

PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANT FACTORY CON ARQUITECTURA DE CÁMARA PRISMÁTICA HEXAGONAL, PARA CRECIMIENTO DE CULTIVOS DE HORTALIZAS (VARIEDAD ROMANA PARRIS ISLAND) EN FORMATO DE MURO VERTICAL^a

DESIGN OF A PLANT FACTORY WITH A HEXAGONAL PRISMATIC CHAMBER ARCHITECTURE, FOR GROWING VEGETABLE CROPS (ROMAN VARIETY PARRIS ISLAND) IN A VERTICAL WALL FORMAT

Castellanos-Serrano, L.T.*; Gómez-Águila, M.V.; Chávez-Mota, R.; Salinas-Paniagua, F.

Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México Texcoco Km. 38.5, Chapingo, Texcoco, Edo. De Méx. *Autor de Correspondencia: procesoslcce@hotmail.com

Fecha de envío: 14, octubre, 2022

Fecha de publicación: 16, diciembre, 2023

Resumen:

Las *Plant Factory* o por sus siglas PFAL, son una industria que busca la creación de microclimas controlados para el crecimiento acelerado de los cultivos con sistemas de control automáticos para la gestión oportuna de las variables dependientes e independientes del sistema, existen diferentes formatos de diseño como son los módulos ortédricos, muros verticales, columna vertical, entre otros. El diseño que se expone corresponde a un PFAL con arquitectura de cámara prismática hexagonal, como propuesta para el crecimiento de variedades de lechuga *romana parris island* (no se delimita a esta especie únicamente). Enseguida se expone la metodología de diseño, misma que se emplea para formular los pasos técnicos para abordar el objeto de estudio y el ordenamiento de las variables dependientes e independientes del sistema. En los resultados se presentan la propuesta técnica con ayuda de sistemas CAD y los diagramas de proceso para la explicación del sistema en su conjunto. En las conclusiones se reflexiona acerca de las posibilidades arquitectónicas de los PFAL y la viabilidad de la propuesta de agrónoma aplicada en la agricultura Indoor.

Palabras clave: PFAL, Agricultura vertical, microclima, Indoor, hexagonal.

^a Proyecto de investigación universitario

Abstract:

Plant Factories, also known as PFAL (Plant Factory with Artificial Lighting), are an industry that aims to create controlled microclimates for the accelerated growth of crops using automatic control systems for timely management of the dependent and independent variables of the system. There are different design formats such as orthohedral modules, vertical walls, vertical columns, etc. This paper presents the design proposal for a PFAL with a hexagonal prismatic chamber architecture as a proposal for growing varieties of romaine lettuce parris island (not limited to this species only). The applied design methodology is presented, which is used to formulate technical steps to address the object of study and order the dependent and independent variables of the system. Subsequently, the technical proposal is presented using CAD systems and process diagrams to explain the system as a whole in the results. Finally, the conclusions reflect on the architectural possibilities of PFALs and the feasibility of the proposal of agronomics applied to indoor agriculture.

Keywords: PFAL, Vertical agriculture, microclimate, Indoor, hexagonal

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico exponencial que se ha vivido en los últimos 100 años, ha sido un parteaguas para cambiar los esquemas tradicionales de trabajo, el acceso a las TIC's (Tecnologías de la Información y la Comunicación) son cada vez más flexibles, con la introducción de la comunicación 5G se promete un crecimiento exponencial de las telecomunicaciones, la cual promete un aumento de las capacidades de los dispositivos móviles desde el enfoque de comunicación M2M (machine to machine), con prestaciones de inteligencia artificial que permitirán expandir las capacidades de las comunicaciones para el fortalecimiento de las casas, empresas e industrias inteligentes (Jaramillo, 2017).

La agricultura y el escenario contemporáneo de evolución tecnológica , exigen nuevos métodos y herramientas que acuñen a la agricultura conocida como 4.0, aun así las tecnológicas que engloba esta revolución industrial agrícola, es muy acotada. Hoy se habla de una agricultura 5.0 (Melgar, 2018), que engloba aspectos de la inteligencia artificial y la robótica, esquemas tecnológicos que son parte de los sistemas de producción alimentarios modernos, conduciéndolos, así, al rumbo a una agricultura digital o dentro del marco del crecimiento tecnológico, se puede también nombrar agricultura inteligente.



El agricultor moderno es un sujeto que, a diferencia de otras décadas, cuenta con el acceso a la tecnología. tan solo en la temática de uso de Smartphone se estima: Para 2020, 91.8% de los usuarios de teléfono celular cuenta con un equipo inteligente (Smartphone); 78.3% de la población urbana es usuaria de internet. En la zona rural la población usuaria se ubica en 50.4% (Gobierno de México, 2021). Lo que indica que las TIC's cada día van abarcando más terreno dentro de las vidas de las personas, y se pueden enfocar para las actividades del campo con mayor flexibilidad a diferencia de otros años.

Ahora bien, rumbo a un 2050 (no lejano), el panorama de crecimiento poblacional no pinta nada bien, dado que se estima una población de casi 9,000 millones de personas a nivel mundial, los planes, estrategias y protocolos por los organismos mundiales como la FAO, optan que uno de los ejes claves para diseñar soluciones es la agricultura de precisión, creando tecnologías que permitan en todas las áreas de la agricultura robotizar o automatizar los procesos productivos, que por medio de los sistemas inteligentes se solventen las tareas para alimentar una población de esa magnitud (Contreras, 2021:90). Mientras tanto en el foro del día mundial de la alimentación 2022 México, la FAO trazó la agenda para afrontar la crisis alimentaria y el plan de cero hambres, donde reporta que para 2022 casi el 8% de la población mundial padece esta situación y es necesario emprender programas para amortizar estas cifras con una meta a corto plazo con visión hacia el 2030 (FAO, 2023).

