



**UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA**

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**“Diseño de un sistema hidropónico orbital como alternativa de
producción de alimento de alta intensidad en zonas urbanas.”**

Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Como parte de los requisitos para aspirar al título y grado de
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DE BIOSISTEMAS

Sergio José Rojas Montero

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2019

Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



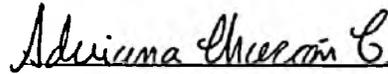
Ing. Mauricio Bustamante Román, PhD

Director de tesis



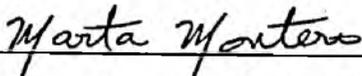
Ing. Geovanni Carmona Villalobos

Miembro, Equipo Asesor



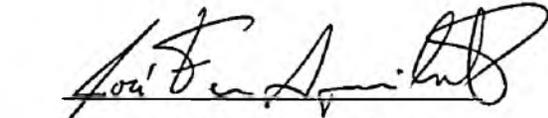
Adriana Chacón Cascante, PhD

Miembro, Equipo Asesor



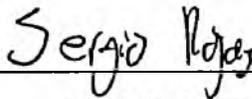
Ing. Marta Montero Calderón, PhD

Presidente, Tribunal Examinador



Ing. José F. Aguilar Pereira, MSc

Miembro, Tribunal Examinador



Sergio Rojas Montero

Estudiante

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por apoyar el proyecto desde el comienzo y ser una pieza fundamental para el desarrollo del mismo. A mi familia por brindar aliento de manera incondicional.

Al Ing. Geovanni Carmona por creer y promover la idea original de este proyecto.

Al Ing. Mauricio Bustamante por aceptar dirigir el proyecto, ayudar a crear y construir el equipo.

A la Dr. Adriana Chacón por participar en el proyecto y ayudarlo a prosperar.

Al Lic. Alexander Guerrero y al técnico Gregorio Fonseca por facilitar la ayuda necesaria para construir el equipo.

A la Lic. Kimberly Soto por todo el apoyo brindado.

A la Ing. Silene Vargas Garita y al Ing. Andrés Sánchez Sanabria por participar activamente a lo largo de la carrera en el desarrollo del proyecto.

Al Ing. Oscar Badilla Sánchez, Ing. Raiker Chaverri Quesada, Ing. Yonathan Herrera España y a los colegas Francisco Navarro, María Leal, Hillary Hernández, Krissia Parker por dedicar de su tiempo en ayudar con labores relacionadas al mantenimiento del equipo.

RESUMEN

Los retos de agricultura para los años 2030-2050 consisten principalmente en aumentar los rendimientos y la calidad del producto, mientras se disminuye la contaminación generada y el uso de fitosanitarios. Políticas internacionales procuran reducir el impacto del sector agropecuario en la lucha contra el cambio climático, fomentando la adopción de nuevas tecnologías de producción. Al mismo tiempo el aumento de la población en zonas urbanas y la migración de la población de zonas rurales disminuyen la cantidad de personas disponibles para agricultura dificultando el desarrollo del sector.

Por este motivo, la incorporación de nuevos métodos de producción de alimento es necesaria. Una alternativa es la adopción de las fábricas de plantas con luz artificial en zonas urbanas, que tienen un alto potencial para producir alimento de alta calidad en ambientes controlados y que reducen la cantidad de fitosanitarios necesarios. No obstante, el uso de este modelo implica un alto consumo energético, el cual debe ser solventado para reducir el impacto de esta tecnología.

En este proyecto de graduación, se diseñó y se construyó un sistema hidropónico orbital automatizado como método de producción de alimento, el cual aumenta el rendimiento en función del área utilizada, al mejorar la distribución de la luz artificial. Adicionalmente, posee un sistema de rieles que facilita la carga y descarga del producto comparado con sistemas orbitales existentes, es de fácil mantenimiento, construcción y operación. El diseño se realizó con base en materiales disponibles en el mercado de Costa Rica con una capacidad de producción de hasta 100 plantas, que son sujetadas por un sustrato inerte sumergido temporalmente en una cama de agua (con solución hidropónica). El equipo cuenta con un sistema de automatización que regula la velocidad de rotación, el encendido y apagado de luces, bomba de agua y ventiladores.

También tiene la capacidad de monitorear condiciones ambientales como temperatura y humedad relativa.

Se realizó una prueba de concepto con un prototipo del equipo en el cual se obtuvo un desarrollo de biomasa de 2,31 g en los primeros 20 días con un rendimiento de $3,06 \times 10^{-5} \frac{g}{kJ}$, presentando en promedio una masa menor de 1 g con respecto a lechugas de invernadero a los 30 días, en estudios consultados en la literatura.

Se determinó que el precio de venta por unidad de lechuga es de \$ 1,85 para ser viable financieramente con un VAN \$2.286,24 en un periodo de 2 años y un TIR de 8%. Se determinó que para implementar el sistema hidropónico orbital de manera industrializada, es necesario encontrar una alternativa para el sustrato a utilizar

Además, se recomienda utilizar un sistema de estantería modular para colocar las máquinas y evitar la construcción de marcos externos. Es necesario que los sistemas cuenten con toda la cadena de producción en la sección de poscosecha para asegurar la calidad del alimento, así como considerar utilizar sistemas de potencia hidráulica o neumática para operar los marcos orbitales y sistemas de control compartidos por varios equipos.

INDICE GENERAL

RESUMEN	iii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
INDICE DE CUADROS.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE.....	3
1.1. Retos para la agricultura en el periodo 2030-2050	3
1.2. Agricultura vertical como sistema de producción sostenible.....	4
1.3. Fábricas de plantas con luz artificial como alternativa de producción agrícola.....	7
1.4. Componentes esenciales para producción vegetal en sistemas cerrados	11
1.4.1. Luz en sistemas artificiales	12
1.4.2. Agua como medio de transporte de nutrientes en sistemas hidropónicos	17
1.4.3. Sustrato en sistemas hidropónicos	18
1.4.4. Enriquecimiento de dióxido de carbono en sistemas artificiales de producción vegetal.....	21
1.5. Métodos de cultivo para PFAL	22
1.6. Economía circular como marco para la implementación de PFAL en zonas urbanas ...	26
1.7. La incorporación de PFAL en Costa Rica.....	28
1.7.1. Lucha contra el cambio climático	28

1.7.2.	Acceso a energía renovable	29
1.7.3.	Método de producción	30
1.7.4.	Acceso al crédito.....	31
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA		32
2.1.	Método de diseño estructural	32
2.2.	Método de diseño del sistema electrónico.....	34
2.3.	Método de diseño para sistema de potencia mecánica.....	35
2.4.	Método de diseño para plataforma de automatización.....	36
2.5.	Evaluación de rendimiento.....	36
2.5.1.	Prueba de rendimiento	36
2.6.	Evaluación financiera.....	38
2.7.	Evaluación de implementación del sistema para uso industrial.....	39
CAPÍTULO 3. RESULTADOS.....		40
3.1.	Diseño estructural del sistema hidropónico orbital	41
3.1.1.	Dimensionamiento inicial del sistema	41
3.1.2.	Sistema de sujeción.....	43
3.1.3.	Determinación de carga de diseño	44
3.1.4.	Ensamblaje del marco orbital.....	47
3.1.5.	Ensamble de marco externo	49
3.1.6.	Diseño de cama de agua.....	51

