conocimiento del efecto positivo que tiene un flujo de aire en el desarrollo del cultivo de lechuga, mejorando el rendimiento en promedio de un 18 %. Mientras que la incorporación de ventiladores representa un extra en el uso de energía de máximo 4.81 % y en los gastos de producción representa un incremento máximo de 3.95 %, dejando en evidencia que un flujo de aire con valores adecuados, es necesario para aumentar la eficiencia de estos sistemas de producción.

Es importante señalar que los diferentes ciclos de producción tuvieron plántula en diferentes condiciones, lo que dificulta la comparación entre estos, además de que por la limitada cantidad de muestras valores atípicos afectan en mayor medida los valores estadísticos.

En el Cuadro 3.4 se presentan los valores promedio de las variables morfológicas de lechuga a los 28 días después del trasplante, bajo diferentes tratamientos de fotoperiodos.

Cuadro 3.4. Comparación de variables morfológicas de crecimiento de lechuga 28 días después del trasplante correspondiente a los tratamientos de fotoperiodo:

Trat.	NH	LH (cm)	AH (cm)	AF (cm ²)	PFL (g)	PSL (g)	RPF (kg m ⁻²)	RPS (g m ²)
Cuarto ciclo de producción C4 (peso plántula 4.47 ± 1.97 g)								
TF1	45 ± 7 ^a	9.32 ± 0.37 ^b	7.90 ± 0.32 ^b	2123 ± 439 ^b	122.15 ± 34.44 ^{ab}	5.75 ± 0.96 ^a	13.37 ± 3.76 ^{ab}	629.39 ± 105.08 ^a
TF2	36 ± 8 ^b	9.13 ± 0.57 ^b	7.88 ± 0.40 ^b	1646 ± 403 ^c	93.9 ± 34.7 ^b	5.33 ± 1.16 ^a	10.27 ± 3.79 ^b	583.41 ± 126.97 ^a
TF3	48 ± 7 ^a	10.29 ± 1.02 ^a	8.53 ± 0.74 ^a	2498 ± 335 ^a	152.81 ± 12.5 ^a	6.19 ± 0.64 ^a	16.72 ± 0.20 ^a	677.55 ± 70.05 ^b
CV (%)	17.45	6.8	6.9	16.6	24	16.4	24	16.4

Valores con letras iguales en la misma columna no representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.5$). TF1 (16/8 h luz/oscuridad), TF2 (fotoperiodo dividido en tres bloques: 5 h 20 min/ 2h 40 min luz/oscuridad) y TF3 (fotoperiodo dividido en dos bloques: 8 /4 h luz/oscuridad). NH= Número de Hojas. LH= Largo de hojas. AH= Ancho de Hojas. AF= Área foliar. PFL: Peso Fresco de Lechuga. PSL= Peso Seco de Lechuga. RPF: Rendimiento en Peso Fresco. RPS: Rendimiento en Peso Seco

El tratamiento con mejor desempeño fue el TF3 correspondiente al fotoperiodo dividido en dos bloques de 8 h luz y 4 h oscuridad con diferencias significativas para área foliar y peso fresco donde obtuvo un aumento de 17.66 % y 25.25 % respectivamente en base al TF1. Esto puede atribuirse a un balance más eficiente entre la fotosíntesis, concretamente a los procesos asociados a la fase oscura y la fase luminosa no obstante en peso seco se presentó un incremento solo de 7.6 % implicando que TF3 se inclina a una mayor proporción en contenido no estructural que contenido estructural. Para TF2 se evidencia que periodos de luz tan cortos no favorece el desarrollo del cultivo

3.3.2. Uso de recursos

El consumo de energía para los tratamientos en cada uno de los módulos mini-PFAL se describe en el Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5. Consumo energético de los ciclos de producción

Tratamientos	Consumo diario (kW)	Consumo Total por periodo de producción (kW)
Consumo de energía para el ciclo de producción C1		
T1	10.61	297.16
T2	10.58	296.83

T3	10.49	293.83
Consumo de energía para el ciclo de producción C2		
T1	10.61	297.16
T2	10.58	296.83
T4	10.55	295.48
Consumo de energía para el Ciclo de producción C3		
T1	10.97	307.27
T2	10.85	303.91
T4	10.78	301.9

El uso de energía para el ciclo de producción C4 fue similar al del tratamiento 2 del ciclo de producción C3, es decir 303.91 kW por ciclo de producción.

Después tenemos los resultados con respecto al uso de los recursos del ciclo C2, C3 y C4 (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.6. Comparación del uso de recursos durante tres ciclos de producción de lechuga, bajo diferentes velocidades de viento (C2 y C3) y un bajo diferentes fotoperiodos (C4)

	Rendimiento energético en peso fresco (g kW ⁻¹)	EUE (g kW ⁻¹)	Productividad del agua (peso fresco, g L ⁻¹)	EUA (g L ⁻¹)
Segundo ciclo de producción Enero 2025 C2				
T1 (1.4 m s ⁻¹)	14.47	1.57	19.14	1.64
T2 (0.9 m s ⁻¹)	17.58	1.57	30.09	2.70
T4 (0.5 m s ⁻¹)	15.66	1.28	22.24	1.84
Tercer ciclo de producción Mayo 2025 C3				
T1 (1.4 m s ⁻¹)	19.94	1.07	19.89	1.28
T2 (0.9 m s ⁻¹)	16.71	1.25	17.06	1.10
T4 (0.5 m s ⁻¹)	13.37	0.95	15.85	1.12
Cuarto ciclo de producción Junio 2025 C4				
TF1	31.75	1.47	41.68	1.92
TF2	23.85	1.25	29.88	1.56
TF3	40.19	1.65	45.12	1.86

Ciclo de producción C4 con velocidad de flujo de aire de 0.9 m s⁻¹. EUE= Eficiencia en el Uso Energético. EUA= Eficiencia en el Uso de Agua

3.3.3. Análisis nutrimental

El Cuadro 3.7 y Cuadro 3.8 corresponden a los experimentos en donde se analizó el contenido de macro y micronutrientes en las hojas de lechuga, correspondientes al ciclo de producción C2 y C4 respectivamente.

Cuadro 3.7. Comparaciones medias en la concentración de nutrientes en las hojas de lechuga 28 días después del trasplante correspondiente al ciclo de producción C2.

	Calcio	Magnesio	Potasio	Nitrógeno total	Fósforo	Boro
			(%)			mg kg ⁻¹
T1 (1.4 m s ⁻¹)	1.32 ± 0.15 ^a	0.69 ± 0.07 ^a	8.81 ± 0.85 ^a	5.14 ± 0.68 ^a	3.75 ± 0.45 ^a	185 ± 45.0 ^a
T2 (0.9 m s ⁻¹)	1.42 ± 0.29 ^a	0.72 ± 0.03 ^a	8.39 ± 0.80 ^a	5.61 ± 0.85 ^a	4.12 ± 1.0 ^a	142 ± 31.0 ^a
T4 (0.5 m s ⁻¹)	1.36 ± 0.06 ^a	0.56 ± 0.06 ^a	8.85 ± 0.36 ^a	4.59 ± 0.21 ^a	4.18 ± 0.67 ^a	136 ± 2.7 ^a
CV (%)	12.6	9.9	8.0	12.5	16.9	20.5

Valores con letras iguales en la misma columna no representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.5$).

No se observaron diferencias significativas entre tratamientos para todos los nutrientes ($p > 0.5$), lo que indica que la velocidad del viento no influyó en la absorción de estos nutrientes, aunque es relevante señalar la tendencia al aumento en la concentración de Boro a una mayor velocidad de viento.

Cuadro 3.8. Comparación de medias en la concentración de nutrientes en la lechuga 28 días después del trasplante correspondiente al ciclo de producción C4 (tratamientos de fotoperiodo)

	Calcio	Magnesio	Potasio	Nitrógeno total	Fósforo	Boro
			(%)			mg kg ⁻¹
TF1	1.11 ± 0.04 ^a	0.73 ± 0.01 ^a	9.65 ± 0.31 ^a	3.62 ± 0.31 ^a	2.39 ± 0.52 ^a	259.97 ± 27.30 ^a
TF2	1.13 ± 0.05 ^a	0.70 ± 0.07 ^a	9.76 ± 0.55 ^a	3.53 ± 0.18 ^a	1.92 ± 0.27 ^{ab}	281.39 ± 24.14 ^a
TF3	1.15 ± 0.13 ^a	0.77 ± 0.06 ^a	9.90 ± 0.36 ^a	3.74 ± 0.11 ^a	1.26 ± 0.08 ^b	172.11 ± 23.25 ^b
CV (%)	7.6	8.1	4.3	6.0	18.4	10.4

Valores con letras iguales en la misma columna no representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.5$). TF1 (testigo, 16/8 h luz/oscuridad, continuo), TF2 (fotoperiodo dividido en tres bloques: 5 h 20 min luz / 2 h 40 min oscuridad), y TF3 (fotoperiodo dividido en dos bloques: 8 h luz / 4 h oscuridad)

Para los tratamientos en donde se varió el fotoperiodo (Cuadro 3.8) no se observaron diferencias significativas para los nutrientes Calcio, Magnesio, Potasio y Nitrógeno total ($p > 0.5$). El Fósforo mostró diferencias significativas entre tratamientos con una mayor concentración de P para TF1. Se encontraron diferencias significativas en la concentración de B, el tratamiento T2 presentó mayor absorción de Boro.

Las Figura 3.6 muestra el comportamiento de la concentración de nutrientes a lo largo del ciclo de producción C2 (21 de enero al 21 de febrero del 2025).

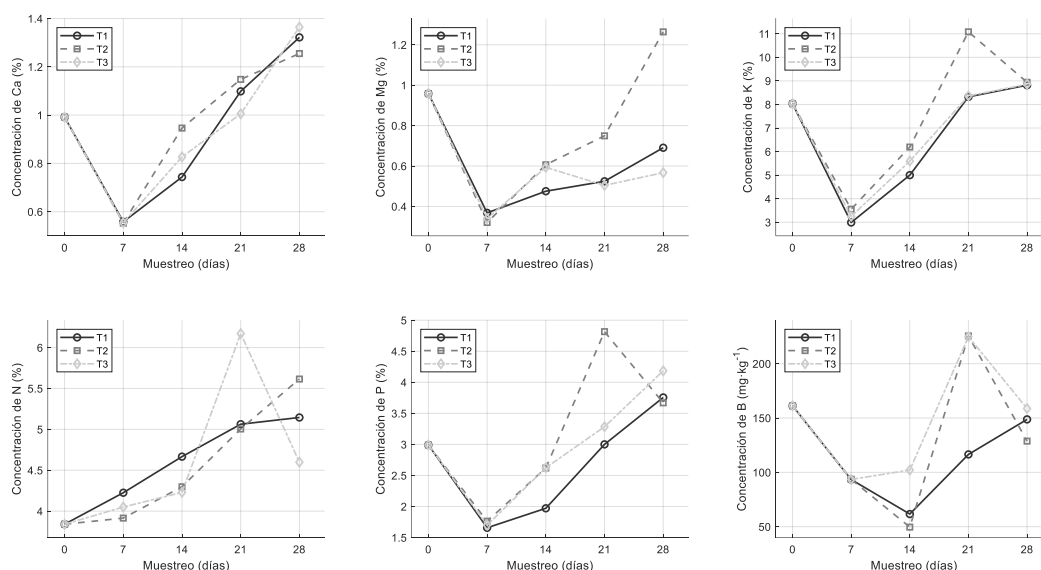


Figura 3.6. Concentración promedio de nutrientes en tejido foliar de *Lactuca sativa* L. var. francesa por tratamiento y muestreo para ciclo de cultivo C2

En la Figura 3.6 cada punto representa el promedio de tres repeticiones por tratamiento. T1: flujo de aire 1.4 m s⁻¹, T2: 0.9 m s⁻¹, T4: 0.5 m s⁻¹. Todos los nutrientes a excepción del Nitrógeno tuvieron una disminución en la concentración, lo que se puede deber a un estrés en la planta al momento del trasplante. La Figura 3.7 corresponde a los datos del ciclo de producción de junio a julio 2025.

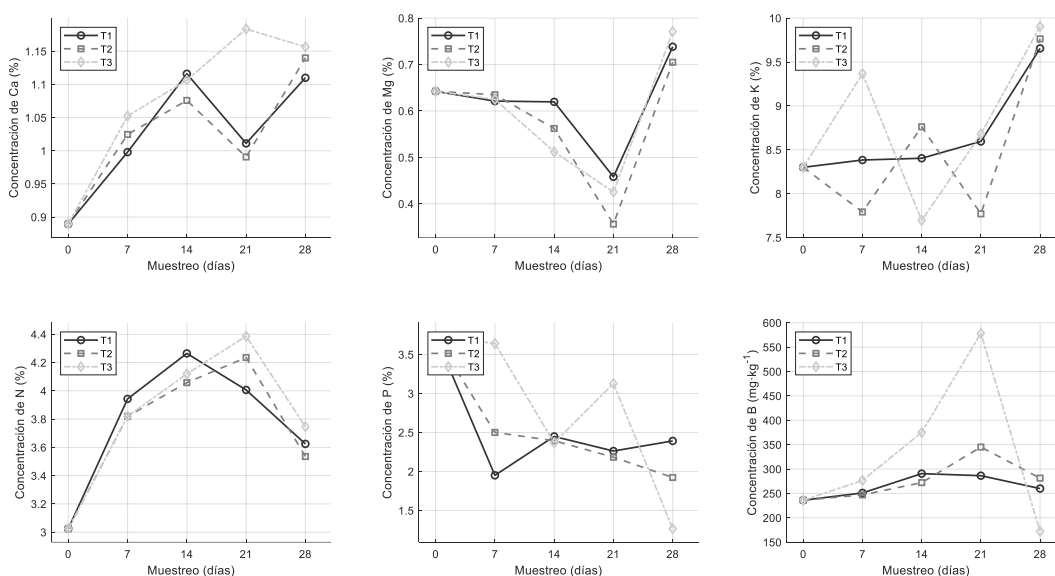


Figura 3.7. Concentración promedio de nutrientes en tejido foliar de *Lactuca sativa* L. var. francesa por tratamiento y muestreo para ciclo de cultivo C4.