Un área que ha ganado terreno en los últimos años para las industrias del cultivo de hortalizas, son las *Plant Factory with Artificial Lighting* (PFAL), estas máquinas son microambientes controlados que permiten ajustar las variables dependientes e independientes del sistema para operarlas en su punto óptimo, el desarrollo de estos dispositivos data de los años 1980. En diferentes tipos de experimentos realizados por Estados Unidos y China arrancaron, a partir del año 2000, los estudios investigativos de crecimiento acelerado de cultivos que empiezan a tener mejoras en los resultados, motivando así a otros países de todo el globo a sumarse a las propuestas investigativas. En los años 2010 a la fecha esta técnica de crecimiento de cultivos en ambientes controlados empieza alcanzar su cúspide y la industrialización exitosa (Kozai, 2016).

La revisión del estado de arte que lleva a cabo Contreras Avilés, destaca el impacto actual que los PFAL tienen en la industria mundial, de manera que los países líderes que llevan estas tecnologías a la vanguardia son Japón, Corea, Taiwán, China, Estados Unidos y Holanda, donde la producción y ganancias destacan números altamente competitivos; tan solo Japón reporta una producción de 10,000-23,000 cabezas de lechugas por día y la ganancia neta promedio de hortalizas por los procesos de las Plant Factory llegan hasta los 500 millones de dólares, en superficies que alcanzan las 6 hectáreas de producción en ambientes adaptados para estas tecnologías (Contreras, 2020).

De este modo, la técnica de las Plant Factory pertenecen a la corriente de la agricultura Indoor, que busca desarrollar técnicas para cultivar en espacios dentro de casa, empresa, organizaciones, industrias, etcétera. Su naturaleza permite el desarrollo de diferentes categorías de PFAL, que van desde los formato miniPFAL, de escala de producción menor orientado preferentemente a casas, hasta los macroPFAL los cuales van orientados a la industria y a la alta productividad (Kozai, 2016) lo que permite atacar la problemática de los procesos de producción nacionales, aumentando las posibilidades de exportación, exponenciando los canales de comercialización y así combatir las necesidades del crecimiento y demanda poblacional, como llave para afrontar el desabasto alimenticio.

El escalamiento y la introducción de las tecnologías PFAL juegan un rol sumamente importante para el agricultor posmoderno, fungiendo como agente clave para el tema de la soberanía alimentaria y el ahorro de recurso hídrico (Ding et.al., 2014).

Estos dispositivos tienen la cualidad de ser microambientes controlados, con sistemas de alta automatización que involucran multisistemas como son: los procesos de instrumentación; control; etapas de potencias; interconectividad IoT; gestión de información de Data Warehouse; programación multiparadigma, etcétera. Todos ellos pertenecientes a las áreas de la agricultura 4.0 y 5.0. Contextualizado en el marco de estudio de la agrónoma, es su columna vertebral.



Las propuestas de PFAL existen en diferentes versiones, desde sistemas de muros verticales, acuapónicos, hidropónicos, aeropónicos, columnas verticales, entre un mundo de propuestas que se amplían día con día, lo que conllevan a la versatilidad adaptativa que cumple tres características importantes:

1. Sistemas recursivos de ahorro de recurso hídrico enriquecidos con soluciones nutritivas
2. Uso eficiente de iluminación artificial para maximización de los tiempos de exposición lumínica de las plantas para aceleración fotosintética
3. Maximización de los espacios de siembra a través de la verticalidad (Kozai, 2019)

El objetivo del presente documento es exponer la propuesta de diseño de PFAL que permita por medio de la arquitectura prismática hexagonal, detonar la mejoras en los ecosistemas artificiales de crecimiento, desde un punto de vista diferente al de otras propuestas implementadas en la industria e investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo expone una metodología de diseño aplicado con enfoque de diseño agrónico.

El enfoque metodológico empleado es del tipo experimental, la recolección de datos se ha realizado a través de instrumentos de archivos de memorias técnicas, donde se han recopilado las propuestas de diseño, estos instrumentos divididos en tres secciones:

1. Mecánico: Documentación de diseño, planos de diseño (2D), planos de diseño industrial (3D), planos de ensamblaje (explosionados 3D) y archivo de acervo digital (piezas, ensamblajes y planos), empleo de método de diseño ascendente (SolidWorks, 2022)
2. Electrónico: Especificaciones de diseño, esquemas electrónicos (bajo normas americanas), simulación en laboratorios virtuales, montaje y mediciones, diseño de circuitos impresos (PCB), pruebas (Díaz, 2018, p. 10)
3. Software: Memoria técnica de Ingeniería de Software, análisis de requerimientos, modelado de requerimientos; diseño de la arquitectura, análisis de pruebas, modelado del software, estimación de costos, calendarización, administración del riesgo y mantenimiento (Pressman, 2010).

Metodología del proceso para el diseño experimental

Tipo de estudio: Explicativo

Hipótesis experimental: Diferencia de grupos atribuyendo causalidad

Diseño del experimento: Experimental puro y transeccional causal (Hernández, 2014, p. 163)

Especificaciones de diseño del microambiente: En proceso de mejora y rediseño continuo.