3.2.	Diseño de sistema electrónico	53
3.2.1.	Diseño de sistema de potencia eléctrica.....	54
3.2.2.	Diseño de sistema de control	56
3.2.3.	Diseño de placa madre	58
3.2.4.	Diseño de sistema de iluminación.....	59
3.2.5.	Diseño de sistema de potencia mecánica.	61
3.3.	Diseño de plataforma de monitoreo, almacenamiento de datos y lógica de operación de microcontroladores	62
3.3.1.	Programación del controlador principal ESP8266.....	62
3.3.2.	Programación de controlador secundaria AtTiny85	65
3.3.3.	Plataforma de monitoreo y recopilación de datos.....	66
3.4.	Construcción y modificaciones menores.....	67
3.4.1.	Construcción de marco externo y marco orbital	67
3.4.2.	Construcción de sistema electrónico.....	70
3.4.3.	Construcción de contenedores para sustrato	71
3.4.4.	Construcción del sistema de potencia mecánica.....	71
3.4.5.	Construcción del sistema de iluminación	73
3.4.6.	Construcción del sistema de ventilación.....	74
3.4.7.	Modificaciones menores y detalles secundarios	75
3.5.	Rendimiento de la producción	76

3.6.	Análisis financiero.....	78
3.6.1.	Costos de materiales, construcción y operación	78
3.6.2.	Rentabilidad y punto de quiebre del sistema	79
3.6.3.	Aspectos económicos.....	80
3.7.	Implementación del sistema hidropónico orbital de manera industrial.....	81
3.7.1.	Aspectos financieros a mejorar	82
3.7.2.	Consideraciones de logística e implementación.	83
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES		89
CAPÍTULO 5. RECOMENDACIONES		90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		92

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1-1. "Pig Tower" del proyecto "Pig City" por MVRDV.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1-2. (a) Green Sense Farms y su sistema de producción. (b) Spread Co., Ltd y su sistema de producción.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 1-3. Recursos esenciales y productos de un sistema de producción de planta.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 1-4. Conversión de energía y materia en un sistema de PFAL.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 1-5. Proceso fotosintético y movimiento de agua. Modificado de (17).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1-6. Uso de luz LED monocromática (izquierda) y uso de fluorescente (derecha).</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1-7. Relaciones entre la luz integral diaria (DLI), el largo de la hoja (LL), relación entre el largo de la hoja y el ancho de la hoja (LL/LW), el peso seco de la hoja (LDW) y el peso seco de la raíz (RDW) (19).</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1-8. Relación entre la luz integral diaria y el peso fresco de las hojas y el peso seco de las hojas (20) donde F1.8 se refiere a luz fluorescente, L1.2 se refiere a luz LED con relación rojo azul 1:2 y L2.2 con relación 2:2.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1-9. Absorción relativa de luz visible para pigmentos de plantas según la longitud de onda(a), Eficiencia relativa en fotosíntesis según la longitud de onda(b) (17).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 1-10. Relación entre peso fresco de la planta con respecto a la relación de rojo y azul (18).....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1-11. Número de hojas de lechuga en función de los días después de la plantación (DAP) para fotoperiodos de 12, 16, 20 y 24 horas con luz LED Roja y Azul en proporción 2:1 (24)....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 1-12. Sistema hidropónico de enrejado tipo A. Modificado de (11).</i>	<i>22</i>
<i>Figura 1-13. Sistema hidropónico columnar. Modificado de (11).</i>	<i>23</i>
<i>Figura 1-14. Sistema de camas hidropónicas apiladas. Modificado de (11).</i>	<i>24</i>

Figura 1-15. Sistema de cilindros hidropónicos apilados (11).....	25
Figura 1-16. Incorporación de otros sistemas biológicos para reutilización de materia en una PFAL. Modificado de (13).....	27
Figura 1-17. Proyección de emisiones de dióxido de carbono equivalente en función del año. Modificado de (37).....	28
Figura 1-18. Costos de operación de una PFAL en Japón con una producción diaria cercana a 7000 cabezas de lechuga (13).....	29
Figura 3-1. Prototipo de sistema hidropónico orbital computarizado y sus elementos.	40
Figura 3-2. Distribución espacial máxima de plantas propuesta, vista frontal (unidades en cm).	42
Figura 3-3. Modelo conceptual de sistema automatizado para manipulación de contenedores en el sistema hidropónico orbital donde los contenedores de plantas son colocados y deslizados en los rieles.	43
Figura 3-4. (a) Propuesta de perfil “C” para sujeción. (b) Modelo conceptual de sujeción.....	44
Figura 3-5. (a) Determinación de dimensiones de componente medio entre rayo y perfil “C” (unidades en cm) donde x representa una distancia dependiente del ancho del riel. (b) Modelo tridimensional del componente.	47
Figura 3-6. Soporte en L para sujeción de rieles.....	48
Figura 3-7. (a) Soporte entre rayos y eje. (b) Ensamble entre el soporte con los rayos y el eje.	48
Figura 3-8. (a) Ensamble de rayo unitario. (b) Ensamble de marco orbital.	49
Figura 3-9. Estructura utilizada para marco externo.	50
Figura 3-10. (a) Modelo de soporte menor. (b) Modelo de soporte mayor.	50
Figura 3-11. Marco externo con soportes, uniones no permanentes y roles.	51

<i>Figura 3-12. Modelo tridimensional de cama de agua.</i>	51
<i>Figura 3-13. Soporte en Z para cama de agua.</i>	52
<i>Figura 3-14. Soporte con ajuste de altura para cama de agua.</i>	52
<i>Figura 3-15. Soporte secundario para cama de agua.</i>	53
<i>Figura 3-16. Diagrama de comunicación entre dispositivos electrónicos y voltajes de operación.</i>	54
<i>Figura 3-17. Diagrama de distribución de potencia eléctrica, la línea punteada representa intercambio de información, la línea continua denota transmisión de potencia.</i>	55
<i>Figura 3-18. Multímetro digital utilizado para mediciones en tiempo real.</i>	56
<i>Figura 3-19. Microcontrolador ESP8266MOD 12E.</i>	56
<i>Figura 3-20. Modelo digital del panel de control y distribución de potencia.</i>	58
<i>Figura 3-21. Diseño final de placa madre.</i>	59
<i>Figura 3-22. LED tipo SuperFlux.</i>	59
<i>Figura 3-23. (a) Distribución radial de luz. (b) Distribución longitudinal de luz unidades en mm.</i>	60
<i>Figura 3-24. Dispositivos principales del sistema mecánico de potencia.</i>	62
<i>Figura 3-25. Diagrama simplificado de operación de ESP8266.</i>	63
<i>Figura 3-26. Ejemplo de actualización de pantalla según interacción del usuario. (a) estado inicial, (b) estado final.</i>	65
<i>Figura 3-27. Interfaz principal del programa S.Hi.O.C manager.</i>	66
<i>Figura 3-28. Diagrama de flujo de información digital.</i>	67
<i>Figura 3-29. Muestra de modificación de diseño en proceso de construcción.</i>	68
<i>Figura 3-30. Marco orbital sin acople para motor (a) y con acople para motor (b).</i>	69

<i>Figura 3-31. Resultado final de construcción de marco externo y orbital.</i>	69
<i>Figura 3-32. Placa madre de producción y ensamble de tarjeta madre.</i>	70
<i>Figura 3-33. Presentación final del panel de control.</i>	70
<i>Figura 3-34. Contenedores de lámina expandida con el sustrato incorporado.</i>	71
<i>Figura 3-35. Reductora 25:1 Nema 23.</i>	72
<i>Figura 3-36. Dibujo técnico de acople, unidades en mm.</i>	73
<i>Figura 3-37. Elementos del sistema de potencia instalados.</i>	73
<i>Figura 3-38. Modelo digital del sistema de iluminación y su implementación.</i>	74
<i>Figura 3-39. Ventiladores instalados en la parte trasera del equipo.</i>	75
<i>Figura 3-40. Modelo de prototipo concluido.</i>	76
<i>Figura 3-41. Flujo de caja para periodo de 24 meses.</i>	80
<i>Figura 3-42. Estantería modular. Fuente: Mecalux (52).</i>	83
<i>Figura 3-43. Propuesta de distribución en planta del sistema hidropónico orbital.</i>	84
<i>Figura 3-44. Detalle de propuesta de distribución en planta para el sistema hidropónico orbital.</i>	85
<i>Figura 3-45. Propuesta sección de postcosecha en donde la cadena de producción se da de manera lineal en un mismo lugar.</i>	85
<i>Figura 3-46. Propuesta de distribución de planta, primer piso.</i>	86
<i>Figura 3-47. Propuesta de distribución de planta para segundo piso.</i>	87

INDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 1-1. Componentes recomendados para una PFAL de producción de alimento*.....</i>	<i>7</i>
<i>Cuadro 1-2. Restricciones para el tipo de cultivo en una PFAL.....</i>	<i>8</i>
<i>Cuadro 1-3. Elementos esenciales para el desarrollo de plantas y sus funciones.....</i>	<i>18</i>
<i>Cuadro 1-4. Sustratos inorgánicos para hidroponía y sus características.....</i>	<i>19</i>
<i>Cuadro 1-5. Sustratos orgánicos para hidroponía y sus características.....</i>	<i>20</i>
<i>Cuadro 1-6. Características de los sustratos hidropónicos y su descripción.....</i>	<i>21</i>
<i>Cuadro 2-1. Criterios de diseño propuestos y utilizados para modelo industrial.....</i>	<i>32</i>
<i>Cuadro 2-2. Composición de solución hidropónica.....</i>	<i>37</i>
<i>Cuadro 3-1. Relación entre velocidad de rotación e intervalo de pulsos utilizados.....</i>	<i>62</i>
<i>Cuadro 3-2. Tabla de equivalencias para configuración de dispositivos.....</i>	<i>64</i>
<i>Cuadro 3-3. Descripción de byte para registro de desplazamiento de salida.....</i>	<i>64</i>
<i>Cuadro 3-4. Resumen de peso fresco según día dentro del sistema.....</i>	<i>77</i>
<i>Cuadro 3-5. Resumen de costos de fabricación.....</i>	<i>78</i>
<i>Cuadro 3-6. Resumen de costos operativos mensuales a máxima capacidad por máquina.....</i>	<i>79</i>

INTRODUCCIÓN

La demanda de alimento aumenta con el tiempo, pero los recursos y tecnología disponibles son limitados lo que causa una sobreexplotación de los recursos naturales, adicionalmente el cambio climático que afecta negativamente al planeta Tierra pone en riesgo la producción de alimento.

Tecnologías han emergido junto con nuevos conceptos como la agricultura vertical que buscan proponer soluciones que logren satisfacer la demanda de alimento utilizando los recursos naturales de la manera más eficiente posible. Las fábricas de plantas con luz artificial son la tecnología de punta que actualmente se utiliza en países desarrollados para producir parte de su alimento en escala industrial utilizando poco espacio (1) encontrados en sistemas agrícolas convencionales.

Es necesario evaluar la viabilidad de implementar esta tecnología en Costa Rica. El mayor obstáculo de la adaptación a gran escala de los sistemas de agricultura vertical es el aspecto financiero que está estrictamente relacionado al método de producción vegetal que la fábrica adopte.

Debido a que la implementación de estos sistemas presenta una resistencia a la adopción de nuevas tecnologías en la sociedad costarricense, es necesario desarrollar un prototipo que pueda mostrar la funcionalidad, de fácil manufactura y de bajo costo donde se obtengan rendimientos que logren sostener la inversión capital de los equipos.

OBJETIVOS

El objetivo de esta investigación es diseñar un sistema hidropónico orbital automatizado para aumentar los rendimientos obtenidos en fotoperiodos de hasta 24 horas y comparar su producción con los rendimientos presentes en sistemas hidropónicos convencionales con luz natural utilizando lechuga (*Lactuca sativa*). Para ello se proponen los siguientes objetivos específicos.

1. Diseñar y construir un sistema hidropónico orbital con capacidad para albergar hasta 100 plantas, operar de manera autónoma y ser intervenido de manera remota para poder experimentar con el equipo.
2. Determinar el rendimiento de producción del prototipo para la comparación con sistema hidropónicos de invernadero.
3. Determinar los costos operativos y de fabricación del sistema hidropónico orbital para evaluar su viabilidad financiera.
4. Evaluar la escalabilidad del uso del sistema hidropónico orbital de manera industrializada para determinar los puntos de mejora necesarios a implementar en el equipo.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

1.1. Retos para la agricultura en el periodo 2030-2050

Para el año 2050, el sector agropecuario debe aumentar su producción cerca de un 60% con respecto al periodo 2005-2007 para satisfacer la demanda mundial de alimento. Esto implica un reto para el sector agropecuario, debido a que la adquisición de tierras para la agricultura ha comenzado a mermar lentamente, aunque los rendimientos por hectárea continúan mejorando (2). Además, la población mundial aumentará de 7.5 millones de personas en el 2017 a 9.7 millones para el 2050, donde la mayor parte (8.4 millones para el 2050) será aportado por países menos desarrollados en África, Latinoamérica y el Caribe (3). De esta población se estima que cerca de un 68% habitará en zonas urbanas, implicando una menor cantidad de personas ubicadas en zonas rurales que puedan dedicarse a la agricultura (4).

Además del decrecimiento en la cantidad de personas dedicadas al sector agropecuario, se debe considerar la disponibilidad de tierras fértiles para el sector, ya que se considera que existen 4500 millones de hectáreas aptas para agricultura de las cuales 1600 millones de hectáreas ya han sido utilizadas (correspondiente a un 33%). Sin embargo, se debe notar que de estos 1600 millones existen 300 millones que se consideran marginales y que probablemente se tornaron productivas por el uso de irrigación artificial (2). Es importante recalcar que de las 4500 millones de hectáreas que se consideran aptas, es únicamente por el hecho de tener acceso a condiciones climatológicas apropiadas para agricultura (específicamente suficiente lluvia para riego). Al incorporar factores limitantes como zonas protegidas, toxicidad, profundidad de suelo, accesibilidad y riqueza nutricional del suelo, la cantidad de hectáreas aptas se reduce hasta un 70%. Se estima que entre el año 2007 y 2050, el crecimiento anual de tierra usada en agricultura

será de 0.10% y en los países asiáticos se detendrá por completo (2). Debido a esto se espera que el 90% de la producción de alimento provenga de mejores rendimientos y mayores densidades de siembra, mientras que el 10% restante provenga de expansión de suelos agrícolas (5).

Otro factor que se debe considerar es la pérdida de capas de suelo a causa de la erosión. Se estima que cerca de 20 a 30 Gton/año de suelo es perdido a causa de erosión por efecto de agua, y entre 10 a 20 ton/año se debe a prácticas agrícolas (6). La erosión de suelo se espera que se vea afectada en magnitud, extensión y frecuencia debido a los impactos del cambio climático, en especial los atribuidos a la lluvia (7).

El rendimiento de la producción por hectárea es un indicador clave que permite valorar si el sector agropecuario está creciendo, pero no permite identificar si el alimento producido está llegando a la población, por ello también se debe considerar las pérdidas de alimento a lo largo de la cadena productiva. Se estima que en Latinoamérica cerca de un 55% de la producción de frutas y vegetales se pierde en la cadena productiva de los cuales un 42% corresponde a pérdidas en campo, postcosecha y procesamiento (8), por lo tanto un sistema de producción que no dependa de las condiciones ambientales, que pueda expandirse de manera vertical y que pueda acceder de manera inmediata a un sistema de poscosecha y que se ubique en zonas urbanas podría ser utilizado como alternativa a la agricultura tradicional.