En la Figura 3.7 cada punto representa el promedio de tres valores, uno por cada repetición en cada tratamiento TF1 (16/8 h luz/oscuridad), TF2 (fotoperiodo dividido en tres bloques: 5 h 20 min luz / 2 h 40 min oscuridad), y TF3 (fotoperiodo dividido en dos bloques: 8 h luz / 4 h oscuridad).

Los Cuadro 3.9 y Cuadro 3.10 despliegan información sobre la eficiencia en el uso de los nutrientes para dos ciclos de producción C2 y C4.

Cuadro 3.9. Concentración de nutrientes en la solución nutritiva para los ciclos de producción C2 y C4

Nutriente	SN	Concentración óptima de acuerdo a <i>EUA</i>			Concentración en SN según resultados de experimentos de acuerdo a (Langenfeld <i>et al.</i> , 2022)		
		T1	T2	T4	T1	T2	T4
		<i>EUA</i> = 1.65	<i>EUA</i> = 2.69	<i>EUA</i> = 1.83	<i>EUA</i> = 1.65	<i>EUA</i> = 2.69	<i>EUA</i> = 1.83
Segundo ciclo de producción Enero 2025 (C2)							
mg L ⁻¹							
Macro							
NO ₃	-	49.5	80.70	54.9	75.87	123.69	84.15
NH ₄							
Fósforo	7.78	6.6	10.76	7.32	61.97	98.70	76.57
Potasio	316.00	66.0	107.60	73.2	145.47	240.45	162.05
Calcio	143.49	24.7	40.35	27.45	21.81	33.75	24.96
Magnesio	64.27	8.25	13.45	9.15	11.39	34.00	10.37
Micro							
Boro (B)	0.65	0.083	0.135	0.092	0.245	0.34	0.29
Cuarto ciclo de producción Junio 2025 (C4)							
mg L ⁻¹							
		TF1	TF2	TF3	TF1	TF2	TF3
		<i>EUA</i> = 1.92	<i>EUA</i> = 1.56	<i>EUA</i> = 1.86	<i>EUA</i> = 1.92	<i>EUA</i> = 1.56	<i>EUA</i> = 1.86
Macro							
NO ₃	148.45	57.60	46.80	55.8	69.58	55.15	69.67
NH ₄							
Fósforo	11.98	7.68	6.24	7.44	45.91	29.99	23.55
Potasio	309	76.80	62.40	74.40	185.37	152.30	184.23
Calcio	177.5	28.80	23.40	27.90	21.31	17.78	21.51
Magnesio	76.95	9.60	7.80	9.30	14.17	10.99	14.34
Micro							
Boro (B)	0.87	0.096	0.078	0.093	0.49	0.43	0.32

SN= Solución nutritiva

Cuadro 3.10. Concentración de nutrientes en el tejido de la hoja para los ciclos C2 y C4

Nutriente	COT ¹	COT ²	Concentración de nutrientes en las hojas de lechuga C2			Concentración de nutrientes en las hojas de lechuga C4		
			T1	T2	T4	TF1	TF2	TF3
			T1			TF1		
Macro			(%)					
NO ₃	5.36	3.0	5.14	5.61	4.59	3.62	3.53	3.74
NH ₄								
Fósforo	0.72	0.4	3.75	3.66	4.18	2.39	1.92	1.26
Potasio	7.64	4.0	8.81	8.93	8.85	9.65	9.76	9.90
Calcio	0.79	1.5	1.32	1.25	1.36	1.10	1.13	1.15
Magnesio	0.35	0.5	0.69	1.26	0.56	0.73	0.70	0.77
Micro			mg kg ⁻¹					
Boro (B)	-	50	148	128	158	259.9	281.3	172.1

COT= Concentración optima de nutrientes en el tejido de la hoja. ¹Tsukagoshi y Shinohara, 2016 ; ² Langenfeld *et al.*, 2022.

Analizando los valores del Cuadro 3.9 y Cuadro 3.10, comparando con los niveles recomendados se observa un aumento considerable en la concentración de Boro el cual es un componente básico en la formación de pared celular y translocación del azúcar el exceso de este nutriente se caracteriza por un amarillamiento en el borde de las hojas (Tsukagoshi & Shinohara, 2016), otro efecto que causa el exceso de este nutriente es la disminución del NVDI (Normalized Difference Vegetation Index) que se traduce en la reducción de la vitalidad y cobertura vegetal, en general crecimiento limitado (Tlili, et al 2023). Lo anterior implica que en el TF2 del ciclo C4 en donde la concentración de Boro fue la más alta se obtuvo el menor desarrollo en cuanto Área Foliar y peso fresco con diferencias significativas ($p < 0.05$) respecto a los otros tratamientos en donde se destaca el TF3 con el mejor desarrollo del cultivo.

3.4. Conclusiones

A lo largo de los ciclos de producción realizados dentro de las PFALs se concluyó que, en estos sistemas cerrados, el flujo de aire constituye un factor importante para el desarrollo de la planta de lechuga. Los experimentos mostraron que, aunque no se observaron diferencias significativas al aplicar un flujo de viento con velocidades de 0.9 y 1.5 m s^{-1} , sí se encontraron diferencias con respecto a velocidades más bajas o incluso nulas. En ese sentido las plantas expuestas a mayores velocidades presentaron un mayor rendimiento con un aumento en promedio de 18% que es muy común en estos espacios cerrados. Por otro lado, en relación con el efecto del fotoperiodo se destaca TF3 que presentó los mejores valores de área foliar y peso fresco con 17.66% y 25.25% respectivamente esto con respecto a TF1, lo que indica una mejor dinámica en la acumulación de almidón durante el periodo luminoso y su degradación durante el periodo oscuro, aunque para una mayor asertividad sobre esta conclusión se debe plantear un experimento donde se analice contenido de almidón al inicio y final del periodo de luz durante el ciclo de crecimiento.

3.5. Referencias

- Ahmed, H. A., Yu-Xin, T., & Qi-Chang, Y. (2020). Optimal control of environmental conditions affecting lettuce plant growth in a controlled environment with artificial lighting: A review. *South African Journal of Botany*, 130, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.018>
- Al-Tawaha, A. R., Al-Karaki, G., Al-Tawaha, A. R., Sirajuddin, S. N., Makhadmeh, I., Megat Wahab, P. E., ... & Massadeh, A. (2018). Effect of water flow rate on quantity and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in nutrient film technique (NFT) under hydroponics conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(5). Recuperado de <https://agrojournal.org/24/05-09.pdf>
- Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Shao, Y., ... & Ibaraki, Y. (2021). Effect of nutrient solution flow rate on hydroponic plant growth and root morphology. *Plants*, 10(9), 1840. <https://doi.org/10.3390/plants10091840>
- Haibo, Y., Lei, Z., Haiye, Y., Yucheng, L., Chunhui, L., & Yuanyuan, S. (2023). Sustainable development optimization of a plant factory for reducing tip burn disease. *Sustainability*, 15(6), 5607. <https://doi.org/10.3390/su15065607>
- Kitaya, Y. (2016). Air current around single leaves and plant canopies and its effect on transpiration, photosynthesis, and plant organ temperatures. *LED Lighting for Urban Agriculture*, 177-187. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_13
- Kozai, T., & Niu, G. (2016a). Plant factory as a resource-efficient closed plant production system. In *Plant Factory* (pp. 69-90). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00004-4>
- Kozai, T., & Niu, G. (2016b). Overview and concept of closed plant production system (CPPS). *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*; Kozai, T., Niu, G., Takagaki, M., Eds, 3-7. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00004-4>

- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). (2019). Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. Academic press. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01039-8>
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2016). *Light*. En T. Kozai, G. Niu, & M. Takagaki (Eds.), *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production* (pp. 115–128). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00007-X>
- Li, W., Zhong, L., Ji, X., Wang, J., & He, D. (2025). Light/Dark Cycle Lighting Influences Growth and Energy Use Efficiency of Hydroponic Lettuces in an LED Plant Factory. *Biology*, 14(5), 571. <https://doi.org/10.3390/biology14050571>
- Langenfeld, N. J., Pinto, D. F., Faust, J. E., Heins, R., & Bugbee, B. (2022). Principles of nutrient and water management for indoor agriculture. *Sustainability*, 14(16), 10204. <https://doi.org/10.3390/su141610204>
- Macias-González, M., Truco, M. J., Han, R., Jenni, S., & Michelmore, R. W. (2021). High-resolution genetic dissection of the major QTL for tipburn resistance in lettuce, *Lactuca sativa*. *G3*, 11(7), jkab097. <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkab097>
- Maruo, T., & Johkan, M. (2020). Tipburn. In *Plant Factory* (pp. 231-234). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00015-7>
- Matsuda, R. (2016). Effects of Physical Environment on Photosynthesis, Respiration, and Transpiration. In: Kozai, T., Fujiwara, K., Runkle, E. (eds) *LED Lighting for Urban Agriculture*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_12
- Peiro, E., Pannico, A., Colleoni, S. G., Bucchieri, L., Rouphael, Y., De Pascale, S., ... & Gòdia, F. (2020). Air distribution in a fully-closed higher plant growth chamber impacts crop performance of hydroponically-grown lettuce. *Frontiers in plant science*, 11, 537. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00537>

- Tlili, A., Dridi, I., Vannini, A., Bianchi, E., Canali, G., Jafarova, M., ... & Loppi, S. (2023). Effects of boron addition on lettuce plants grown in the soil and hydroponically. *Life and Environment*, 73(1/2), 17-23.
<https://doi.org/10.57890/VIEMILIEU/2023.73.1/2:17-23>
- Tsukagoshi, S., & Shinohara, Y. (2016). *Nutrition and nutrient uptake in soilless culture systems*. En T. Kozai, G. Niu, & M. Takagaki (Eds.), *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production* (pp. 165–172). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00011-1>
- Zhang, Y., & Kacira, M. (2018). Air distribution and its uniformity. *Smart Plant Factory: The Next Generation Indoor Vertical Farms*, 153-166.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2_10

4. DISEÑO DE UNA MINI-PFAL PARA AMBIENTES URBANOS¹

Resumen

Las Plant Factories with Artificial Lighting (PFALs) son sistemas de producción vegetal en ambiente controlado que permiten una agricultura intensiva, eficiente y libre de las limitaciones climáticas externas. En este trabajo se desarrolló el diseño, de una mini-PFAL orientada a la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en entornos urbanos. El sistema integra técnicas hidropónicas NFT con iluminación LED, y una interfaz gráfica de usuario para la gestión de riego, iluminación, temperatura y humedad. La estructura fue fabricada con perfiles PTR y componentes impresos en 3D. Fue instrumentada con sensores de temperatura, humedad, flujo de agua y luminosidad conectados a un controlador principal mediante comunicación UART. El sistema permite el monitoreo y registro de datos en una tarjeta microSD y su visualización en una pantalla táctil. El costo de fabricación únicamente de materiales y componentes fue de \$25,918 MXN, con una capacidad de 81 plantas por ciclo y un costo de producción estimado en \$15 MXN por lechuga que un precio estimado de \$25 MXN. Los resultados demuestran el funcionamiento del módulo mini-PFAL para la producción de lechuga aun teniendo margen de mejora para la viabilidad técnica y económica del diseño, ofreciendo una alternativa modular y escalable para la producción urbana y la investigación en sistemas mini-PFAL.

Palabras Clave: Lechuga, agricultura intensiva, NFT, iluminación LED

¹ Tesis de Maestría en Ingeniería, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad autónoma Chapingo

Autor: Fernando Salinas Paniagua

Directora de Tesis: Raquel Salazar Moreno

4. DESIGN OF A MINI-PFAL FOR URBAN ENVIRONMENTS¹

Abstract

Plant Factories with Artificial Lighting (PFALs) are controlled-environment plant production systems that enable intensive and efficient agriculture without the limitations imposed by external climatic conditions. In this work, the design of a mini-PFAL oriented toward the production of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in urban environments was developed. The system integrates NFT hydroponic techniques with LED lighting and a graphical user interface for managing irrigation, lighting, temperature, and humidity. The structure was built using steel tube profiles and 3D-printed components. It was equipped with sensors for temperature, humidity, water flow, and light intensity, connected to a main controller via UART communication. The system allows data monitoring and recording on a microSD card and its visualization on a touchscreen display. Manufacturing cost for materials and components alone was \$25,918 MXN, with a capacity of 81 plants per cycle and an estimated production cost of \$15 MXN per lettuce, assuming a market price of \$25 MXN. The results demonstrate the functionality of the mini-PFAL module for lettuce production, while still allowing room for improvement regarding the technical and economic feasibility of the design, offering a modular and scalable alternative for urban production and research in mini-PFAL systems.