Tipo de experimento: Cómo afecta en el crecimiento de lechugas romanas el diseño del microambiente instrumentado, bajo las especificaciones de diseño técnicas del módulo PFAL

Variables independientes:

1. Dimensiones cubicas del microambiente (m³)
2. Temperatura del habitat (°C)
3. Nivel de iluminación (Lux)
4. Espectro luminoso (nm)
5. Riego
 - a. Flujo (L/H)
 - b. Ciclos/Día (#)
6. Solución nutritiva (L)
 - a. Macronutrientes y micronutrientes (%g)
 - b. Acidez (pH)
 - c. Conductividad eléctrica (S/cm)

Variables dependientes:

1. Humedad (%RH)
2. Tasa de crecimiento (g)
3. Peso seco (g)
4. Área Foliar (m²)

Pasos de experimentación:

Paso 1: Evaluación de las variables independientes y dependientes

Paso 2: Elementos de manipulación de las variables independientes, dependiendo el caso algunas son con actuadores eléctricos, instrumentos de medición, procedimientos manuales, entre otras, en el cuadro 1 describe el caso particular para cada una (Hernández, 2014).

Cuadro 1. Manipulación de las variables independientes del sistema Plant Factory con arquitectura de cámara prismática hexagonal (Autoría propia).

Table 1. Manipulation of the independent variables of the Plant Factory system with hexagonal prismatic chamber architecture.

No. de variable independiente	Medida	Subvariable	Elemento de manipulación
1	Metros Cúbicos (m ³)		Medidas del microambiente: altura, anchura y base del prisma (Baumont, 2022)
2	Temperatura (°C)		Sistema eléctrico de calefacción y ventilación por sistema de lazo cerrado (sensor de temperatura digital)
3	Iluminancia (Lux)		Sistema eléctrico de control difuso y sensor de luminosidad
4	nanómetros (nm)		Sistema de control difuso
		Flujo (L/H)	Sistema de control electrónico (señal PWM)
	Litros (L)		
5		Ciclos/Día (#)	Sistema electrónico de control timer (reloj digital)
		Macronutrientes y micronutrientes (%g)	Preparación manual por cantidades en báscula de precisión
6	Litros (L)		
		Acidez (pH)	Supervisión con instrumento de medición
		Conductividad eléctrica (S/cm)	Supervisión con instrumento de medición

Paso 3: Diseño de instrumento para medición de las variables dependientes (Cuadro 2).



Cuadro 2. Propuesta de instrumentos de medición para evaluación de variables dependientes (Autoría propia).

Table 2. Proposal of measurement instruments for the evaluation of dependent variables.

Variable dependiente	Instrumento de medición
Humedad (%RH)	Bitácora de evolución de grupo con instrumento de medición Termómetro Higrómetro Her-428 Steren
Tasa de crecimiento de cultivo (g)	Registros por días intermedios con báscula de precisión de laboratorio
Peso fresco y seco de cultivo (g)	Registros por días intermedios con báscula de precisión de laboratorio
Área foliar de cultivo (m ²)	Acervo fotográfico, registros por días y estudio con programa de cálculo de visión artificial

Paso 4: Se estableció como cultivo experimental lechuga romana de la variedad *parris island*, con ello se diseñaron las rutas críticas de la experimentación de crecimientos en el microhábitat artificial controlada involucrando las variables independientes, el comportamiento de la interacción de las variables dependientes e independientes (Cuadro 3).

Paso 5: Aplicar las prepruebas y pospruebas de crecimientos de lechugas romana *parris island* en el microhábitat artificial controlada, aplicación de los instrumentos de cuantificación para la evaluación de las variables dependientes y la correlación en el crecimiento de las plantas conforme la variación de las variables independientes. En este paso, algunos sujetos serán expuestos a condiciones diferentes, algunos basados en la literatura y las recomendaciones para esperar un máximo crecimiento, otras en ajustes empíricos y otras más para evaluaciones comparativas, y con ello poder cotejar los resultados para solventar las hipótesis experimentales planteadas durante los diferentes procesos de experimentación.



Cuadro 3. Efectos de las variables independientes sobre las variables dependientes (Kozai, 2016).

Table 3. Effects of the independent variables on the dependent variables (Kozai, 2016)

No. de variable independiente	Relación matemática	Descripción
1	$V_T = V_A + V_{LW} - V_L$	$V_T(m^3)$ = Volumen Total; V_A = Volumen de la cámara de aire; V_{LW} = Volumen de solución nutritiva en camas de cultivo; V_L = Volumen de perdida
2	$T_H = (A_A + A_L) \cdot 526.565$	$T_H(^{\circ}C)$ = Temperatura del Habitat; $A_A (MJ m^{-2}h^{-1})$ = Consumo de electricidad de los acondicionadores de aire; $A_L (MJ m^{-2}h^{-1})$ = Consumo de electricidad de las lámparas
3	$LUE_L = \frac{fD}{PAR_L}$	LUE_L = Eficiencia en el uso de la energía lumínica con respecto al PARL; $f (MJ KG^{-1})$ = Factor de conversión de masa seca de la planta a energía química; $D (\mu mol m^2 h^2)$ = Tasa de aumento de masa seca de las plantas; $PAR_L (MJ m^{-2}h^{-1})$ = Radiación fotosintéticamente activa emitida por las lámparas
4	400 nm (luz azul) y 700 nm (luz roja)	Los cambios en desviación estándar (+ o - %) producen daños o beneficios colaterales durante los tiempos de crecimiento de cultivo de lechuga (García et.al., 2018:112)
5	$WUE = \frac{W_c + W_p}{W_s}$	WUE = Eficiencia en el uso del agua; $W_c (kg m^{-2}h^{-1})$ = Agua líquida recolectada para uso reciclado en el PFAL; $W_p (kg m^{-2}h^{-1})$ = Agua retenida en plantas en el PFAL; $W_s (kg m^{-2}h^{-1})$ = Tasa de suministro de agua líquida en el PFAL
6	$FUE = \frac{I_U}{I_S}$	FUE =- Eficiencia en el uso de fertilizantes inorgánicos; $I_U (mol m^{-2}h^{-1})$ = Tasa de absorción del elemento iónico de fertilizante inorgánico "I" por las plantas; $I_S I_U (mol m^{-2}h^{-1})$ = Tasa de suministro del elemento iónico de fertilizante inorgánico "I" suministrado al PFAL