1.2. Agricultura vertical como sistema de producción sostenible

La necesidad de generar sistemas de producción está estrictamente relacionada con la sociedad y conservación del medio ambiente, políticas internacionales como los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en la Agenda 2030 atiende esta necesidad al crear temáticas de trabajo para que los países miembros los implementen. Costa

Rica aprobó los objetivos de desarrollo sostenible el 25 de setiembre del 2015 y los vuelve parte de su agenda política. Entre los temas a tratar se menciona el objetivo de desarrollo sostenible número 2: “Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible”. También se menciona el 12: “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles” y el 13: “Adoptar medidas urgentes para combatir al cambio climático y sus efectos” (9). Estos objetivos tienen directa relación con el sector agrícola tanto por ser el sector productor de alimento y por ser el ente generador del 24% de las emisiones de gases de efecto invernadero, superado únicamente por la generación de electricidad y calor (10).

Los objetivos de desarrollo mencionados anteriormente generan presión sobre el sector agropecuario debido a que la necesidad de producir más alimento conllevaría a una mayor explotación de los recursos naturales, el cual a su vez se debe adoptar métodos de producción más sostenibles que aliviane su aporte al cambio climático.

Las nuevas ciudades carbono neutro y ecológicas tienen una falencia de diseño el cual corresponde al hecho de que no tienen capacidad de alimentar a los residentes, quienes obtendrán su alimento proveniente del sector agrícola tradicional y por lo tanto pondrían presión al sector agropecuario tradicional forzándolo a expandirse y utilizar técnicas de cultivo más intensivas.

A partir de esta contrariedad es que la agricultura vertical surge como una solución a ambas problemáticas, ya que es un sistema de producción cerrado (sin suelo) donde cada uno de los factores relacionados con la producción son monitoreados y controlados (10), y que por la configuración de producción en alta densidad se puede incorporar zonas urbanas aprovechando al máximo el área disponible al mismo tiempo que incorpora tecnologías amigables con el medio ambiente.

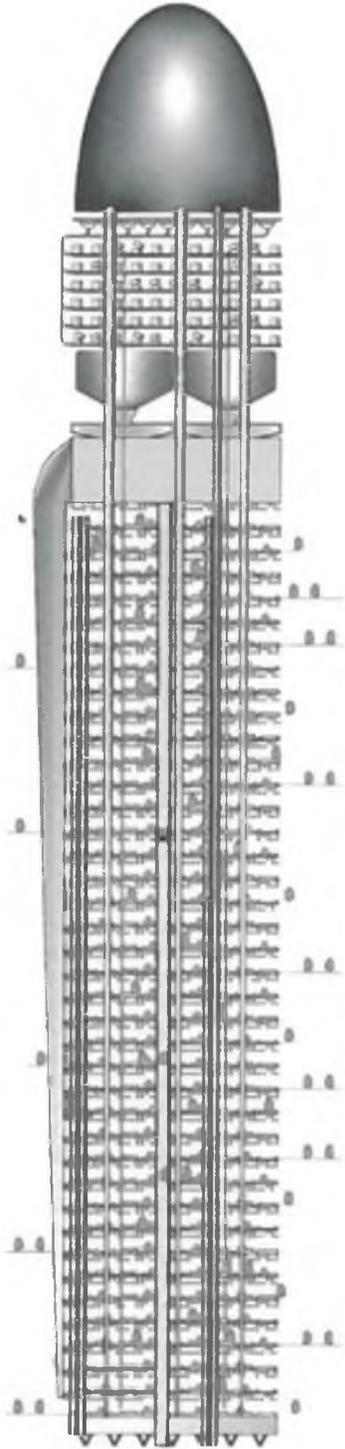


Figura 1-1. "Pig Tower" del proyecto "Pig City" por MVRDV.

Este concepto fue introducido en el año 2000 por parte de la empresa MVRDV la cual propuso el proyecto de "Pig City" en Holanda. La iniciativa surge debido a que la producción de carne porcina comenzó a dañar los mantos acuíferos que ya había alcanzado los límites de explotación que el medio ambiente podía sostener.

La idea consiste en utilizar torres verticales autosustentables donde en la cúspide se ubica la sección de producción vegetal, seguido en el nivel inferior por la producción de hongos, en niveles intermedios se encuentra la producción pecuaria, la cual por medio de sus desechos proveería los nutrientes para la producción vegetal y de hongos, en la base de la estructura se ubica el sistema de procesamiento y matadero que abastece a la población de alimento listo para consumo (**Figura 1-1**). Los residuos se aprovechan para producir bioenergía que permita a la torre de ser autosustentable (11).

En general se define la agricultura vertical como un edificio modular de múltiples niveles que utiliza tecnología de punta para controlar un sistema agrícola, pecuario o ambos. Dentro de los retos para implementar esta tecnología se puede mencionar la alta inversión inicial, los altos costos operativos y cantidad limitada de productos (12).

Debido a que todas las ciudades son diferentes y los países de dichas ciudades poseen diferentes niveles de desarrollo la implementación de agricultura vertical debe ser acorde a las capacidades de cada ciudad lo que causa la necesidad de desarrollar la tecnología in situ.

1.3. Fábricas de plantas con luz artificial como alternativa de producción agrícola

Las fábricas de plantas con luz artificial, conocidas como PFAL por sus siglas en inglés (*Plant Factory with Artificial Light*), es un concepto formalizado por Toyoki Kozai en 2015 que lo define como un sistema de producción aislado del medio ambiente que utiliza luz artificial como fuente de energía para los cultivos (13). El **Cuadro 1-1** muestra los componentes esenciales de una PFAL, los cuales son necesarios incorporar en los diseños de estos sistemas.

Cuadro 1-1. Componentes recomendados para una PFAL de producción de alimento*.

Número	Componente
1	Cuarto de cultivo sellado, menos de 1,5 cambios de aire por cada 24h.
2	Cuarto de cultivo térmicamente aislado con paredes con coeficiente de transmisión térmico menor de 0,15 W/m ² /C
3	Sistema hidropónico debe contar con sistema de luz y ser multicapa
4	Entrada de seguridad y limpieza en el cuarto de cultivo
5	Aire acondicionado para control de temperatura en cuarto de cultivo
6	Sistema de enriquecimiento de CO ₂ para el cuarto de cultivo
7	Piso cubierto con resina epóxica
8	Sistema de recirculación y recolección de agua en evaporadores
9	Esquinas de paredes redondeadas
10	Protectores en luminarias

* Modificado de: *Plant Factory. An indoor vertical farming system for efficient quality food production (13).*

El uso de luz artificial es importante en zonas urbanas debido a que los edificios al ser construidos de manera vertical tienden a generar sombra sobre los vecinos lo que implica que en

el futuro se compromete la producción si se depende de luz natural, también la producción seguiría atada a las condiciones climatológicas del sector.

Existen limitaciones relacionadas a las PFAL en lo que respecta al tipo de cultivo a utilizar como se muestra en el **Cuadro 1-2**. Esta tecnología también hereda los problemas intrínsecos de la agricultura vertical, no obstante, actualmente existen empresas con modelos de producción basado en este concepto como Green Sense Farms en Estados Unidos (**Figura 1-2-a**) y Spread Co., Ltd en Kyoto (**Figura 1-2-b**) (11) y también se ha demostrado que este tipo de modelo es económicamente sostenible (14).

Cuadro 1-2. Restricciones para el tipo de cultivo en una PFAL.

Número	Restricción
1	Plantas de menos de 30 cm de alto
2	Cosechables entre 10 y 30 días
3	Buen desarrollo bajo luz artificial
4	Producto de alto valor, que se pueda vender limpio, nutricional y libre de fitosanitarios
5	La calidad del producto se puede modificar alterando las condiciones ambientales
6	85% del peso del producto es aprovechable para venta
7	Plantas medicinales de bajo porte

* Modificado de: *Plant Factory. An indoor vertical farming system for efficient quality food production (13).*



(a)



(b)

Figura 1-2. (a) Green Sense Farms y su sistema de producción. (b) Spread Co., Ltd y su sistema de producción.