Keywords: Lettuce, intensive agriculture, NFT, LED lighting

¹ Tesis de Maestría en Ingeniería, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad autónoma Chapingo
Autor: Fernando Salinas Paniagua
Directora de Tesis: Raquel Salazar Moreno

4.1. Introducción

El creciente aumento en la demanda de alimentos debido al crecimiento poblacional y a la incertidumbre de la agricultura convencional para satisfacer las demandas ha provocado un gran interés en el desarrollo de alternativas enfocadas en la sustentabilidad (Ray *et al.*, 2013).

Entre las tecnologías emergentes destacan las PFALs o fábricas de plantas con iluminación artificial, sistemas de cultivo cerrados y altamente tecnificados que permiten producir hortalizas de alta calidad independientemente del clima exterior (Kozai *et al.*, 2015; Csambalik *et al.*, 2024). Las PFALs se han consolidado en países como Japón, Corea y China, donde las limitaciones de suelo y la alta densidad poblacional han impulsado su adopción a escala comercial y doméstica.

Desde el punto de vista técnico, las PFALs integran control ambiental con precisión en factores como temperatura, humedad, CO₂, Iluminación artificial y nutrientes mediante sistemas hidropónicos y tecnologías digitales. Su diseño puede variar desde grandes instalaciones hasta mini-PFALs, unidades compactas adaptadas para espacios reducidos como hogares, restaurantes o negocios urbanos. Estas versiones pequeñas se han vuelto relevantes no solo por su papel demostrativo y educativo, sino también como alternativas locales de producción, aunque enfrentan retos como costos de inversión, consumo energético y complejidad técnica lo que ha limitado su adopción generalizada (Kozai *et al.*, 2019; Csambalik *et al.*, 2024, Takagaki *et al.*, 2020).

En este sentido el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar y evaluar un módulo mini-PFAL para la producción de lechugas en ambientes urbanos, utilizando un sistema hidropónico NFT y luz artificial, incorporando una interfaz gráfica de usuario GUI sencilla para una interacción con el módulo mini-PFAL promoviendo un estilo de vida sostenible y afrontando los retos que se tienen en estos sistemas.

4.2. Materiales y métodos

En la metodología de diseño del módulo mini-PFAL se tomaron en cuenta el diseño de cinco subsistemas (estructural, fertirriego, Iluminación, recirculación

de aire e instrumentación / control) en donde se contemplan las características principales que componen a estos sistemas de producción (Figura 4.1): .

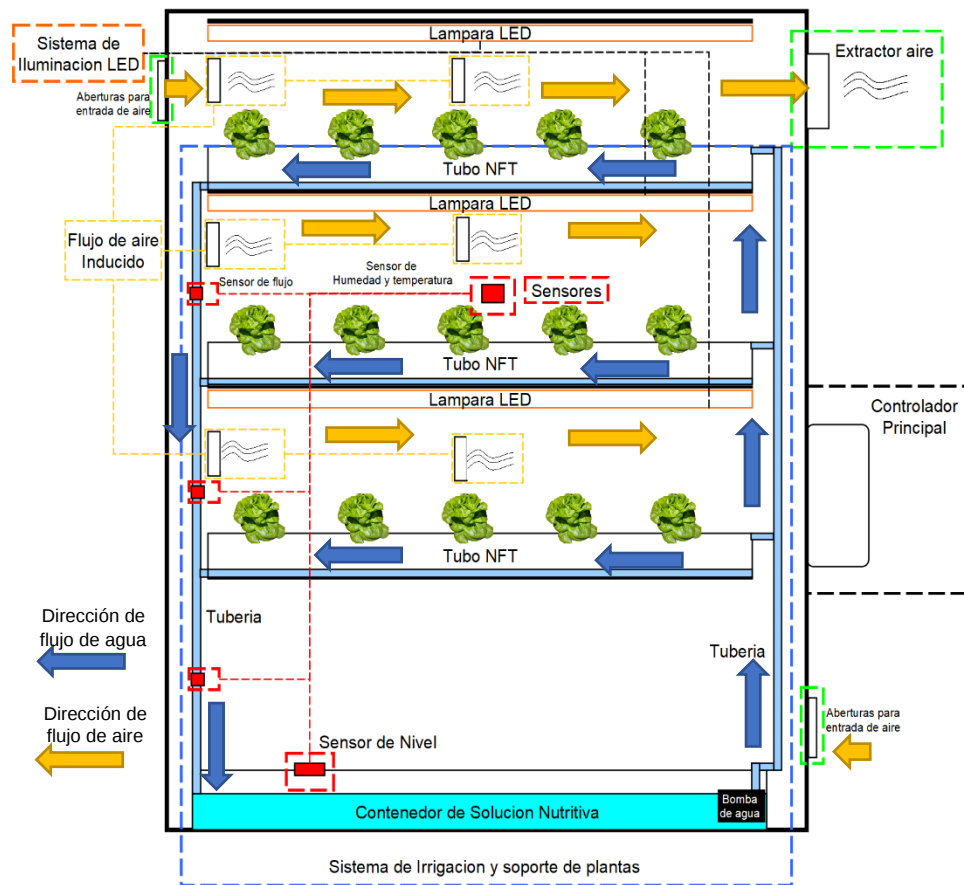


Figura 4.1. Diagrama esquemático de los subsistemas en la mini-PFAL 1) en azul: sistema de riego; 2) en rojo : sistema de sensores; 3) en verde : entradas de aire y los extractores; 4) en naranja: lámparas LED, 5) en amarillo : ventiladores internos; 6) en negro: controlador principal

De manera general el módulo PFAL tiene aislamiento con una cubierta que protege al usuario de la luz emitida por las lámparas así como proteger a las plantas de cualquier plaga y del entorno. Se contempla ventilador extractor para la renovación de aire, un sistema de flujo de aire controlado para mejorar la transpiración en la planta, el sistema de luz artificial, sistema multisensorial para monitorear el entorno y por último el sistema de control encargado de recolectar la información de los sensores, activar y desactivar los componentes eléctricos y la interacción con el usuario a través de una interfaz gráfica GUI.

4.2.1. Subsistema estructural

Como criterios de diseño para la mini-PFAL se consideró: 1) facilidad de acceso para las diversas actividades como cosecha, trasplante o limpieza, 2) las dimensiones de las lámparas, 3) las medidas de la cubierta disponibles comercialmente y 4) las medidas requeridas por el cultivo de lechuga. Resultando en un módulo de dimensiones totales de 1.5 x 1.85 x 0.75 m (largo x alto x ancho) (Figura 4.2).

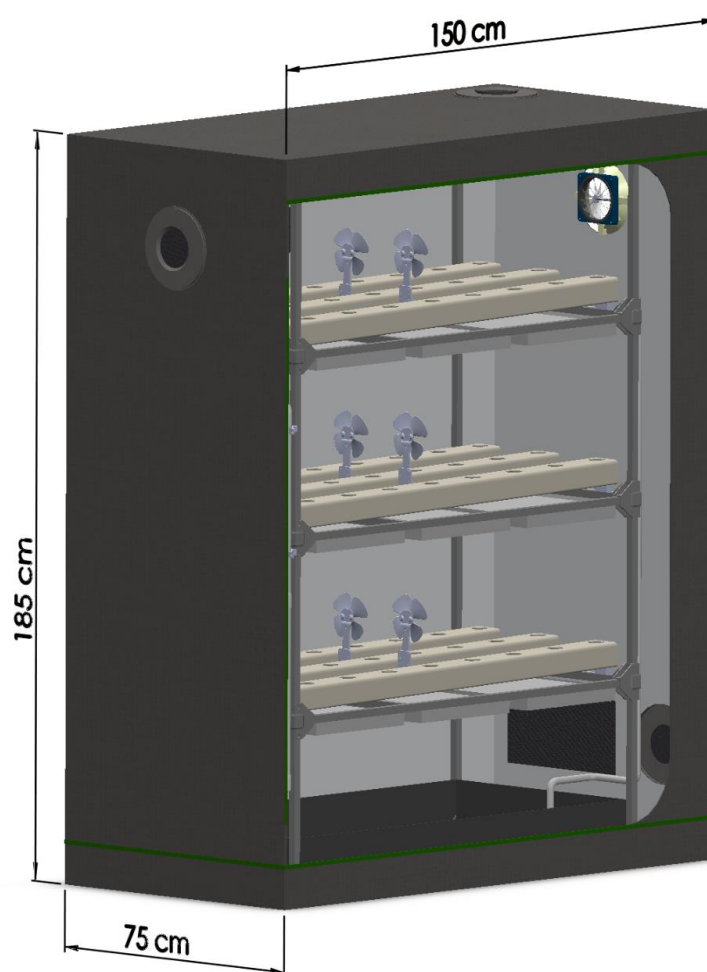


Figura 4.2. Render 3D del módulo mini-PFAL

Para la estructura se utilizó un PTR C-705 de 3/5 in calibre 18 (19.05 x 19.05 mm espesor 1.27mm) debido a su bajo peso (0.68 kg m^{-1}) y adecuada resistencia para soportar las cargas del sistema de hasta aproximadamente 22 kg suponiendo lechugas de 200 g . Las uniones del PTR se realizaron mediante tornillo y tuerca a piezas plásticas impresas en 3D por tecnología FDM (modelado por deposición fundida), empleando principalmente filamento

ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), material con buena resistencia mecánica, estabilidad frente a agentes químicos y buena durabilidad ante condiciones de intemperie como radiación, humedad y temperatura elevada Figura 4.3.

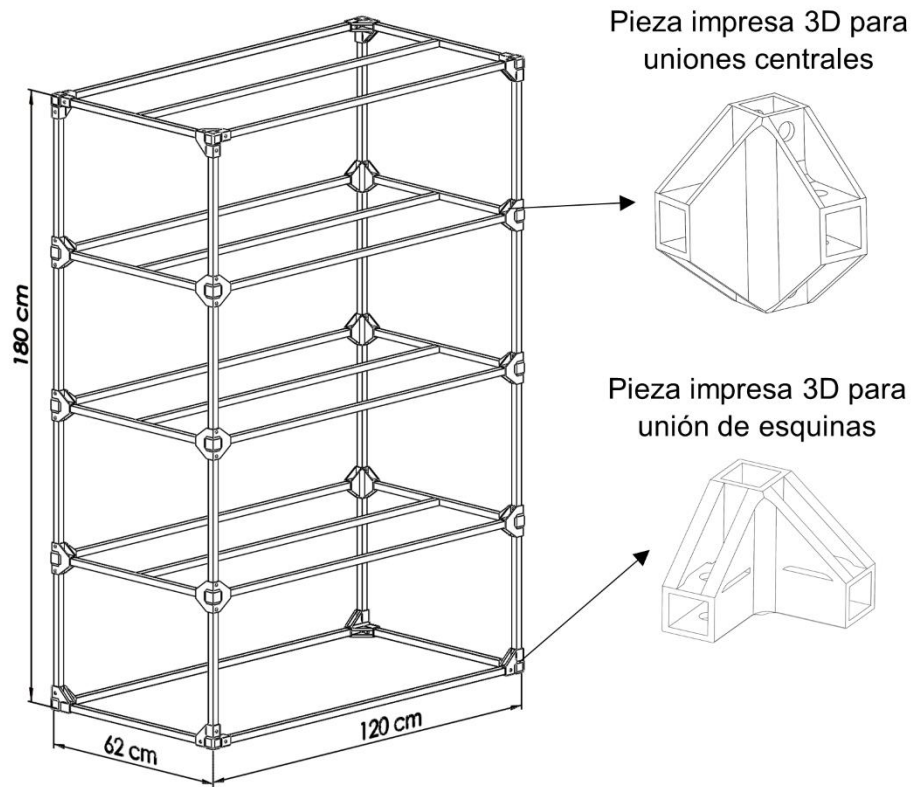


Figura 4.3. Estructura principal de la mini-PFAL

4.2.2. Subsistema de Fertirriego

El circuito de fertirriego se compone de varios elementos mostrados en la Figura 4.4, los cuales se describen a continuación:

- Contenedor de solución nutritiva: componente fabricado a la medida e integrado a la estructura, para su fabricación se utilizó geomembrana de 1 mm de espesor moldeada, y soportada sobre la estructura principal, optimizando el espacio disponible.
- Bomba de agua: bomba de agua sumergible de 85 W, con un caudal máximo de 4000 L h⁻¹ y altura máxima de 3.5 m
- Tuberías de alimentación: armada principalmente con CPVC de 13 mm de diámetro, en donde se conectan a través de iniciales tubin flexible

de 5 mm hacia cada tubo NFT. En cada nivel de producción se incorporan llaves de paso para regular el flujo de solución nutritiva

- d) Tubería retorno: fabricada con PVC sanitario de 3" de diámetro para captar la solución nutritiva a la salida de los tubos NFT. Posteriormente, se acopla a tubería PVC de 2" que conduce la solución nutritiva al contenedor.
- e) Tubos o canaletas hidropónicas NFT: canaletas comerciales cortadas a medidas de 1.2 m de largo diseñadas con una cubierta interna de color oscuro y ranurada a lo largo de la base, que permite un flujo continuo evitando estancamientos o bloqueos causados por el desarrollo de las raíces
- f) Canastilla: componente impreso en 3D, opcional para adaptarse con la medida de la espuma fenólica y los orificios de las canaletas NFT, su función es impedir el paso de la luz a la zona radicular en etapas tempranas, impidiendo daños como quemaduras en las raíces.