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objeto de estudio propone el diseño para la fabricación de un módulo de microambiente prismático hexagonal, el módulo propuesto se basa en la experiencia de diseño en sistemas ortoédricos, una serie de prototipos fabricados con anterioridad, que en la experimentación se retroalimentó con información técnica de prueba y error, recolectando valiosos datos para el ajuste y la experiencia necesaria para realizar pruebas exitosas en cultivos de lechuga en la variedad romana (orejona) y romana parris island, tal y como se muestra en la figura 1 (Castellanos et.al., 2022).



Figura 1. Resultado de producción de lechuga cultivado en Plant Factory en un tiempo de 45 días desde germinación hasta cosecha (Autoría propia).

Figure 1. Production result of lettuce grown in Plant Factory in a time of 45 days from germination to harvest.

El módulo propuesto, es una cámara de cosecha con medidas estándar con dimensiones ajustadas para que una persona pueda acceder al microambiente, la propuesta de diseño se puede apreciar la figura 2.



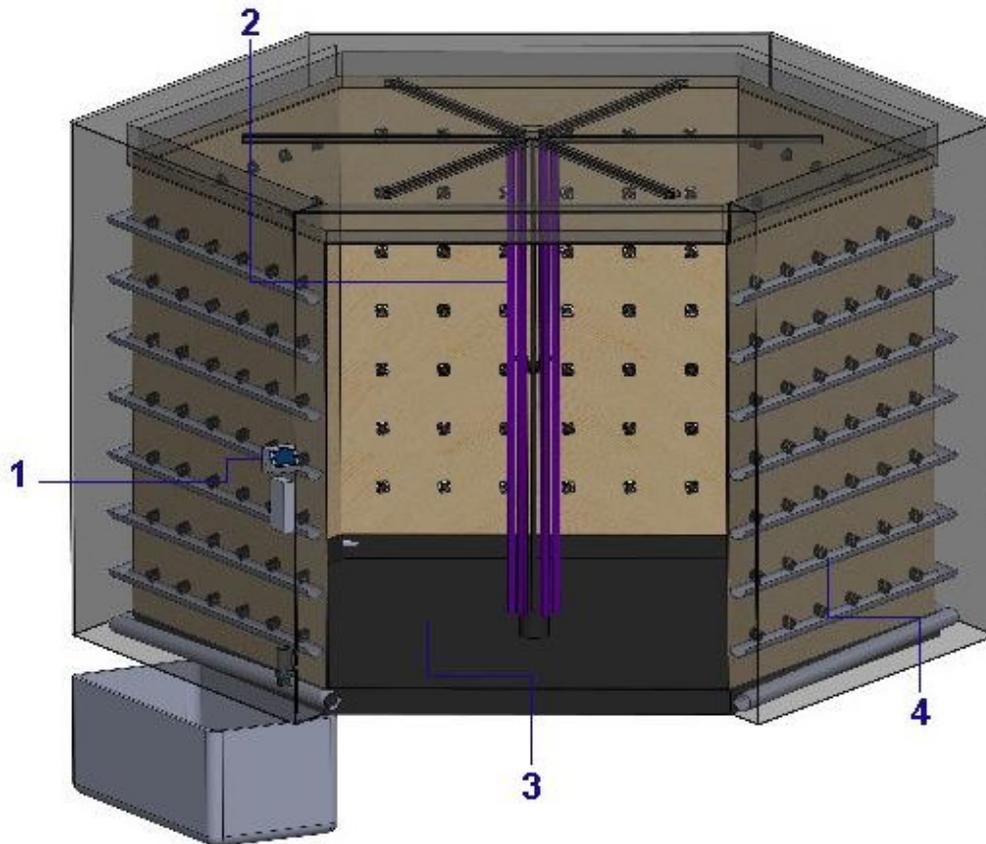


Figura 2. Sistema de producción de microambiente controlado con diseño de prisma hexagonal para cultivos de lechuga. (Autoría propia)

Figure 2. Controlled microenvironment production system with hexagonal prism design for lettuce crops.

La cámara tiene dimensiones de pared a pared de aproximadamente 2.8 m, lo cual provee un microambiente controlado para fácil operatividad por el usuario, el sistema cuenta con 4 secciones importantes:

1. *Sistema de control principal:* Tablero de control para los ajustes operativos de la cámara, donde se controla las variables dependientes e independientes del sistema como son: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Humedad (%RH), Luminosidad (Lux), ciclos de riego, tiempo de riego, etcétera.