La **Figura 1-3** muestra la relación que existe entre los recursos esenciales como la luz, agua, dióxido de carbono, fertilizantes inorgánicos, semillas y calor dentro de un sistema de producción de plantas. El diseño de una PFAL debe asegurar que se permita acceso a cada uno de estos elementos de manera ininterrumpida ya que de esto se mantiene el ciclo de producción.



Figura 1-3. Recursos esenciales y productos de un sistema de producción de planta.
Modificado de (13).

Es necesario comprender el sistema energético que gobierna una PFAL ya que, al no utilizar la energía solar para satisfacer las necesidades fotosintéticas de las plantas, la energía se debe suplir de manera artificial, lo que implica un gasto extra. Adicionalmente, un sistema de control se requiere en la instalación, previo al estudio del correcto entendimiento del sistema para evitar sobredimensionamientos que eleven los costos energéticos.

La **Figura 1-4** muestra un esquema de las conversiones energéticas y de masa entre los elementos de una PFAL, donde se destaca claramente la necesidad de suplir luz a las plantas por medio de energía eléctrica o solar, así como se aprecia el intercambio de calor que se requiere realizar con el medio y la interacción de diferentes biosistemas.

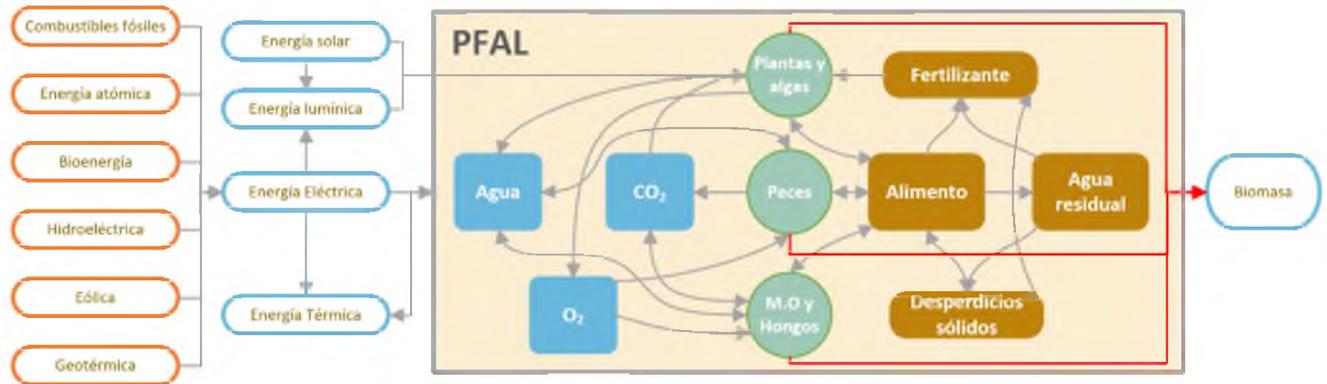


Figura 1-4. Conversión de energía y materia en un sistema de PFAL.
Modificado de (13).

La energía es uno de los principales insumos de una PFAL y para poder ser una solución sostenible y carbono neutral debe ser monitoreada constantemente y considerar las condiciones las cuales efectivamente alcancen un equilibrio a favor del medio ambiente.

Se ha demostrado que proyectos de PFAL son factibles técnicamente y económicamente ya que se han obtenido volúmenes de producción entre 20 a 30 veces de los existentes en sistemas abiertos (15) pero, si las emisiones de gases invernaderos empeoran a causa de un sistema mal operado o diseñado el proyecto se consideraría inútil para solventar las problemáticas de la humanidad (16) por lo tanto la implementación de una PFAL dentro de una ciudad debe ser cuidadosamente estudiada desde un punto de vista financiero y técnico donde se incorporen métodos de producción ajustados a la capacidad tecnológica de cada país.

1.4. Componentes esenciales para producción vegetal en sistemas cerrados

Las plantas requieren tres componentes básicos: luz, agua y sustrato. En sistemas convencionales el sustrato por lo general provee los nutrientes mayores (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) y menores (Magnesio, Calcio, Hierro) utilizados para crear las estructuras moleculares, sin

embargo, en sistemas hidropónicos el sustrato es inerte y no aporta nutrientes ya que estos son diluidos en el agua. La producción de carbohidratos se realiza por medio de la fotosíntesis la cual utiliza la luz como fuente de energía para transformar dióxido de carbono y agua en carbohidratos y oxígeno como lo muestra la ecuación [1.1]. Los requerimientos de las plantas y la interacción entre elementos se pueden observar en la **Figura 1-5**.

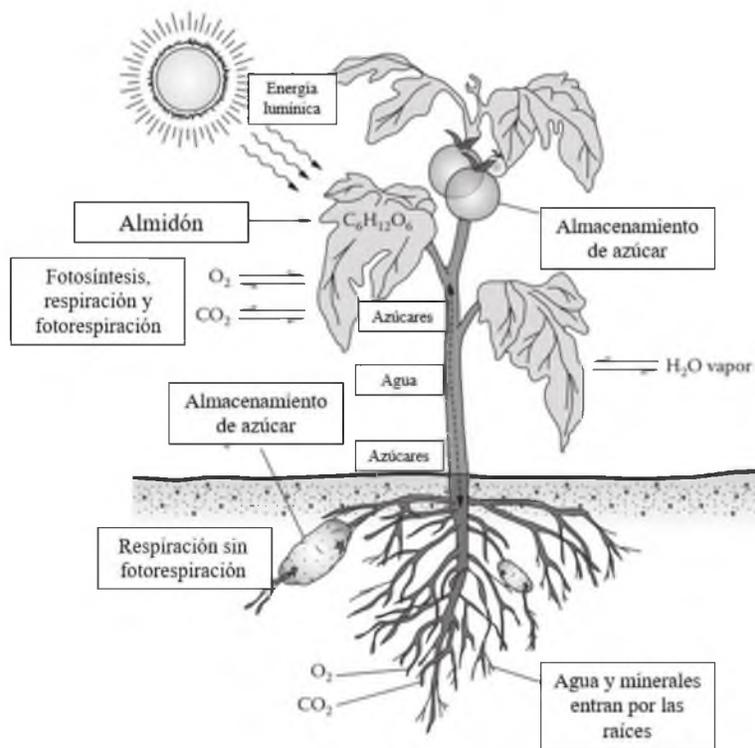
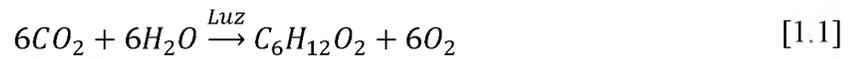


Figura 1-5. Proceso fotosintético y movimiento de agua. Modificado de (17).

1.4.1. Luz en sistemas artificiales

Al tener un sistema completamente cerrado se vuelve inevitable suplir de manera correcta y eficiente las plantas en producción por medio de luz artificial. En general se reconocen dos tipos de tecnología aplicable para este sector, que corresponden a fluorescentes y luz LED (*light-emitting diod*), por sus siglas en inglés que se refiere a diodo emisor de luz, monocromática

(Figura 1-6). Dado que en las PFAL se utiliza luz artificial los costos de iluminación siguen siendo altos, esto ha causado un aumento en el interés de implementar luces LED sobre otro tipo de tecnología de iluminación debido a que tienen una mayor eficiencia energética (18).



Figura 1-6. Uso de luz LED monocromática (izquierda) y uso de fluorescente (derecha).