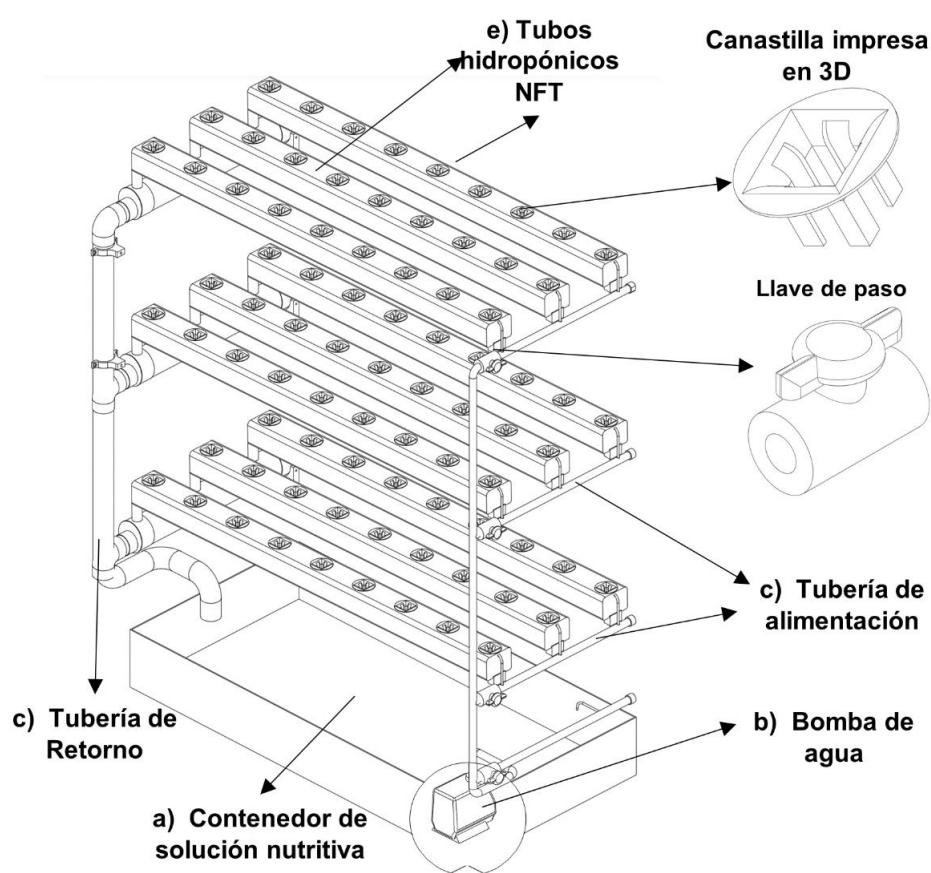


Figura 4.4. Componentes del subsistema de fertirriego en el módulo mini-PFAL

4.2.3. Subsistema de iluminación artificial

Este subsistema se integra de lámparas comerciales de 30.1 x 30.1 cm de largo x ancho, de 45 W modelo GL225RBW (Hitekgro, Shenzhen, China), dispuestas en un arreglo de 6 unidades por cada nivel de producción (Figura 4.5)

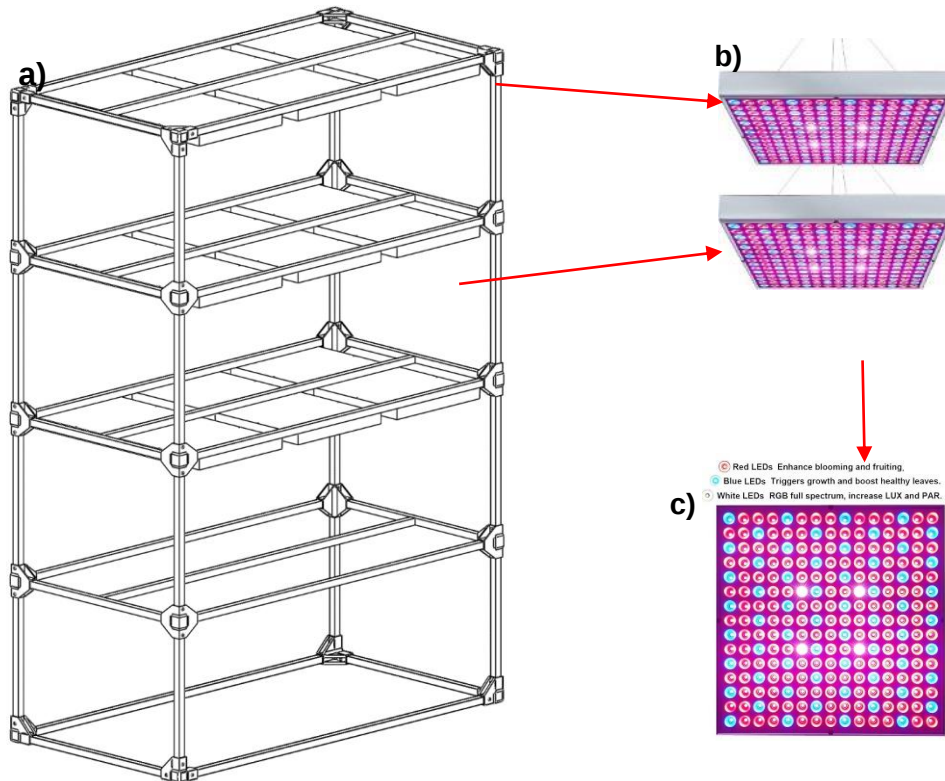


Figura 4.5. a) Estructura principal del módulo mini-PFAL en conjunto con el arreglo de lámparas b) y c) ejemplo visual de la relación de colores de LED's de las lámparas comerciales de la empresa Hitekgro (fuente: recuperadas de [led grow light plant light](#))

Las lámparas (Figura 4.5) proporcionan un espectro de luz con radio RB de $2:1 \pm 10 \%$ su distribución de PPFD se muestra en la Figura 4.6, los valores corresponden a una distancia de la fuente de 20 cm.

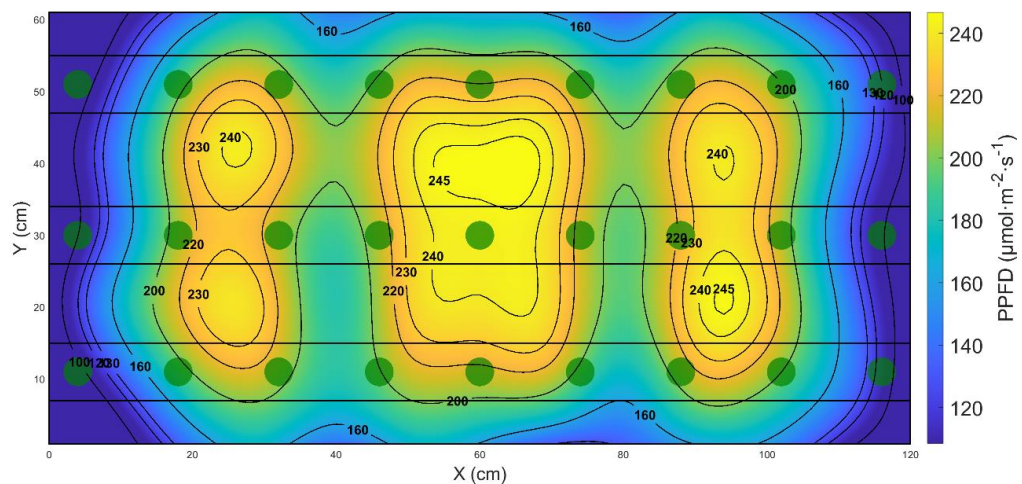


Figura 4.6. Distribución de intensidad de radiación PAR a 20 cm de la fuente

4.2.4. Subsistema de ventilación y recirculación de aire

Para el subsistema de inducción de movimiento de aire se utilizaron ventiladores de 2.5 W a 5V los cuales se posicionaron a 9 cm con respecto de la tapa de los tubos hidropónicos y ajustándose a 17 cm con incrementos de 1 cm fijados a la estructura o las lámparas (Figura 4.7).

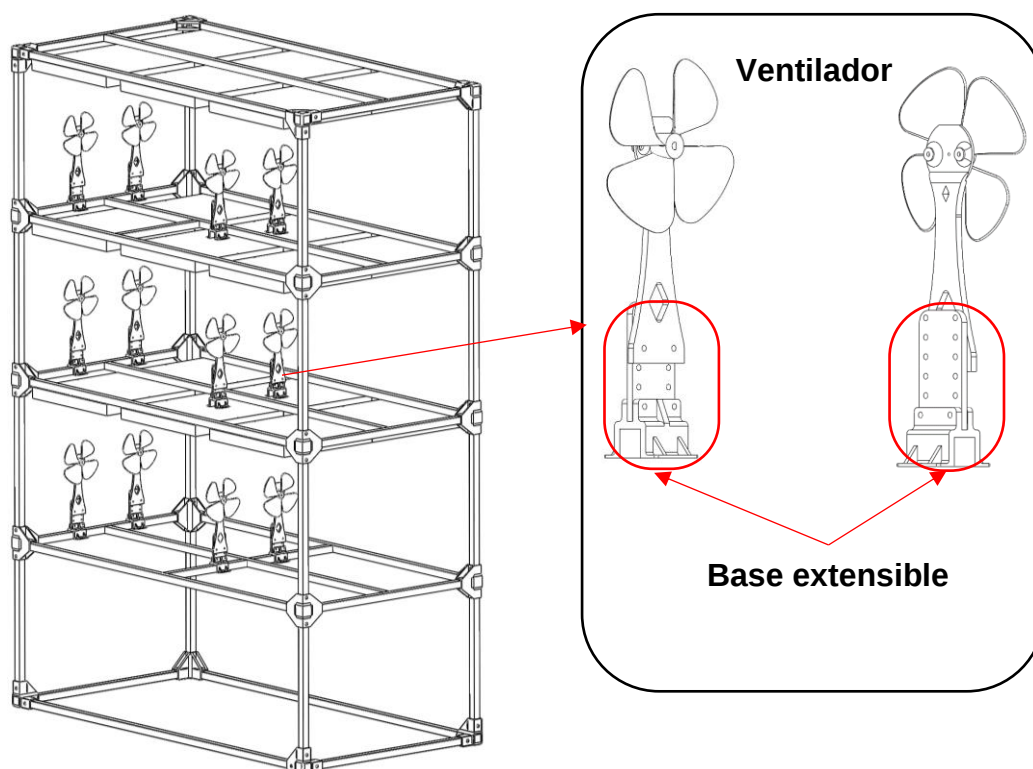


Figura 4.7. Ubicación de ventiladores de flujo de aire horizontal .

La cubierta comercial modelo 2.5x5 Plant House (comercializado por Green Grow, Querétaro, México) cuenta con aberturas para acoplar algún ventilador/extractor, el cual fue de 12 cm de diámetro de 0.25 A y 12 V, utilizado en las computadoras. También la cubierta viene con una abertura para la entrada de aire con una protección que no permite el paso a plagas (Figura 4.8), el objetivo de este componente es el intercambio y renovación del aire dentro del módulo mini-PFAL.

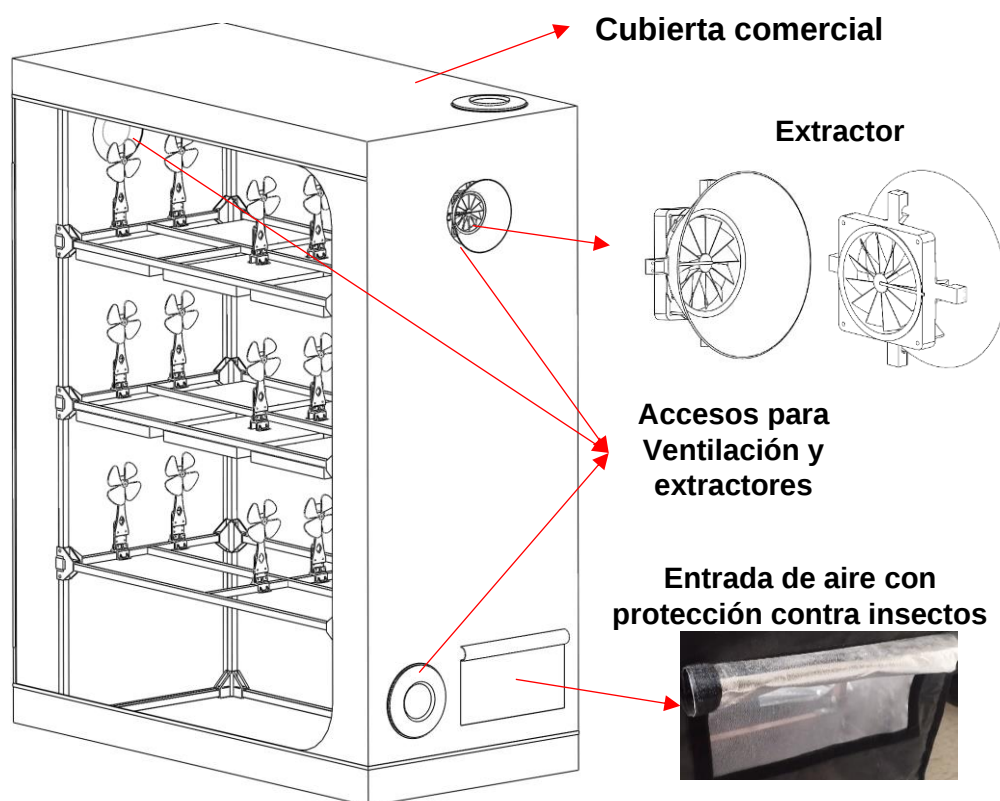


Figura 4.8. Esquema de entradas y salidas para ventilación forzada con sus principales componentes

4.2.5. Subsistema de instrumentación para monitoreo y control

Este subsistema a su vez se divide en cuatro subsistemas (Potencia, Control, Monitoreo e interfaz gráfica de usuario) (Figura 4.9).