2. *Sistema de iluminación:* Dotado con un mecanismo interno que permite realizar el desplazamiento axial de las luces; la radiación lumínica que las plantas requieren es insuficiente para acelerar el proceso fotosintético, por lo tanto, el sistema retráctil permite acercar un panel de Led's de luz compuesta (2400 led's), dando la dosis adecuada y ajustando su carrera conforme se realiza el crecimiento del cultivo en el muro de siembra (el panel de luminarias no se anexó en la figura 1 para apreciar mejor el modelo, los soportes de color morado indican puntos de fijación para los paneles)
3. *Cámara interna de siembra:* Compuesto por 6 paredes internas que conllevan los puntos de siembra para el crecimiento de los cultivos dentro del microambiente controlado, el cultivo crece en el muro, recibiendo la radiación de las luminarias y la alimentación por la pared de atrás, los espacios están calculados con una tolerancia de aproximadamente 25 cm circundantes para un crecimiento adecuado del cultivo de lechuga, y cuentan con una inclinación de 30° con respecto al muro.
4. *Sistema de riego :* En la parte interna del muro, se encuentra un cajón con acceso de puerta, que aísla a las raíces del contacto con la luz, también cuenta con un circuito hidráulico que recolecta la solución nutritiva para abastecer un sistema de tubería con una pendiente de aproximadamente 5° de inclinación con respecto a nivel de piso, la cual, se encuentra por todo el muro vertical interconectado, de este modo y bajo la anatomía de los contenedores de raíces la solución nutritiva cae en forma sincrónica a todos los puntos de siembra por acción de la gravedad por el circuito hidráulico, hasta llegar al punto de recolección de retorno y así reabastecer el depósito de solución nutritiva, de este modo el proceso se vuelve cíclico.

Las cuatro secciones globales anteriormente descritas, explican ha groso modo el formato de funcionamiento, el Cuadro 4 describe de forma puntual las especificaciones técnicas de las variables operativas del sistema en su acción conjunta.

Cuadro 4. Características técnicas del módulo de cámara prismática hexagonal (Autoría propia).

Table 4. Technical characteristics of the hexagonal prismatic camera module.

Sección	Característica técnica	Resultado
Características generales	Puntos de siembra por pared	42 puntos
	Cantidad de muros verticales	5 muros
	Puntos de siembra totales	210 puntos
	Separación entre cada punto de siembra	25 cm
	Dimensiones de los muros de siembra	200 x 161 cm
	Volumen total de la cámara	14 m ³
	Temperatura interna operativa	26 – 32 °C
Hidráulica	Dimensiones de los protectores de raíces	Las canastillas se representan como un cilindro de 5 cm de diámetro por 5.2 cm de largo, más la saliente que sirve de soporte a la plántula que se representa por un cilindro recortado de forma angular con un diámetro de 5 cm por un largo de 41 mm en su parte más corta y 3.5 cm en su parte más larga
	Volumen del depósito	310 L
	Tipo de bomba hidráulica	Diafragma
	Capacidad de la bomba de agua	5 L/min
	Periodos de riego	Intervalos de 10 min de activación por periodos de 15 min durante el día. En noche 10 min de activación en periodos de 2 horas
	Flujo de solución nutritiva suministrado por cada riego	50 litros suministrados por cada periodo de riego
	Recorrido del líquido por el sistema de riego	59.3 m de recorrido
Iluminación	Tipo de led's	SMD 5730
	Cantidad de Led's por pared	2400 Led's totales (1600 rojos, 560 azul, 160 blancos, 80 IR)
	Consumo por muro	480 kWh
	Consumo total luminarias	2.4 kWh
	Nivel de iluminación esperada	6000 lux
	Horas de trabajo al día	16 horas
	Consumo esperado por día	38.4 kWh
Producción (Plantas)	Especie	Preferentemente lechuga <i>Romana Parris Island</i> o <i>Maximus</i> , y también derivados
	Valores de σ (Conductividad eléctrica)	Plántula: 1.2-1.4 dS/m Desarrollo: 1.6-1.7 dS/m Final: 1.8-2.0 dS/m

Continuación Cuadro 4

	Valor de pH	5.5-6.5
Producción (Plantas)	Especificaciones de la solución nutritiva	1000 L contiene: Macronutrientes: Nitrógeno (N) 115 ppm, Fósforo (P) 31 ppm, Potasio (K) 248 ppm, Calcio (Ca) 94 ppm, Magnesio (Mg) 32 ppm, Azufre (S) 72 ppm Micronutrientes: Hierro (Fe-EDTA) 150 ppm, Manganeseo (Mn-EDTA) 0.30 ppm, Zinc (Zn-EDTA) 0.80 ppm, Cobre (Cu-EDTA) 0.05 ppm, Boro (B) 0.25 ppm, Molibdeno (Mo) 0.35 ppm (INVERFARMS, 2022)
	Tiempo de cosecha	40-45 días (contando tiempo de germinación)
	Peso esperado por planta	330 gr
	Volumen total de cosecha esperado	69.3 kilogramos

En el punto 1 se especifica el sistema de control principal, el cual es un conjunto de subsistemas electrónicos y de programación que de forma simbiótica operan el control de la cámara prismática hexagonal, así el usuario cuenta con una interfaz para el control y ajuste de las variables operativas del sistema, la figura 3 muestra la interacción de la interfaz de control en formato de diagrama de flujo de sistema (Lucidchart, 2022) con los elementos de actuación y la manipulación de las variables independientes de la cámara de crecimiento.

Como se puede observar en la figura 3, la interconexión de los flujos de proceso dota al dispositivo de una red de intercambio de variables para establecer su operatividad, en el cuadro 5 se describe de forma más clara la interacción de los procesos de flujo técnico operativo.