En el uso de luz LED en horticultura existe un parámetro fundamental para determinar la calidad de la luz conocido como PPF D (*Photosynthetic photon flux density*) por sus siglas en inglés que se refiere a densidad de flujo de fotones fotosintéticos. La calidad del producto se relaciona directamente con el PPF D como se puede apreciar en la **Figura 1-7** en la cual conforme aumenta la luz integral diaria (DLI) (dado por la ecuación [1.2]) disminuye la relación entre el ancho de hoja y el largo (LL/LW) con una disminución del largo de la hoja (LL) esto implica que al obtener mejor calidad de luz las hojas tienden a hacerse más anchas y menos largas lo cual puede ser utilizado como un indicador de deficiencia en la luz utilizada. EL DLI es la relación entre el PPF D y la cantidad de horas diarias expuestas las plantas, en este caso se utilizó un PPF D entre 200 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y un fotoperiodo de entre 14 y 16 $\text{h}\cdot\text{día}^{-1}$. La **Figura 1-8** muestra un

comportamiento semejante obtenido de otro estudio, pero en este caso es referente únicamente al peso de la hoja fresca y el peso de la hoja seca; sin embargo, el comportamiento es semejante.

$$DLI = \frac{\left(PPFD \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \cdot \text{Fotoperiodo} \frac{\text{h}}{\text{día}}\right)}{1000000} \quad [1.2]$$

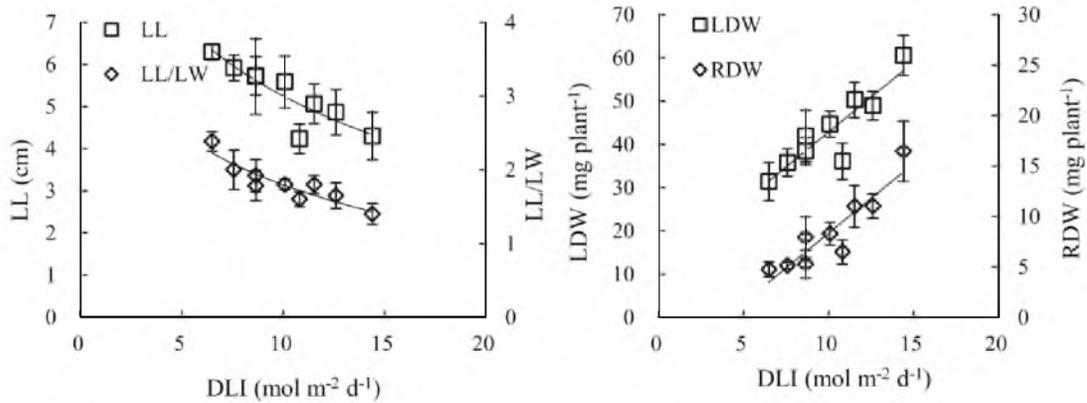


Figura 1-7. Relaciones entre la luz integral diaria (DLI), el largo de la hoja (LL), relación entre el largo de la hoja y el ancho de la hoja (LL/LW), el peso seco de la hoja (LDW) y el peso seco de la raíz (RDW) (19).

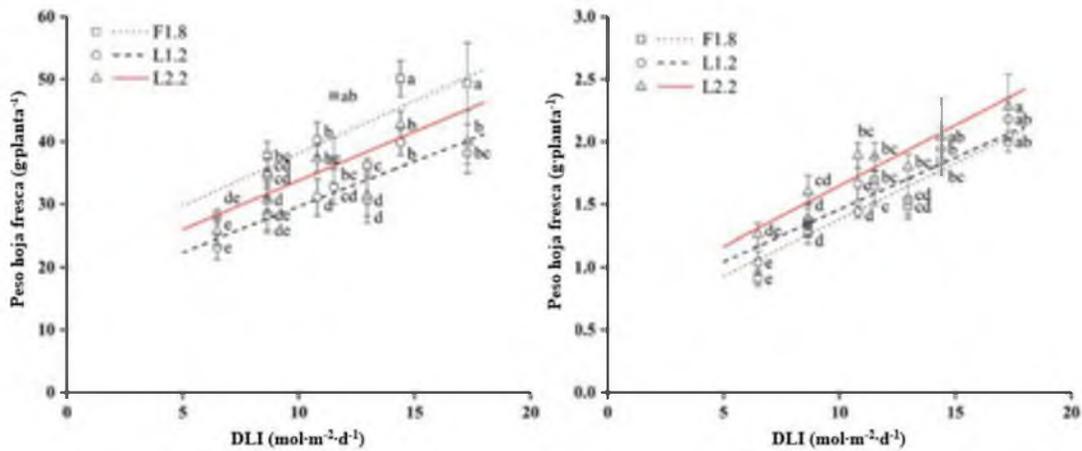


Figura 1-8. Relación entre la luz integral diaria y el peso fresco de las hojas y el peso seco de las hojas (20) donde F1.8 se refiere a luz fluorescente, L1.2 se refiere a luz LED con relación rojo azul 1:2 y L2.2 con relación 2:2.

Las plantas tienen un rango de radiación fotosintéticamente activo, conocido como PAR (*photosintetic active radiation*) por sus siglas en inglés referente a radiación fotosintéticamente activa, dentro de este rango se determinó que las longitudes de onda cercanas a 430nm (azul) y 670nm (rojo) son las más activas en el proceso de fotosíntesis; sin embargo, cada una tiene una tasa de absorción diferente como se observa en la **Figura 1-9** (17). Por ejemplo, si se observa la **Figura 1-9.a** se destaca que la absorción relativa para la longitud de onda de 640nm es aproximadamente dos veces menor que la longitud de 450nm lo que implica que si se desea utilizar luz artificial se debe seleccionar equipo que produzca la longitud cercana a 450nm y cercana a 640nm en una relación 1:2 para compensar las diferentes tasas de absorción.

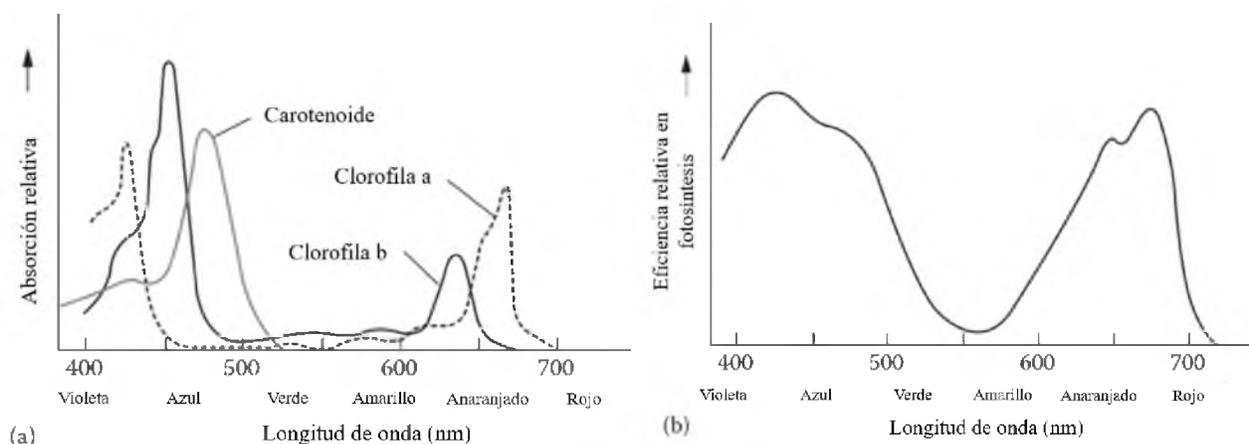


Figura 1-9. Absorción relativa de luz visible para pigmentos de plantas según la longitud de onda(a), Eficiencia relativa en fotosíntesis según la longitud de onda(b) (17).

Se ha demostrado que la utilización de relación 1:2 y 1:3 aumentan el peso fresco de las plantas, como se muestra en la **Figura 1-10**. Este comportamiento para el contenido de clorofila se relaciona de igual manera con una mayor eficiencia del uso del agua y energía (18). Se han realizado investigaciones con relaciones 1:4 y 1:9 demostrando la efectividad de implementar luz artificial por medio de LEDs monocromáticos en el desarrollo de las plantas (21).