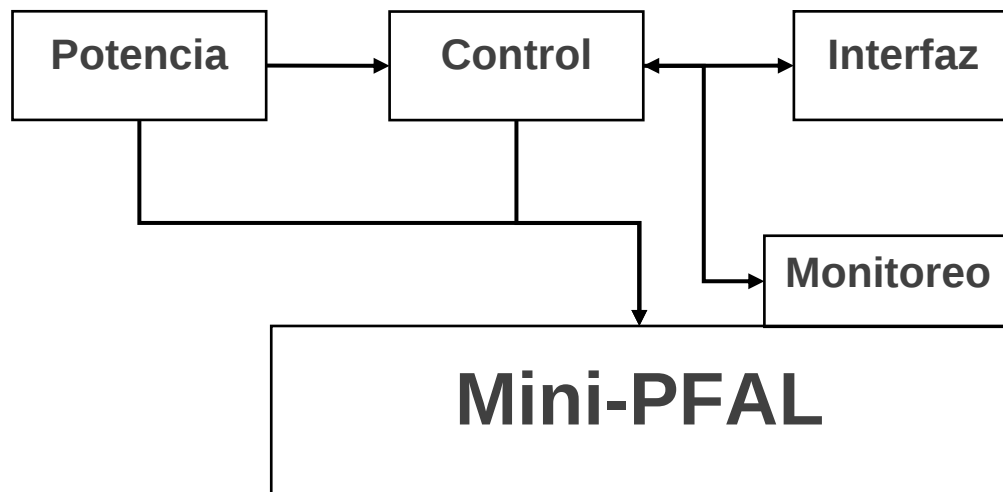


Figura 4.9. Esquema del diagrama eléctrico y electrónico del controlador principal para el módulo mini-PFAL

Subsistema de potencia

Subsistema diseñado para alimentar todos los componentes conectados con el subsistema de control. Inicia con la toma corriente conectada a la tensión convencional de CA (125 V y 60 Hz). En esta etapa se hace toda la regulación de voltajes con una fuente de poder de salida 12 V de DC y una carga máxima de 60 A, después se conectan a reguladores de voltaje LM2596 con entradas de 12V a salida de 5 y 3.3 con una carga máxima de 2 A. Se utilizan 3 de estos, dos para alimentar la parte del control y 1 para el subsistema de monitoreo (Figura 4.10).

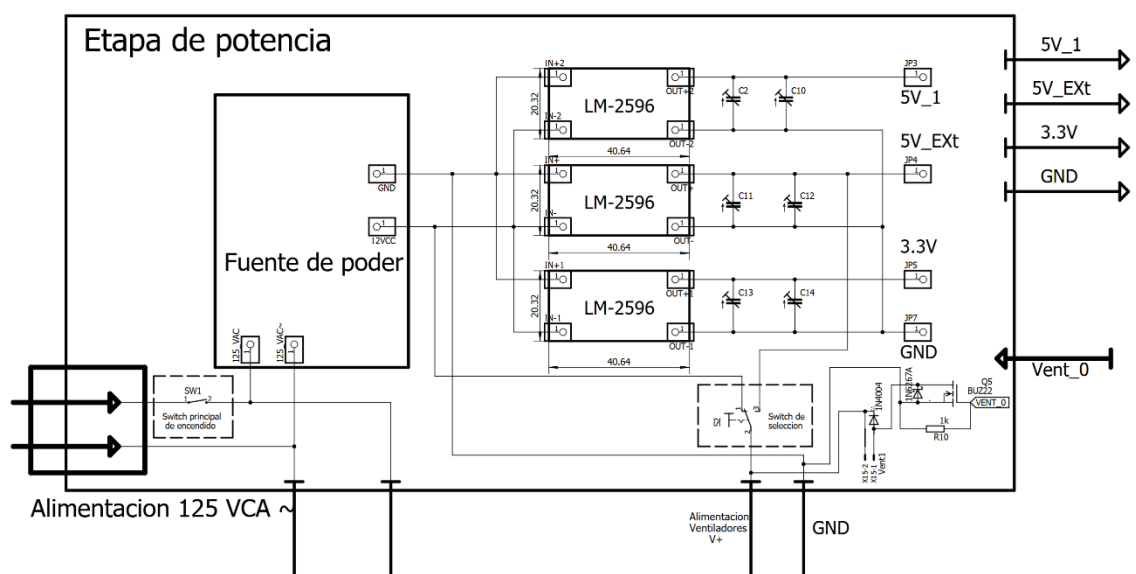


Figura 4.10. Diagrama Eléctrico / Electrónico del subsistema de potencia

Las flechas que salen y/o entran de la Figura 4.10, corresponden a las relaciones y conexiones que hace con los demás diagramas, cuenta con un switch principal (SW1) para encender todo, un switch de selección para definir el voltaje de alimentación de los ventiladores, y el activador de los extractores.

Subsistema de monitoreo

La etapa de instrumentación de acuerdo con el diagrama de diseño, se implementó un sensor de temperatura de aire y humedad relativa, un sensor de luz como retroalimentación de activación de iluminación, un sensor de flujo de agua y un sensor para medir el nivel de la solución nutritiva.

La elección de los sensores se basó en una comparación de los disponibles en el mercado bajo los siguientes criterios:

- 1) Rango de medición.
- 2) Precisión y resolución
- 3) Interfaz de comunicación.
- 4) Consumo de energía.
- 5) Costo.

Para la medición de temperatura y humedad se eligió el sensor AHT10 el sensor de luz BH1750 y el sensor de flujo de agua YF-s201 (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Características de los sensores seleccionados para el módulo sensor

Sensor	Nombre	Rango	Precisión	Resolución	Comunicación	Consumo (mA)	Tensión (V)	Costo (MXN)
Temperatura y Humedad	AHT10	-40 a 85 °C y 0 a 100 % HR	0.3 °C y 2 %	0.01 °C 0.024 %	Digital i2C	0.023	3.3-5.5	40
Intensidad luminosa	BH1750	1- 65535 lux	1 Lux	-	Digital i2C	0.190	3-5	42
Flujo de agua	YF-s201	1-30 L min ⁻¹	-	-	Analógica	15	5-18	79

Los sensores se conectaron a un microcontrolador (Arduino Nano), Figura 4.11 cuya función principal es la de actuar como intermediario entre los sensores y el controlador maestro.

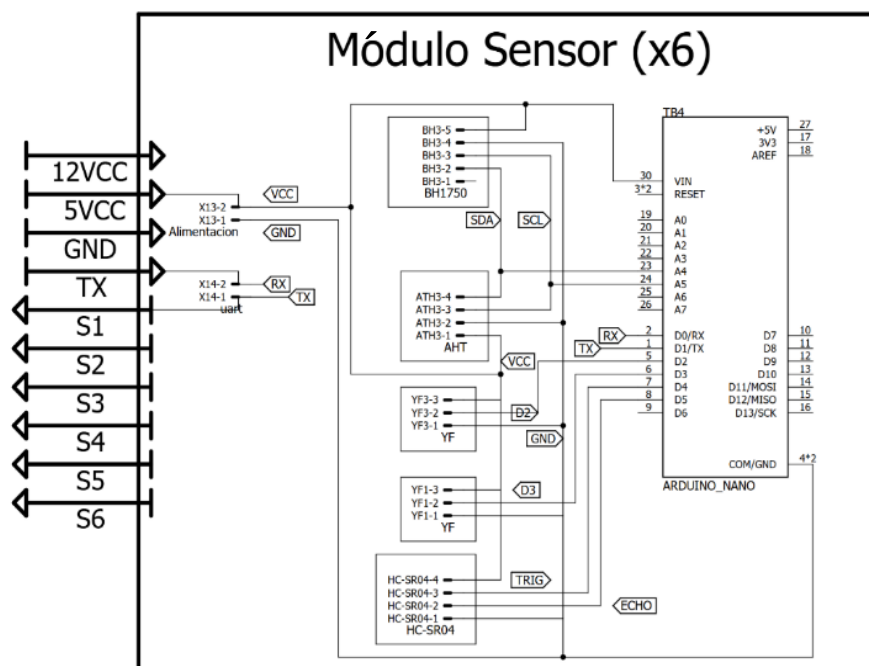


Figura 4.11. Diagrama de conexión de un módulo sensor individual

La conexión de cada uno de los módulos sensores con el controlador maestro se hace a través del protocolo de comunicación UART, apoyada con un multiplexor debido a problemas de comunicación con el protocolo I2C de cada sensor. El Arduino Nano se encarga de reunir la información de los sensores y a esperar la instrucción del controlador maestro para enviar a este. Con esta configuración y con el multiplexor 74SLN151 se permiten contactar hasta ocho módulos sensores con el controlador principal pero solo tiene habilitados seis.

Subsistema de control

El controlador principal, se encarga de activar o desactivar todos los componentes, como el riego, la iluminación, la ventilación inducida, a través de relevadores los cuales actúan como un interruptor controlado eléctricamente permitiendo abrir o cerrar el circuito eléctrico encendiendo de esta manera las bombas de agua, y las lámparas LED. En cuanto a los ventiladores estos son activados de manera similar con un MOSFET. El diagrama de conexión Figura 4.12.

de comunicación para programar y acceder al bootloader (ICSP y UART), también tiene la conexión con la pantalla táctil y los distintos componentes como el Reloj (RTC DS3231) y el adaptador de la tarjeta micro SD, referente a las flechas de entrada y/o salida, esta etapa recibe alimentación de la etapa de potencia, envía y recibe información de los sensores y manda la señal de control a la etapa de distribución y actuadores, activando o desactivando la bomba de agua, la iluminación LED y los ventiladores a través de relevadores de estado sólido, relevadores mecánicos y de módulos MOSFET respectivamente.

En base al diagrama de la Figura 4.13 se realizó un diseño y propuesta de una placa de circuito impreso o PCB (Print Circuit Board) por sus siglas en inglés, este es un circuito donde todos sus componentes están contenidos en una superficie, conectados por pistas o rutas de un material conductor laminadas sobre un material no conductor.

Utilizando el software EAGLE V7.6 se procedió realizar las propuestas de PCBs tanto para los módulos sensores individuales como para la placa principal, a esta placa se le adicionarán leds que funcionaran como indicadores para cerciorar la actividad de los pines del módulo multiplexor, además de un módulo buzzer para mejorar la interfaz, las propuestas quedaron como se muestra en la Figura 4.14:

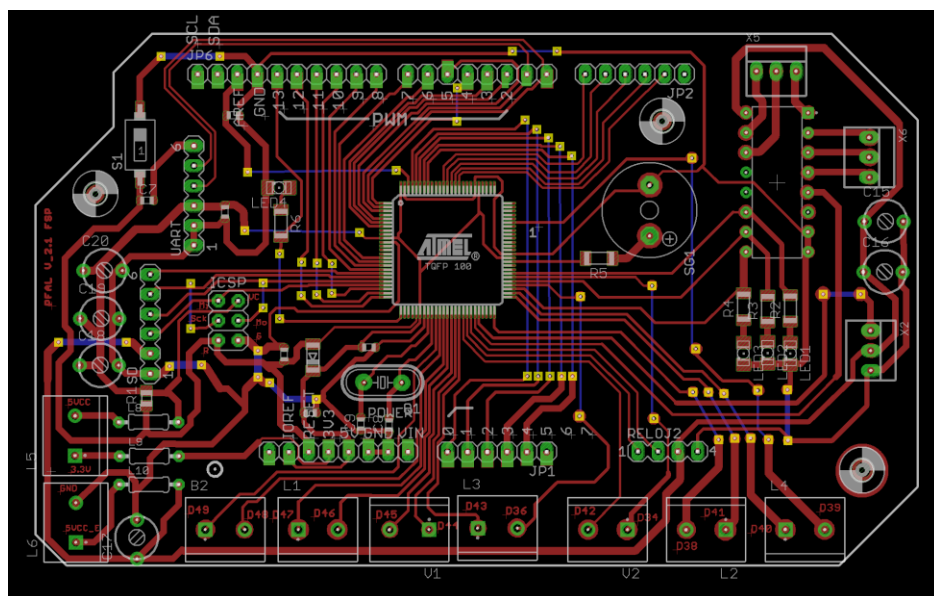


Figura 4.14. Esquema del diseño de PCB

En base al diseño de la Figura 4.14 se procesó, obteniendo los archivos Gerber de los componentes, pads, máscara y rutas, estos documentos también se encuentran en los materiales suplementarios para su fabricación. Para este trabajo se utilizaron los archivos Gerber y con un método semi-tradicional se fabricó la PCB, y se utilizó un equipo laser de fibra de 30 W, obteniendo el resultado que se muestra en la Figura 4.15.