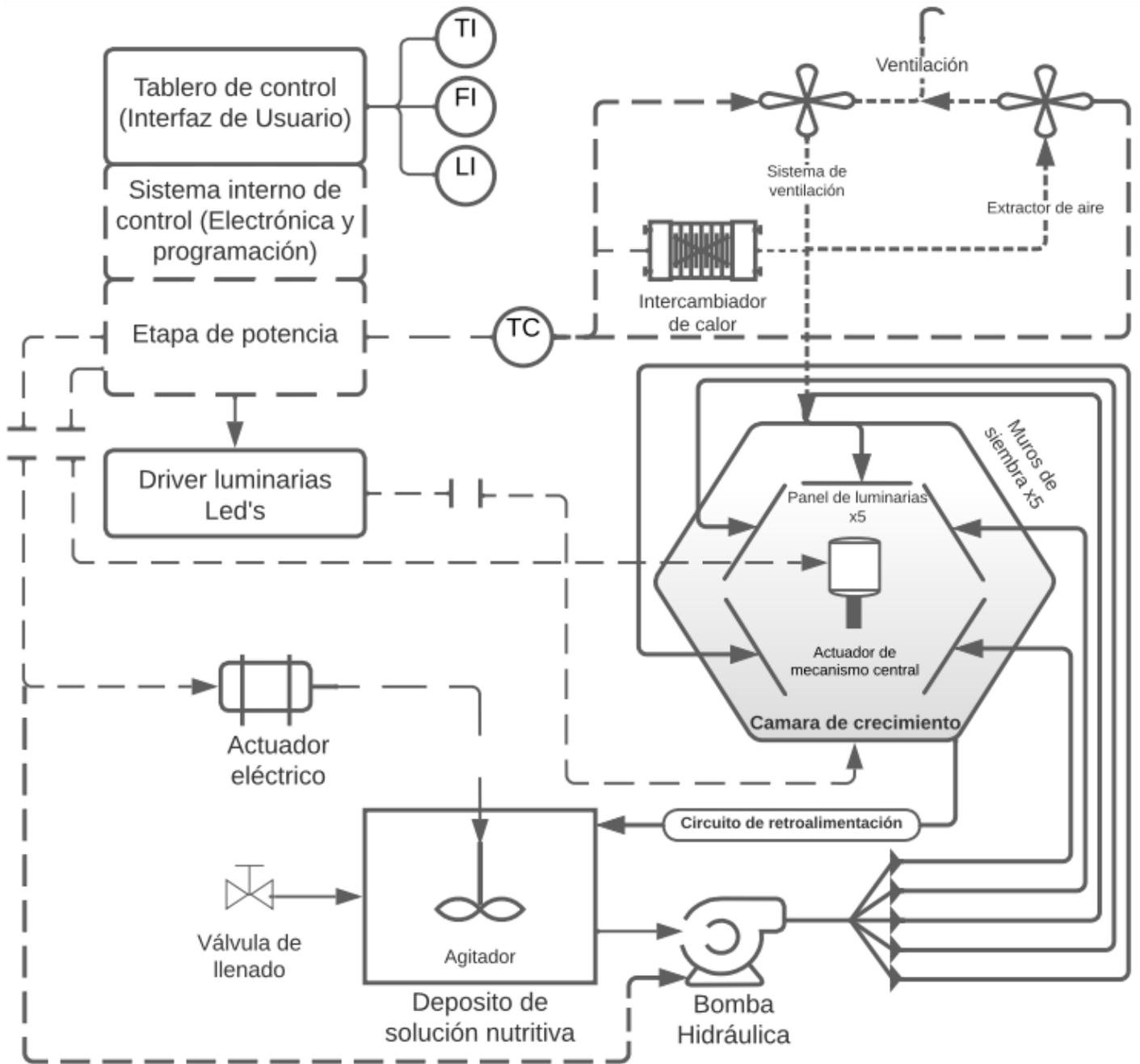


Figura 3. Diagrama de flujo de sistema de elementos operativos de cámara prismática hexagonal (Autoría propia).

Figure 3. Hexagonal prismatic chamber operating element system flow chart.

Cuadro 5. Explicación de los procesos y subprocesos del sistema (Autoría propia).

Table 5. Explanation of the processes and threads of the system.

Proceso	Subproceso	Descripción
Tablero de control	Interfaz de usuario	Contiene la pantalla TFT de 3.5" para el despliegue de información, así como los botones tipo <i>microswitch push button</i> como interfaz de entrada e indicadores de temperatura (<i>TI</i>), flujo (<i>FI</i>) y nivel (<i>LI</i>)
	Sistema interno de control	Sistema embebido de control que cuenta con un sistema microcontrolado para el soporte de algoritmo de programación de control y gestión de la operatividad por la configuración de los componentes electrónicos
	Etapas de potencia	Asilamiento electrónico del sistema embebido y los actuadores de potencia, envía señales de control: 1. Controlador de temperatura (<i>TC</i>) para la gestión del sistema de ventilación en sus tres partes (Intercambiador de calor, Sistema de ventilación y extractor de aire) 2. <i>Drivers de luminarias</i> , suministra la potencia energética necesaria a los paneles de luminarias Led 3. Señal de activación para <i>actuador mecánico central</i> para activar el recorrido de carrera hacia adelante o atrás, y así ajustar la carrera de las luminarias en el punto focal correcto (de 25 a 30 cm con respecto a la masa foliar del cultivo), los paneles cuentan con sensores de proximidad para saber qué tan lejos o cerca se encuentran en promedio de la masa foliar 4. Señal de activación para <i>actuador eléctrico</i> , la cual, por medio de una brida transfiere el torque al dispositivo <i>agitador</i> de la solución nutritiva y la activación de la bomba de diafragma para impulsar el riego
Sistema hidráulico	Señal eléctrica	Especificado en el diagrama como línea punteada regular - - - →
	Depósito de solución nutritiva	Tanque de 310L para contener la solución nutritiva enriquecida con los macros y micronutrientes.
	Válvula de llenado	Válvula de perilla manual para relleno del <i>depósito de solución nutritiva</i>
	Agitador	Sistema de aspas helicoidales para agitación de la solución nutritiva
	Bomba hidráulica	Bomba de tipo diafragma para empuje de la solución nutritiva para alimentación del circuito hidráulico
	Circuito de retroalimentación	Conexión de tubería hidráulica con conexión de retorno al <i>depósito de solución nutritiva</i>
	Tubería hidráulica	Especificado en el diagrama como línea continua →
	Ventilación	Sistema de adquisición de aire del exterior