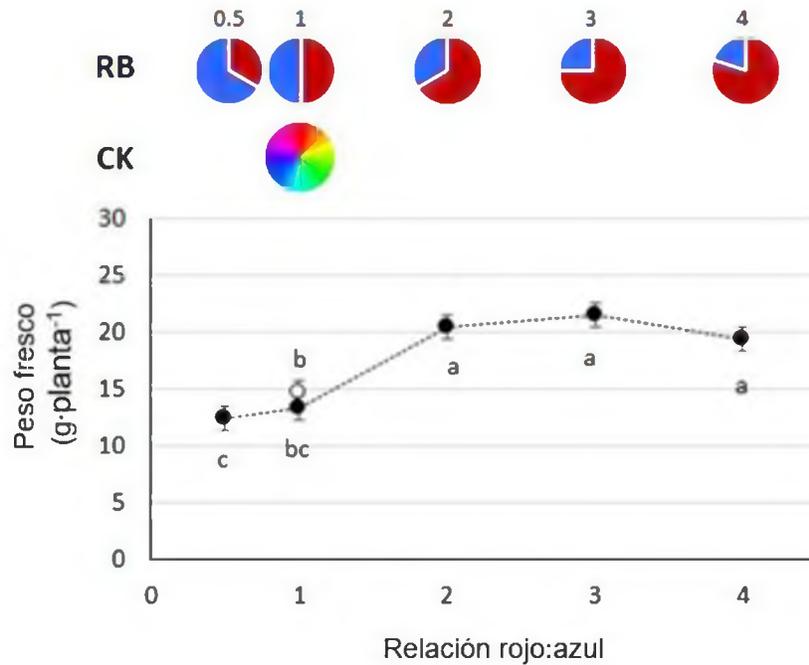


Figura 1-10. Relación entre peso fresco de la planta con respecto a la relación de rojo y azul

(18).

La luz fluorescente (a pesar de ser utilizada ampliamente como suplemento artificial de luz) ha comenzado a ser reemplazada por luz LED debido a que los fluorescentes producen todo el espectro del PAR y gran parte del espectro ultravioleta, esto causa que se desperdicie energía eléctrica en generación de longitudes no útiles y en calor, cerca de un 80% de la energía aplicada a un fluorescente se desperdicia y no es aplicado a la generación del espectro visible (22).

Para maximizar el uso de la luz se han realizado estudios con fotoperiodos de 24 horas utilizando las longitudes de onda mostradas anteriormente donde se ha demostrado un desarrollo dos veces más rápido que con el fotoperiodo tradicional de 12 horas (23) como se muestra en la **Figura 1-11**, donde el fotoperiodo de 24 horas alcanzó el mismo desarrollo en el día 20 que el de 12 horas el día 35, también se ha demostrado que las luces LED son más efectivas desde un punto

de vista energético para satisfacer la necesidad de luz de las plantas ya que consumen menor energía, son más baratas y de mayor vida útil (23).

Para poder utilizar los fotoperiodos de 24 horas de manera segura es necesario un control preciso de la temperatura con el fin de eliminar el estrés ocasionado por la exposición a la luz, se recomienda utilizar una temperatura de 23 °C durante 16 horas y las 8 horas restantes disminuir la temperatura a 16 °C (24).

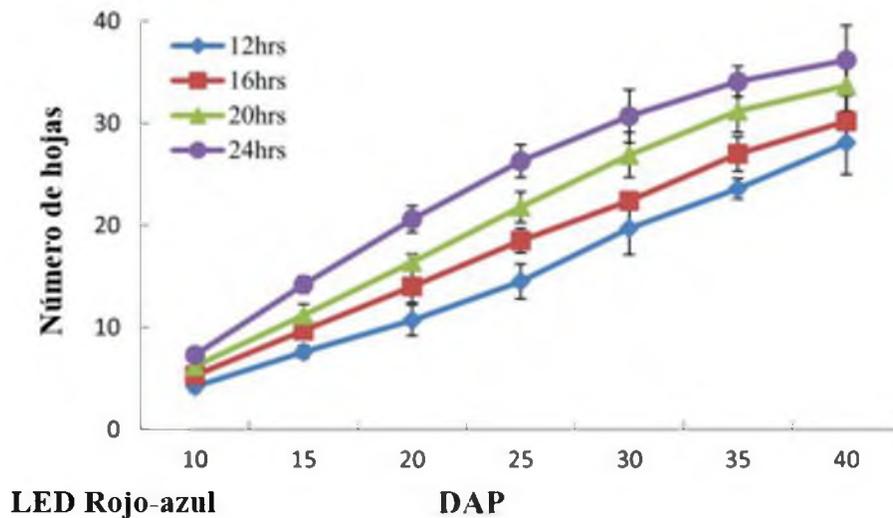


Figura 1-11. Número de hojas de lechuga en función de los días después de la plantación (DAP) para fotoperiodos de 12, 16, 20 y 24 horas con luz LED Roja y Azul en proporción 2:1 (24).

1.4.2. Agua como medio de transporte de nutrientes en sistemas hidropónicos

En sistemas hidropónicos uno de los factores más importantes que determina el rendimiento y la calidad de la producción es la solución de nutrientes, que consiste en una mezcla de agua con los elementos esenciales para las plantas en forma de iones inorgánicos (25).

Existen 16 elementos que se consideran esenciales para las plantas y se presentan en el **Cuadro 1-3**. En este caso se debe recalcar que el carbono y el oxígeno son aportados por el aire.

Cuadro 1-3. Elementos esenciales para el desarrollo de plantas y sus funciones.

Elemento	Función
C, H, O, N, S	Constituyentes mayores de material orgánico, elementos esenciales en los grupos atómicos involucrados en procesos enzimáticos.
P, B	Esterificación con grupos de alcoholes nativos de las plantas y involucrados en reacciones de transferencia de energía.
K, Mg, Ca, Mn, Cl	Relacionados con funciones de establecimiento de potenciales osmóticos, activación de encimas, balance de aniones, control de permeabilidad de la membrana celular.
Fe, Cu, Zn, Mo	Presencia dominante en forma quelada en un grupo prostético, transporte de electrones por carga de valencia

** Modificado de: Hydroponics: a practical guide for the soilless grower (26).*

En sistemas hidropónicos la absorción de estos elementos es proporcional a la concentración de los mismos en el medio aledaño a las raíces influenciado por factores como salinidad, oxigenación, temperatura, pH, conductividad, intensidad lumínica, fotoperiodo y humedad relativa (27). Para la producción de lechuga es recomendable valores de pH cercanos a 6,0 con una temperatura de 27 C, una concentración de oxígeno de 12 ppm y una conductividad eléctrica entre 0,9 a 2,5 dS/m (28). Estas características pueden variar dependiendo de la concentración de los elementos utilizados por lo tanto si se desea un óptimo desarrollo vegetal es necesario monitorear y controlar la solución hidropónica.

1.4.3. Sustrato en sistemas hidropónicos

Debido a que en hidroponía los elementos esenciales son aportados por la solución nutricional no es necesario que el sustrato los aporte. Existen sustratos hidropónicos orgánicos o inorgánicos,

los primeros presentan un comportamiento de desarrollo radicular semejante al suelo y los efectos de flujo másico y difusión afectan directamente el desarrollo de la planta, en sustratos inorgánicos el comportamiento es semejante sin embargo se da intercambio de cationes (26). El **Cuadro 1-4** muestra diferentes tipos de sustratos hidropónicos inorgánicos y sus características, en el **Cuadro 1-5** se presentan para sustratos orgánicos.

Cuadro 1-4. Sustratos inorgánicos para hidroponía y sus características.