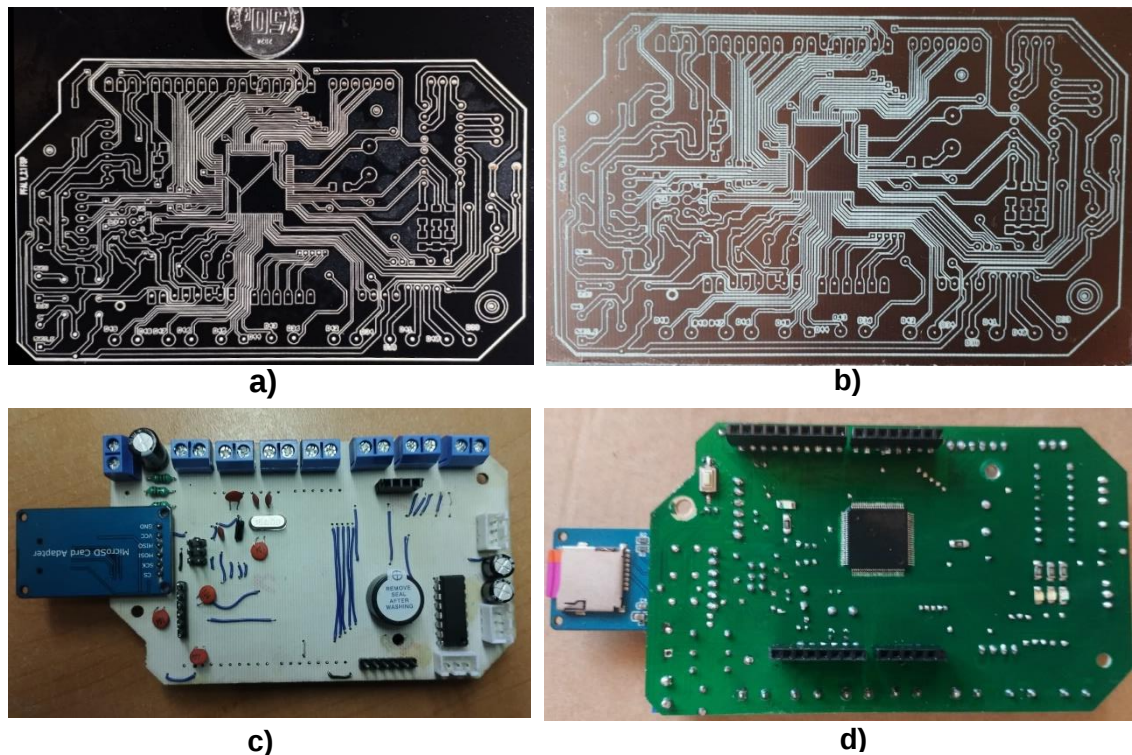


Figura 4.15. PCB fabricada de manera manual a) Primera etapa: capa de pintura con el diseño de la PCB, b) Segunda etapa: proceso del baño en cloruro férrico y limpieza, c) PCB terminada vista posterior, d) PCB terminada vista frontal

La PCB ya terminada con todos sus componentes se integró en una carcasa fabricada por impresión 3D como se muestra en el diseño de la Figura 4.16. El explosionado del modelo a detalle con todos los componentes que lo integran así como sus vistas y dimensiones se puede ver en el ANEXO C: Vistas Controlador y ANEXO D: Vistas Explosionada Controlador.

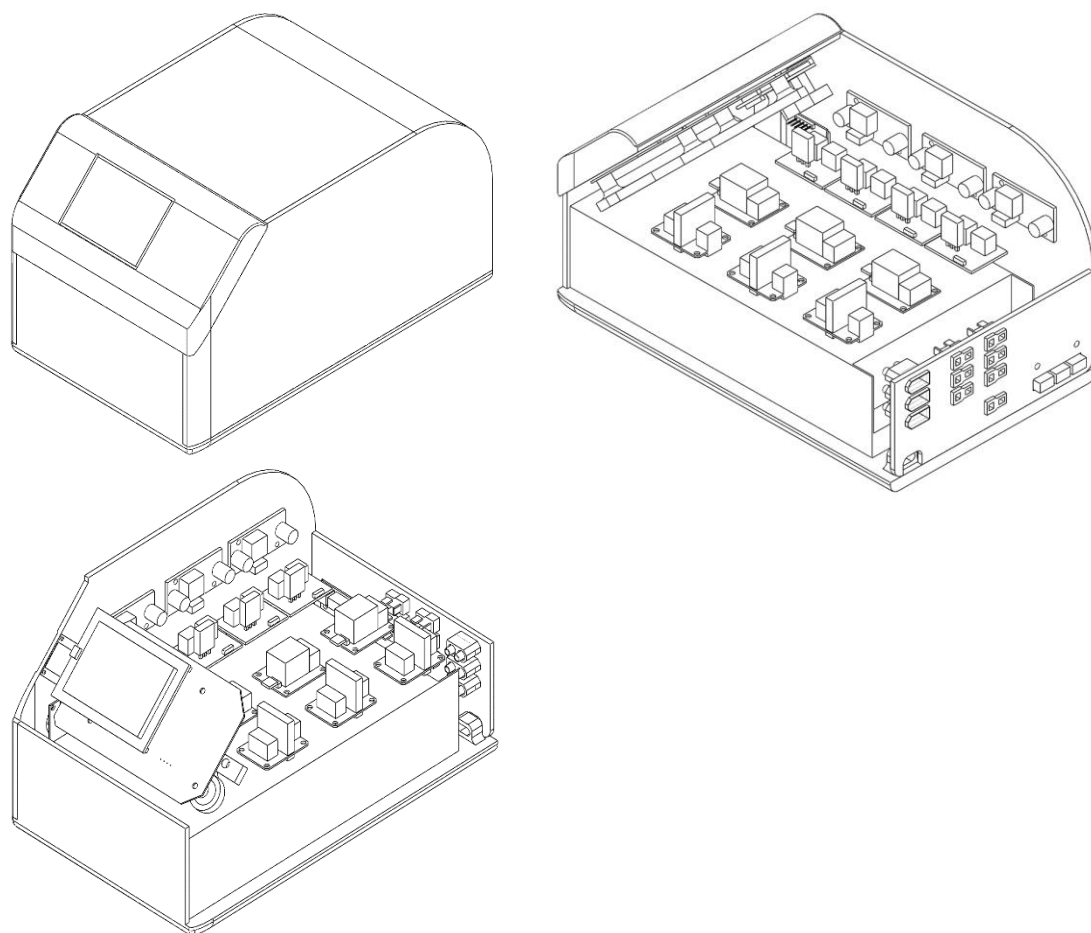


Figura 4.16. Vistas del Controlador principal con todos los componentes conectados

El controlador principal (Figura 4.17), tiene una capacidad para conectar mínimo tres módulos mini-PFAL, a los que se le puede modificar el fotoperiodo, horario de riego e intensidad de los ventiladores. También tiene la capacidad para conectar hasta seis módulos sensores.



a)



b)



c)



d)

Figura 4.17. Diferentes perspectivas del controlador principal construido y sus componentes, a) Vista frontal pantalla táctil, b) Vista trasera conectores, c) Vista lateral izquierda, acceso al reloj RTC y la tarjeta micro SD y d) Vista frontal sin tapa, pantalla táctil y conexión con PCB

Subsistema de interfaz gráfica de usuario (GUI)

El siguiente paso, después de armar el dispositivo, fue el código de programación, el cual contempla la interfaz gráfica de usuario, la captura de información de los módulos sensores y el control del sistema de riego, iluminación y ventilación, el código sigue la estructura presentada en el diagrama de flujo de la Figura 4.18 el código de programación también se encuentra en los materiales suplementarios.

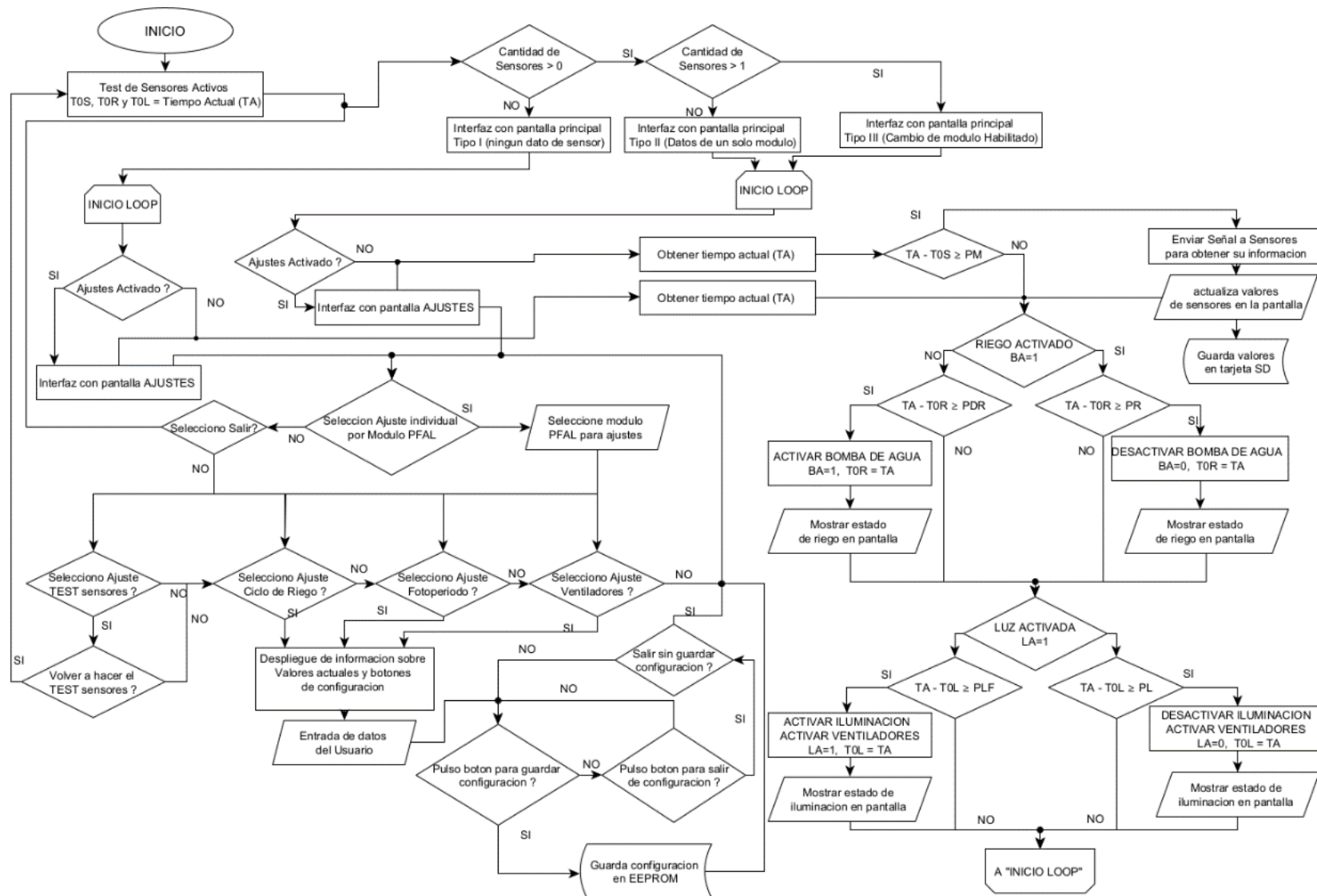


Figura 4.18. Diagrama de flujo del código de programación

El código de programación está basado en lenguaje C, el cual es un código estructurado, este comienza con el encendido, se hace una prueba de los sensores que tiene activos ya que en base a la cantidad de sensores se muestra la interfaz y se habilitan más acciones, hay tres posibilidades: a). más de un sensor conectado, b): un solo sensor conectado y c). ningún sensor conectado en los tres casos la pantalla táctil muestra información diferente como se observa en la Figura 4.19