Continuación Cuadro 5

Control de ventilación y temperatura	Sistema de ventilación	Sistema para ingreso de aire a la cámara, cuenta con algunos filtros para atrapar partículas externas de tamaño moderado
	Extractor de aire	Sistema para expulsión de gases por proceso fotosintético y aire caliente
	Intercambiador de calor	Sistema para calentamiento o enfriamiento del aire ingresado por el <i>sistema de ventilación</i> (por lo cual cuenta con dos módulos), el aire inyectado por el sistema de ventilación puede ser calentado por un sistema resistencias eléctricas o enfriado por un sistema de compresión de gases por un intercambiador de calor tubular, la acción de control depende de la configuración de temperatura promedio que se censa (por medio de los sensores instalados en puntos estratégicos dentro del hábitat artificial) y se configura en la cámara de crecimiento
	Circuito de ventilación	Especificado en el diagrama como línea punteada corta -----▶
Cámara de crecimiento	Muros de siembra	Muro vertical que cuenta con receptáculos de siembra para el crecimiento de las variedades de cultivos, por la parte de atrás de la cámara corre el circuito hidráulico que alimenta con solución nutritiva a las plantas, y así protege a la raíz del contacto con la luz
	Paneles de luminarias	Paneles de 480 kW/h con 2400 led's (ver cuadro 2), conectados al mecanismo de carrera lineal operado por el <i>actuador mecánico central</i> para el despliegue o repliegue de los 5 paneles conectados, se ajusta por medio de sensores de posición a 25-30 cm con respecto a la masa foliar
	Actuador de mecanismo central	Actuador de carrera lineal de pliegue y despliegue que mueve forma sincrona los 5 <i>paneles de luminarias</i> , para ajustarlos a la distancia correcta con respecto al muro, el panel en su carrera cero se retrae lo suficiente para permitir la entrada a una persona a la <i>cámara de crecimiento</i> , así, realizar los procesos de siembra, cosecha, inspección y mantenimiento necesarios

Como se puede apreciar la interconexión de los sistemas permite operar de forma sinérgica todos los procesos de la cámara prismática hexagonal para así brindar una mini-hábitat sintética con las condiciones óptimas de crecimiento artificial.

Un punto particular del sistema es el mecanismo para el control de los paneles de iluminación, esto garantiza que las hortalizas tengan radiación lumínica adecuada durante la mayor parte de su crecimiento, esto se logra al instalar una serie de sensores de proximidad (sensores ultrasónicos e infrarrojos), para así

promediar en los 5 muros el crecimiento de la masa foliar, como el sistema es un mecanismo que aporta la misma distancia a los 5 paneles, el promedio de ajuste garantiza en una desviación estándar de $\pm 5\%$, una distancia adecuada durante toda la etapa de crecimiento.

CONCLUSIÓN

Las propuestas comunes de PFAL en su mayoría lideran en formas ortoédricas, los cuales dentro de la industria han demostrado tener un gran liderazgo, por el gran aprovechamiento de las fuentes lumínicas, temperatura, humedad y eficiencia en procesos de riego, aun así el mundo de los PFAL debe reinventarse, las columnas verticales proponen sistemas circundantes que captan la radiación lumínica por medio de los filtros de invernaderos o fuentes artificiales, por otro lado los muros verticales adoptan estrategias similares, pero las cápsulas con fuente lumínica central, tienen aún, caminos de experimentación ingenieril para adoptarse como alternativas dentro del ámbito de las Plant Factory, la experimentación y el estudio de la eficiencia de cultivos en los diferentes formatos, es la única vía para retomar datos cuantitativos y realizar un análisis de comparativa de la geometría óptima que estos sistemas debieran llevar para generar reflexiones técnicas sobre ¿qué técnica es mejor?, ¿cuáles cultivos se adaptan mejor a las diferentes geométricas?, ¿ventajas y desventajas sobre las diferentes formas? Y, finalmente, posibilite dar respuesta a las hipótesis planteadas sobre las investigaciones de las formas de modelos de utilidad y patentes que permitan ser una directriz para el diseño óptimo de los sistemas de producción de las Plant Factory.

Realizar el estudio por sistema CAD para la simulación de un análisis de elementos finitos para predecir los resultados de control de temperatura y su afectación sería otra etapa para complementar la propuesta del presente microclima, al ser una cámara casi hermética la temperatura se puede controlar de forma sencilla con los sistemas de ventilación, calefacción y, en su caso, los de enfriamiento necesarios, dado que las perturbaciones al sistema son mínimas.



Un controlador PID puede mantenerlas en estados óptimos operativos, la experiencia práctica en el tema de temperatura en los sistemas ortoédricos de baja escala, han sido sencillos de establecer en su *set point* operativo óptimo, sin necesidad de algoritmos de *machine learning*.