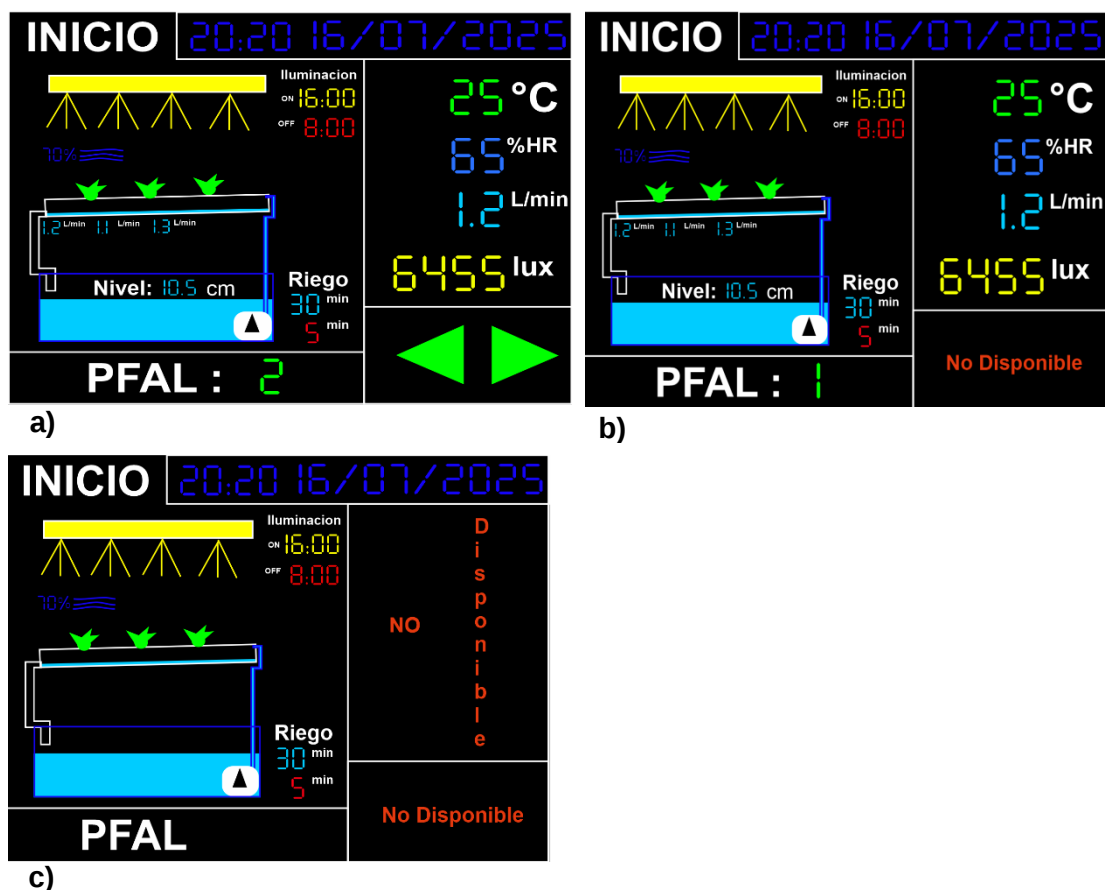


Figura 4.19. Imagen de la interfaz táctil , sus diferentes variantes a) Mas de un sensor conectado, b) Un solo sensor conectado y c) ningún sensor conectado

Las pantallas presentan ligeros cambios en cuanto a estructura, la Figura 4.19 a) es la opción cuando se conectan más de un sensor, esta muestra los datos obtenidos por los sensores y tiene habilitado el cambio de módulo sensor con las flechas verdes en la posición inferior derecha ya que normalmente un módulo sensor va conectado a un módulo mini-PFAL, la Figura 4.19 b) muestra un solo sensor conectado en esta pantalla se despliega la misma información que en la anterior, con la excepción que no tiene habilitado el

cambio de módulo, por último se tiene la pantalla sin sensor (Figura 4.19 c) esta solo muestra la información de la configuración (riego e iluminación), tener ningún sensor conectado no significa que no se tengan módulos PFAL conectados, esto solo implica que no se están tomando datos de sensores.

Las pantallas difieren en ciertos aspectos, pero todas tienen habilitado un ciclo o void loop en el que se ejecutan las instrucciones de control (Figura 4.18). Constantemente se está revisando la hora del reloj como factor de decisión y en base a la configuración, activar o desactivar riego, iluminación y ventiladores o consultar información con los sensores para los casos en los que se tiene conectados esta consulta termina con la actualización de los datos en la pantalla principal y con el guardado de estos en la memoria micro SD. Para acceder a la configuración se debe pulsar en cualquier punto donde nos muestra la hora y fecha del reloj o donde se muestra la información del módulo sensor, como se muestra en la Figura 4.20.

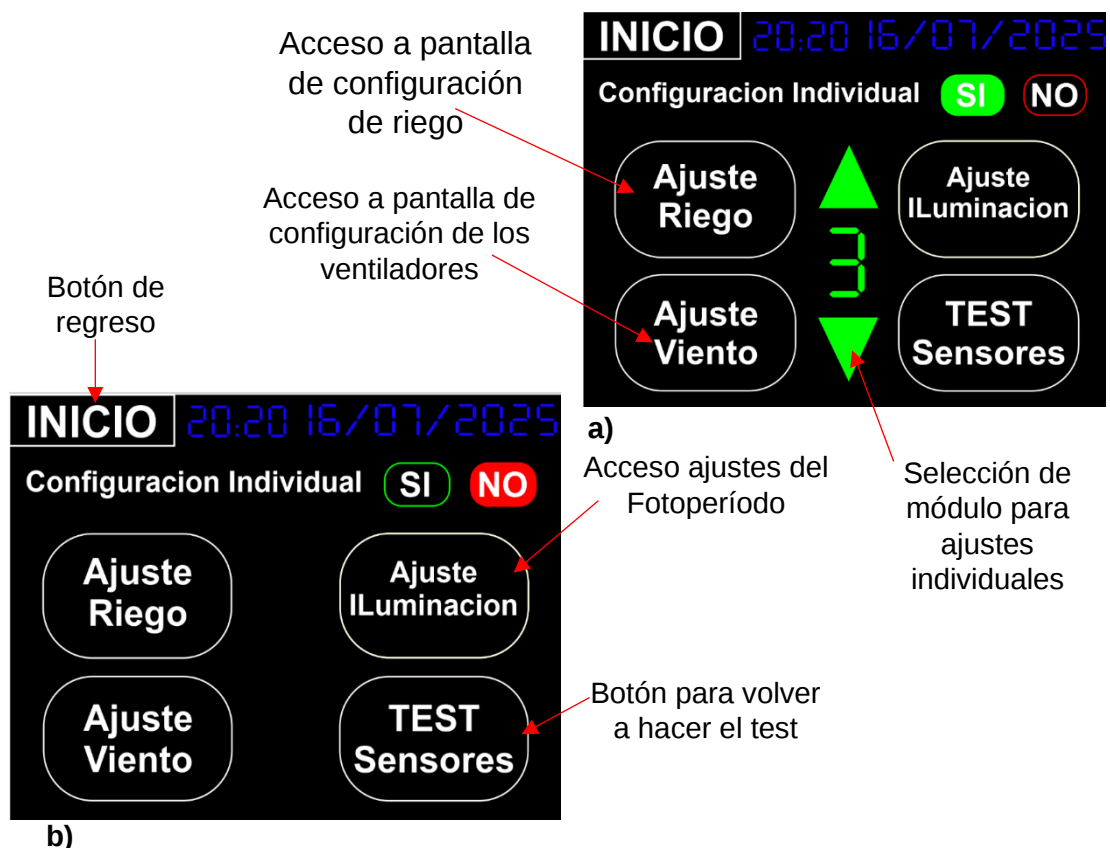


Figura 4.20. Pantalla de ajustes para los módulos a) configuración individual y b) configuración general

En la pantalla de ajustes para regresar a la pantalla principal solo basta con pulsar en el área de la palabra INICIO. En esta pantalla se pregunta si se quiere hacer una configuración individual o general para los módulos mini-PFAL tomando en cuenta que este controlador tiene capacidad para 3 módulos. Cada uno de los botones al pulsarlos nos lleva a una pantalla diferente en la que se pueden configurar los distintos parámetros a excepción del botón “TEST sensores” este nos pregunta para volver a hacer la inspección de sensores activos, si se vuelve a pulsar en confirmar vuelve a hacer el test y nos lleva a la pantalla principal una vez terminado, las otras pantallas de ajustes se ven como en la Figura 4.21.



Figura 4.21. Pantallas de ajustes individuales a) Ajuste del Riego, b) Ajuste del Periodo de luz, c) Ajuste de la potencia de los ventiladores y d) Opción de volver a hacer el Test

Las pantallas de la Figura 4.21 son las pantallas de ajustes de cada parámetro, si se eligió un ajuste individual por módulo se mostrará un pequeño indicativo en la parte superior derecha como el que tiene la Figura 4.21 a). Estas pantallas tienen un botón de guardar y otro de salir, al momento de

pulsar el botón guardar si es que se modificaron los valores se guardarán en la memoria EPROM en donde la información estará a salvo incluso si se corta la energía, si se pulsa el botón salir no se guardará ninguna información y volverá a la pantalla anterior de ajustes, para salir de los ajustes basta con pulsar en el icono de inicio y se volverá a la pantalla principal cualquier momento.

El código de programación, en conjunto con la interfaz gráfica, constituye el sistema de control del módulo mini-PFAL, permitiendo la interacción básica con el usuario, quien establece las condiciones de operación del sistema.

4.3. Resultados

Se obtuvo un módulo mini-PFAL funcional como se muestra en la Figura 4.22 con todos los componentes integrados como se planteó en el diagrama esquemático de los componentes principales.



Figura 4.22. módulo mini-PFAL terminado

En la Figura 4.22. el componente gris es la cubierta, la cual cuenta con cierre que permite el acceso al módulo mini-PFAL. En cuanto al costo de construir y fabricar, los materiales se enlistan en el Cuadro 4.2

Cuadro 4.2. Relación del costo de los materiales y componentes de fabricación, las categorías se encuentran desglosadas en el ANEXO A: *Cuadro relación de precios material*

Categoría	Descripción	Costo Total (MXN)
Estructura principal	PTR 3/4", Cubierta, tornillo, base y piezas impresas	4,135
Iluminación	Lámparas	14,400
Sistema NFT y tuberías	Tubos NFT,PVC sanitario CPVC, Válvulas, conexiones, Geomembrana	5,111
Controlador principal	Microcontrolador ATMEGA2560, módulo lector micro SD, MOSFET, relés, display TFT, PCB	1,243
Sistema de ventilación	Ventiladores, base, cable dúplex, extractor	733
Módulo Sensor	Sensores, temperatura, flujo	295

El costo de los materiales y diferentes componentes de un módulo mini-PFAL resulto en \$25,918 MXN con una distribución de los costos como se puede ver en la Figura 4.23.

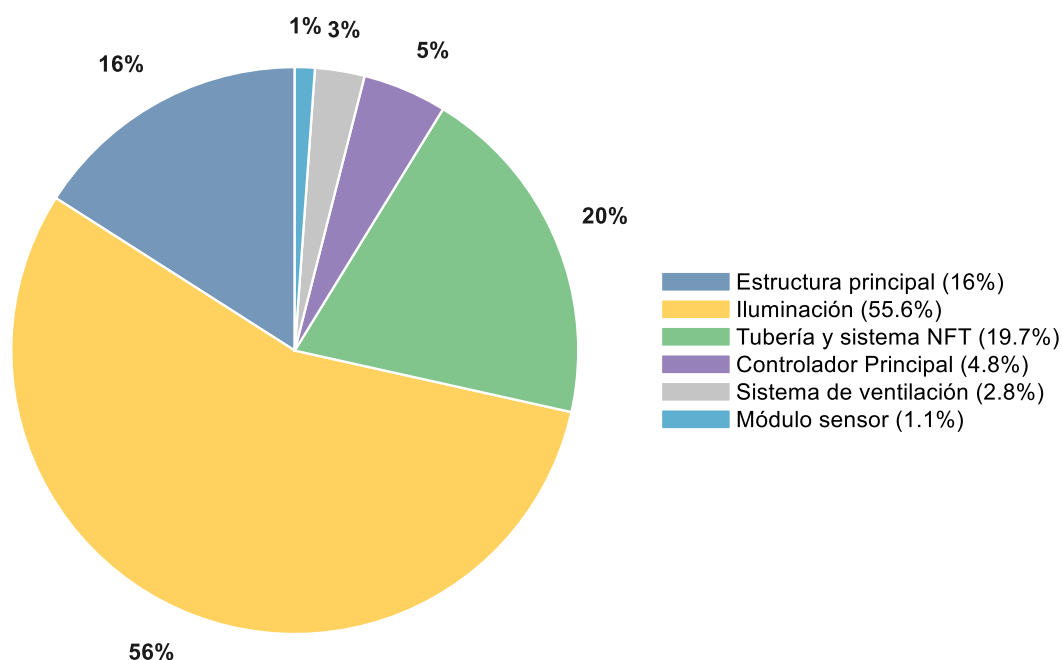


Figura 4.23. Distribución de costos de un módulo mini-PFAL

En la Figura 4.23 se aprecia que el mayor gasto en estos sistemas es las lámparas LED, seguido de la tubería, especialmente los tubos para hidroponía NFT.

En el Cuadro 4.3 se desglosan los costos de producción ya sea que se compre plántula o se decida germinar.

Cuadro 4.3. Costos para un ciclo de producción de Lechuga Mantequilla en MXN

Concepto	Cantidad	Costo unitario (MXN)	Subtotal (MXN)
Plántula comprada	81	3.5	283.5
Plántula producida	81	1	81
Solución Nutritiva (L)	241	0.55	132.5
Consumo Energético(kW)	296	3.21	950.16

El costo de plántula producida incluye el precio de semilla certificada, aproximadamente \$ 0.5 MXN y de la espuma fenólica aproximadamente \$0.5 MXN por cada cubo de germinación.

Para el costo energético se consideró la tarifa de un consumo excedente de acuerdo con la empresa CFE en México. El gasto de un ciclo de producción dependiendo del origen de la semilla puede disminuir un poco, pero en general el costo de producción de una lechuga se encuentra alrededor de \$15 MXN.

Tomando en consideración el costo de materiales y componentes \$25,918 MXN, con un precio de mercado de alrededor de \$15-25 MXN por lechuga una producción de 972 lechugas por año, la amortización del costo únicamente de materiales y componentes se realizaría en 2.6 años.