Con los datos la memoria técnica obtenidos en la experimentación y el diseño de módulos ortoédricos se tienen los elementos técnicos para plantear propuestas de diseño de un sistema de cámara Plant Factory con arquitectura de cámara prismática hexagonal en formato de muro vertical; tal y como se ha expuesto en la propuesta de diseño planteado a lo largo del presente trabajo

Agradecimientos

Los resultados forman parte de proyecto de Desarrollo y Transferencia de Tecnológica (DTT), impulsados por los programas de investigación de la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), así mismo a la línea de investigación No. 6 de “Ciencia y tecnología aplicada en la agricultura 4.0 para el desarrollo rural” perteneciente al centro de investigación No. 82 CIISCINACYC, del Departamento de Sociología Rural y la División de Ciencias Económico Administrativas.

LITERATURA CITADA

Baumont De Oliveira, Francis. (2022). A Typology Review for Vertical Plant Farms: Classifications, Configurations, Business Models and Economic Analyses. 10.13140/RG.2.2.24729.49766/2.

Castellanos, L. T., Gómez, M. V., Paniagua, F., Castellanos, J. A., & Rodríguez, A. M. (2022). Software engineering for a mini-PFAL (plant factory with artificial lighting) with IoT interconnectivity. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*, 31(3).
<https://rcta.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1642>

Castellanos, L. T., Gómez, M. V., Sedano, G. & Pérez, M. A. (2022). Propuesta de diseño de un mini-PFAL aplicando metodología de Matriz de Marco Lógico. Reporte de Resultados de primera etapa de construcción y diseño. En ASMIIA, AC. (Eds.) *Políticas públicas, agricultura familiar y fortalecimiento rural* (págs. 26-43).

- Contreras Avilés, C. W. (2020). Fábrica de plantas con iluminación artificial para el cultivo y preservación sostenible de hierbas medicinales. *Revista Prisma Tecnológico*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.33412/pri.v11.1.2522>
- Contreras Hernández J. (2021). Retos alimentarios 2030: Objetivos, recomendaciones... alternativas, realidades. *Journal of Behavior and Feeding*, 1(1), 86–95.
- Ding, B.-J., Hofvander, P., Wang, H.-L., Durrett, T. P., Stymne, S., & Löfstedt, C. (2014). A plant factory for moth pheromone production. *Nature Communications*, 5(1), 3353. <https://doi.org/10.1038/ncomms4353>
- FAO (2023). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: México y FAO: colaboración por sistemas agroalimentarios sostenibles y resilientes, para no dejar a nadie atrás. (n.d.). Fao.org. Retrieved March 29, 2023, from <https://www.fao.org/mexico/noticias/detail-events/en/c/1609951/>
- García, J. E. B., Arriaga, A. I. M., Tavera, V. M., Hernández, J. R., & Nieto, J. E. R. (2018). USO EFICIENTE DEL AGUA DE PLANTAS DE LECHUGA EN RESPUESTA A DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 4(1), 109–113. <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/articula/view/2868>
- Gobierno de México. (2021). En México hay 84.1 millones de usuarios de Internet y 88.2 millones de usuarios de teléfonos celulares: ENDUTIH 2020. gov.mx. Recuperado el 2 de septiembre de 2022, de <https://www.gob.mx/sct/prensa/en-mexico-hay-84-1-millones-de-usuarios-de-internet-y-88-2-millones-de-usuarios-de-telefonos-celulares-endutih-2020?idiom=es>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6a. ed. --.). México D.F.: McGraw-Hill
- INVERFARMS HIDROPONIA MEXICO. (s/f). Com.mx. Recuperado el 29 de agosto de 2022, de <https://inverfarms.mercadoshops.com.mx>
- Jaramillo, N., Escuela Colombiana de Carreras Industriales, Ochoa, A., Páez, W., & Peña, A. (2017). TECNOLOGÍA 5G. *Revista de Ingeniería Matemáticas y Ciencias de la Información*, 4(8), 41–45. <https://doi.org/10.21017/rimci.2017.v4.n8.a31>
- Kozai Toyoki, Fujiwara Kazuhiro, Runkle Erik. (2016) *LED Lighting for Urban Agriculture*. Springer, Singapore.

- Kozai Toyoki, Niu Genhua, Takagaki Michiko (2015) Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. Academic. Springer, Singapore.
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2019). *Plant factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*. Academic Press.
- Lucidchart. *Notación y símbolos para Tubería e Instrumentación*. (s/f). Lucidchart. Recuperado el 28 de agosto de 2022, de <https://www.lucidchart.com/pages/es/notacion-y-simbolos-tuberia-e-instrumentacion>
- Melgar, M. (2018). AGRICULTURA DIGITAL O AGRICULTURA 4.0. Cengicana.org. Recuperado el 12 de septiembre de 2022, de <https://cengicana.org/files/2018091813553326.pdf>
- Murase, H. (2015). The latest development of laser application research in plant factory. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 3, 4–8. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.01.003>
- Pavas, A. (2016). Visibilidad de la Revista Ingeniería e Investigación. *Ingeniería e Investigación*, 36(3), 3. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v36n3.61596>
- Pressman, R. (2010). *Ingeniería del software: un enfoque práctico*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- Solidworks. *Métodos de diseño (diseño ascendente y descendente)*. (s/f). Solidworks.com. Recuperado el 5 de septiembre de 2022, de https://help.solidworks.com/2018/spanish/SolidWorks/sldworks/c_design_methods.htm
- Steren, (2023). Termo higrómetro digital. (n.d.). Retrieved March 31, 2023, from <https://www.steren.com.co/termo-higrometro-digital.html>