4.4. Conclusiones

Se diseñó un módulo mini-PFAL completamente funcional, con una capacidad de producción de 81 lechugas por ciclo de producción y con potencialmente 12 ciclos por año. El costo aproximado de construcción es de \$ 25,900 el cual tendría una vida útil de 8.5 años (basado en el no. de horas que duran las lámparas). El mayor gasto es de las lámparas y el de los tubos especiales para hidroponía NFT, en cuanto a los costos de producción se obtuvo un gasto de \$ 15 pesos MXN por cada lechuga teniendo como mayor gasto el consumo de energía, en cuanto al tiempo de amortización sería de 2.6 años para recuperar del gasto únicamente de materiales y componentes. Si bien estas

cifras representan una desventaja respecto a sistemas de producción convencionales, se tiene un amplio margen de mejora y se pueden hacer más eficientes en el uso de la energía con una mayor densidad de plantas en las primeras etapas. Además, el constante desarrollo tecnológico en la iluminación ha disminuido el costo de adquisición de las lámparas, desde 2024 a la fecha de octubre 2025 las lámparas han disminuido su precio en casi un 40 %. Considerando un cultivo más rentable o incluso una variedad de lechuga con mayor valor en el mercado, se podría mejorar la rentabilidad. Independientemente de que sea una opción rentable, las mini-PFAL son una opción a utilizarse para consumo propio o en restaurantes.

En cuanto al desarrollo tecnológico y de investigación el módulo mini-PFAL, permite un amplio marco de experimentos enfocados a la producción en zonas urbanas, mejorando aspectos importantes y de preocupación ciudadana.

4.5. Referencias

- Alcántara Nieves, N., & Larroa Torres, R. M. (2022). *La multifuncionalidad de los huertos urbanos en la Ciudad de México. Espiral (Guadalajara)*, 29(83), 187-229.
- Al-Kodmany, K. (2018). *The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City. Buildings*, 8(2), 24. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
- Borbón, D. S. U., & De La Torre, J. M. O. (2020). *Huertos urbanos como estrategia de resiliencia urbana en países en desarrollo. Vivienda y Comunidades Sustentables*, (8), 81-102.
- Csambalik, L., Gál, I., Madaras, K., Tóbiás, A., & Pusztai, P. (2024). *Beyond Efficiency: The Social and Ecological Costs of Plant Factories in Urban Farming—A Review. Urban Science*, 8(4), 210. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040210>
- Kozai, T., & Niu, G. (2020). *Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In Plant factory (pp. 7-34). Academic Press.*

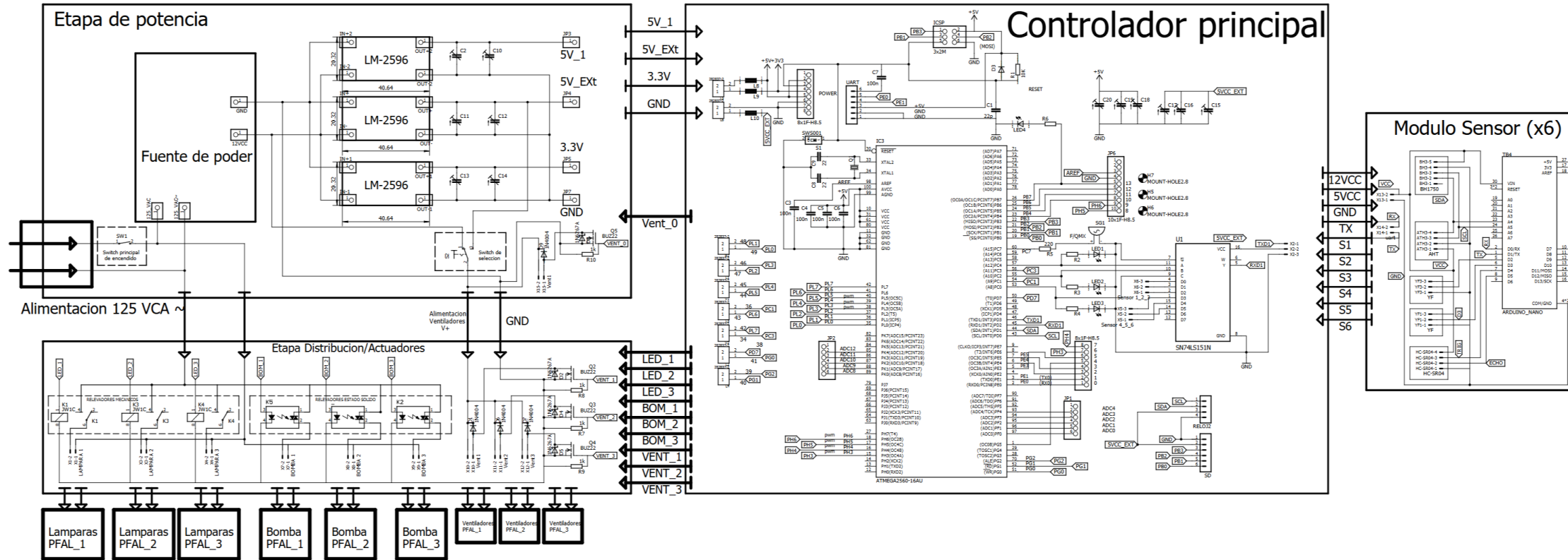
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). (2019). *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic press.
- Kozai, T., Fang, W., Chun, C., Yang, Q., Tong, Y., Cheng, R., ... & Lu, C. (2015). *PFAL business and R&D in the world: Current status and perspectives*.
- Pérez-Figueroa, C. E., Salazar-Moreno, R., Rodríguez, E. F., Cruz, I. L. L., Schmidt, U., & Dannehl, D. (2023). Heavy Metals Accumulation in Lettuce and Cherry Tomatoes Cultivated in Cities. *Polish Journal of Environmental Studies*, 32(3), 2293-2308.
- Rajendran, S., Domalachenpa, T., Arora, H., Li, P., Sharma, A., & Rajauria, G. (2024). *Hydroponics: Exploring innovative sustainable technologies and applications across crop production, with Emphasis on potato mini-tuber*
- Ray, D. K., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley, J. A. (2013). Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PloS one*, 8(6), e66428. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428>
- Takagaki, M., Hara, H., & Kozai, T. (2020). Micro-and mini-PFALs for Improving the quality of life in urban areas. In *Plant factory* (pp. 117-128). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00006-6>

ANEXO A: Cuadro relación de precios material

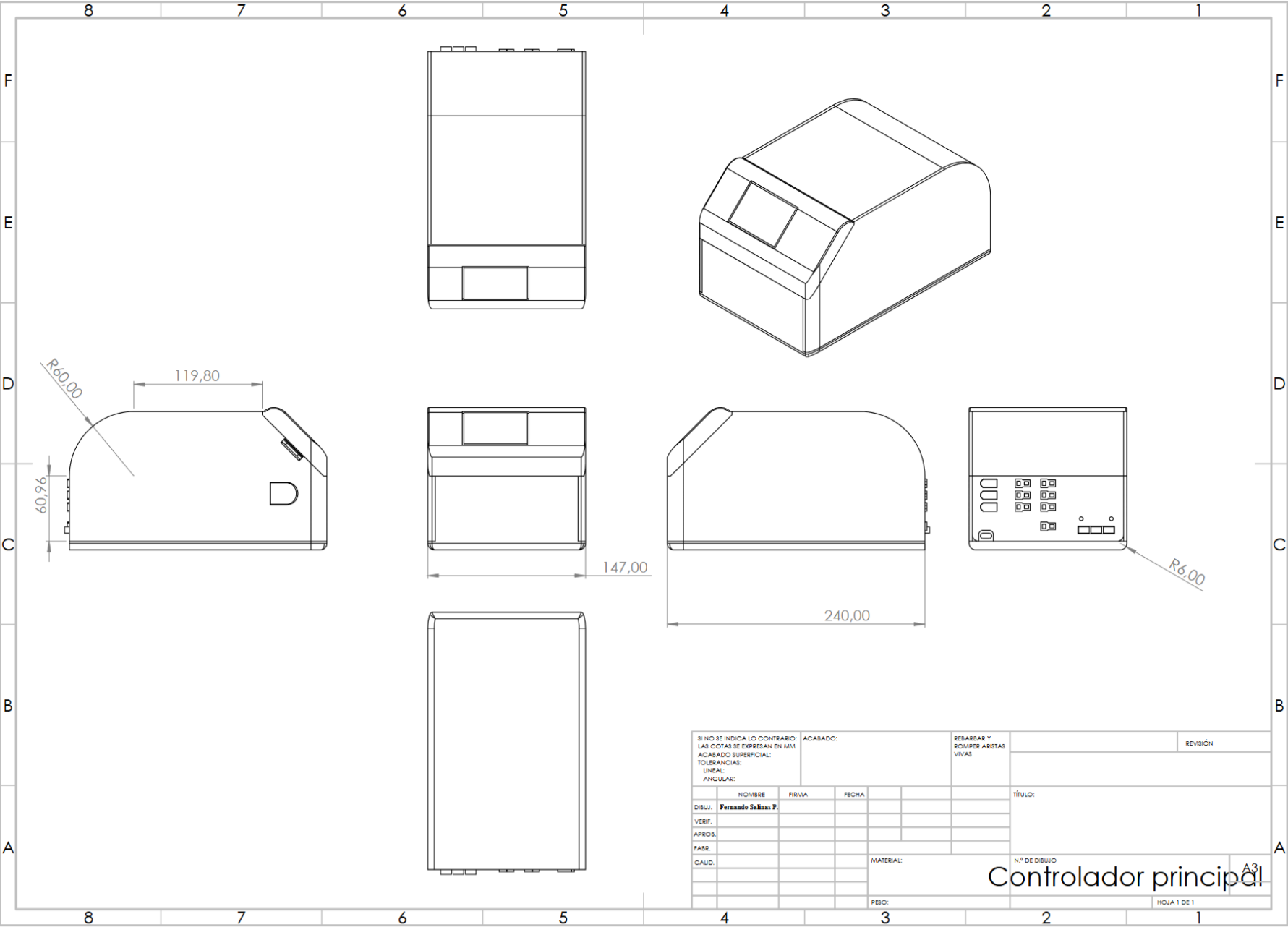
Elemento	Cantidad/Unidad	Costo unitario	subtotal
PTR 3/4"	29.37 m	17.96	527.5
Cubierta Armario	1	3200	3200
Tornillos	120	1.2	144
Lámparas Hitekgro	18	800	14400
Tubo NFT	10.8 m	346	3736.8
Tubo PVC sanitario 3"	2 m	32	64
Tubo PVC sanitario 2"	2 m	24	48
Tubo PVC sanitario 1"	2 m	16	32
Codo PVC sanitario 1" 90°	9	7	63
Codo PVC sanitario 2"	3	12	36
Unión T 2"	2	16	32
Cople PVC sanitario 3"	6	9	54
Tapa PVC sanitario 3"	3	9	27
Reducción PVC sanitario 3" a 2"	3	18	54
Cople tubin	9	1.47	13.23
Goma para cople tubin	9	2.59	23.31
Tapa Tubo CPVC 13mm	4	0.86	3.44
Tee CPVC 13mm	3	2.58	7.74
codo CPVC 13mm 90°	3	2.58	7.74
Válvula CPVC 13mm	4	37.93	151.72
Tubo CPVC 13mm	3.5 m	18.97	66.395
Tubin	1.35 m	5	6.75
Bomba de agua	1	441	441
geomembrana	1.35 m ²	60	81
Ventiladores	12	50	600
Ventilador extractor	1	50	50
cable dúplex 22 AWG	7 m	5	35
Cable dúplex cal 11	3 m	9	27
esquineros	8	20	160
base plantas	81	2	162
ajustador nivel	9	3	27
soporte ventilador	12	4	48
Carcaza del controlador	1	100	100
Piezas extra	5	10	50
microcontrolador ATMEGA2560	1	200	200
Buzzer	1	1	1
Push Button	1	3	3
Pinheader hembra	1	4	4
PinHeader Macho	1	4	4
LED SMD	4	0.41	1.64
Resistencia SMD	5	1	5
adaptador SD	1	24	24
Bornera KF301 de 2 pines	4	4	16
Multiplexor SN74LS151N	1	14	14

Cristal Oscilador 16 MHz	1	5	5
Capacitor cerámico de 22pF	3	0.5	1.5
Capacitor 100nf	5	0.5	2.5
Inductores	3	2	6
Placa Fenólica de cobre 10x15 cm	1	26	26
Diodo Rectificador 1N4007	1	1	1
Conector XH2.54mm	18	1.5	27
Relevador 5V	3	21	63
Relevador solido 4 canales	1	116	116
IRF520 MOSFET 5A	4	19	76
Regulador LM2596 25W 3A	3	30	90
Conector XT60 par	3	16	48
Conector de batería tipo T	7	14	98
Tarjeta SD 16GB	1	120	120
Shield Display TFT 2.4"	1	191	191
Sensor de flujo YF-201	1	79	79
Sensor de luz BH1750	1	42	42
Sensor AHT10	1	40	40
Arduino Nano	1	89	89
Placa Fenólica de cobre 5x5cm	1	5	5
Conector XH2.54mm	2	1.5	3
Ventilador	1	37	37
		Total	25,918

ANEXO B: Diagrama Electrónico



ANEXO C: Vistas Controlador



ANEXO D: Vistas Explosionada Controlador