Sustrato	Características
Lana de roca	Limpio, no tóxico (puede causar irritación en la piel), estéril, liviano cuando está seco, capacidad de retención de agua de 80% y de 17% de aire, no hay intercambio de cationes ni capacidad buffer. Ideal para semilla y uso prolongado.
Vermiculita	Poroso, esponjoso, estéril, ligero, alta absorción de agua, se anega fácilmente, alto intercambio de cationes
Perlita	Silíceo, estéril, esponjoso, ligero, drenaje libre, sin intercambio de cationes o capacidad buffer, buen medio de germinación en mezcla con vermiculita, puede causar irritación respiratoria.
Gravilla y astillas de metal	Partículas entre 5 a 15 mm de diámetro, drenaje libre, baja retención de agua, alta densidad, requiere esterilización previa a su uso.
Arena	Granos de roca entre 0,6 a 2,5 mm de diámetro, posible contaminación con arcilla y sílice, baja retención de agua, alta densidad, utilizada para mejorar el drenaje de otro sustrato.
Arcilla expandida	Estéril, inerte, guijarro entre 1 a 18 mm tamaño, drenaje libre, permite acumulación de agua y nutrientes, reutilizable si se esteriliza
Piedra pómez	Material silíceo de origen volcánico, inerte, mayor retención de agua que la arena, alta porosidad.
Escoria	Roca volcánica porosa, granulometría fina es utilizada para mezclas de germinación, ligera, retiene más agua que la arena.
Losas de cultivo de poliuretano	Material nuevo, cerca del 75% a 80% de aire con capacidad de retener 15% de agua.

* Modificado de: *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower* (26).

Cuadro 1-5. Sustratos orgánicos para hidroponía y sus características.

Sustrato	Características
Fibra de coco	Útil en sistemas capilares, alta capacidad para retener agua y nutrientes, puede ser mezclado con perlita. Posible contaminación con sodio.
Turba	Utilizado para germinación, puede anegarse y normalmente es mezclado con otros materiales.
Corteza compostada	Utilizado como sustituto de la turba, debe ser compostado para reducir materiales tóxicos, alto en manganeso y puede afectar el estado de nitrógeno de las plantas. Previene las enfermedades en raíces.
Aserrín	Útil para usos en corto plazo, una capacidad razonable para retener agua y aire, se descompone rápidamente, la fuente del aserrín afecta la utilidad del mismo.
Cascarilla de arroz	Menos utilizado, propiedades semejantes a la perlita, drenaje libre, baja a moderada retención de agua, puede tener residuos químicos.
Musgo	Ingrediente común en mezclas de sustratos, varía sus características según su origen, medio excelente para germinación, alta retención de agua y puede ser fácilmente anegado, posee un leve control sobre enfermedades en las raíces.
Vermicompost y compost	Varían en composición química considerablemente, puede anegarse, se recomienda mezclarlo con otros componentes orgánicos más gruesos como arena o escoria.

** Modificado de: Hydroponics: a practical guide for the soilless grower (26).*

En general se reconocen 6 características que deben ser consideradas a la hora de seleccionar un sustrato hidropónico ya sea para que se ajuste a las necesidades de las plantas a utilizar o a la disponibilidad de los sustratos en el mercado local para realizar una selección, estas características se presentan en el **Cuadro 1-6**.

Cuadro 1-6. Características de los sustratos hidropónicos y su descripción.

Característica	Descripción
Estructura	La estructura debe durar por más de un ciclo de producción y que no se destruya en partículas pequeñas que limiten la oxigenación de las raíces.
Composición	Las partículas del sustrato no deben reaccionar con la solución nutritiva.
Esterilidad	Los sustratos deben estar libres de pestes y organismos que generen enfermedades.
Retención de agua	El sustrato hidropónico no debe tener propiedades de retención muy alta o muy baja de agua, sin embargo, esta característica está en función del sistema hidropónico a utilizar.
Soporte radicular	El sustrato debe permitir que las raíces penetren fácilmente entre partículas y anclar la planta mientras las raíces entran en espacios vacíos en busca de agua.
Disponibilidad y costo	Se deben considerar si el mercado local tiene oferta de sustrato y el costo que implica el uso del mismo.

** Modificado de: Hydroponics for the home grower (17).*

1.4.4. Enriquecimiento de dióxido de carbono en sistemas artificiales de producción vegetal

Debido al consumo de CO₂ en el proceso de fotosíntesis, la concentración del mismo en el aire que rodea la planta afecta su desarrollo, se ha demostrado que un enriquecimiento de CO₂ de entre 600 y 720 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ aumenta en un 37% el crecimiento de las plantas con respecto a un rango de 300 a 320 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ considerado como la concentración de CO₂ atmosférico. A pesar de que el aumento en desarrollo no corresponde al doble se abre la posibilidad de enriquecer el cuarto de cultivo con este gas a fin de elevar los rendimientos (29).

1.5. Métodos de cultivo para PFAL

Los métodos de cultivo giran en torno a la hidroponía con o sin sustrato y existen variantes sobre este concepto general. En las PFAL se utilizan métodos que permitan ser multicapa, por ejemplo, el enrejado tipo A (**Figura 1-12**). Este sistema es fácil de instalar y de bajo costo y aprovecha 2,8 más veces el espacio (11), presenta la desventaja que es un sistema pensado principalmente para invernaderos que aprovechan la luz natural, por lo que implementar sistemas de luz artificial a este tipo de configuraciones resulta inconveniente debido a que se produce sombra entre plantas disminuyendo la efectividad general y la implementación de sistemas de producción automáticos resulta compleja.

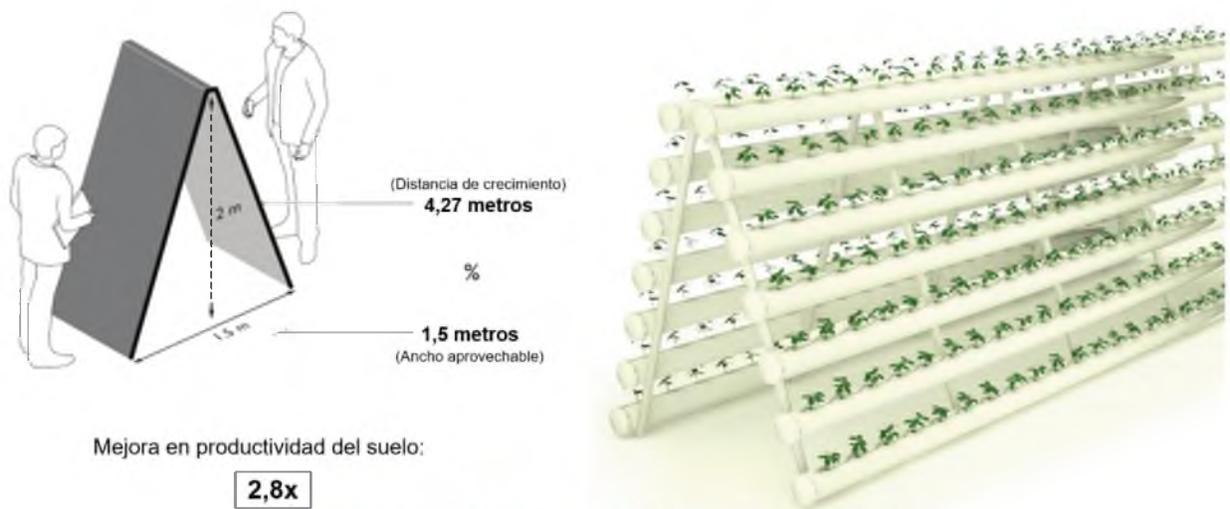


Figura 1-12. Sistema hidropónico de enrejado tipo A. Modificado de (11).

La siguiente evolución del sistema de enrejado son los sistemas columnares que consisten en bandejas de plantas acomodadas de tal manera que se maximice la penetración de luz a lo largo de todo el cultivo (**Figura 1-13**) (11). A pesar de tener mejor distribución de luz y un índice de aprovechamiento de suelo mejor (2,88 más) tiene la desventaja de que limita el tipo de cultivo que se puede utilizar, dificulta el manejo de la producción y la implementación de un sistema automático de manejo resulta más compleja que los equipos de enrejado tipo A.

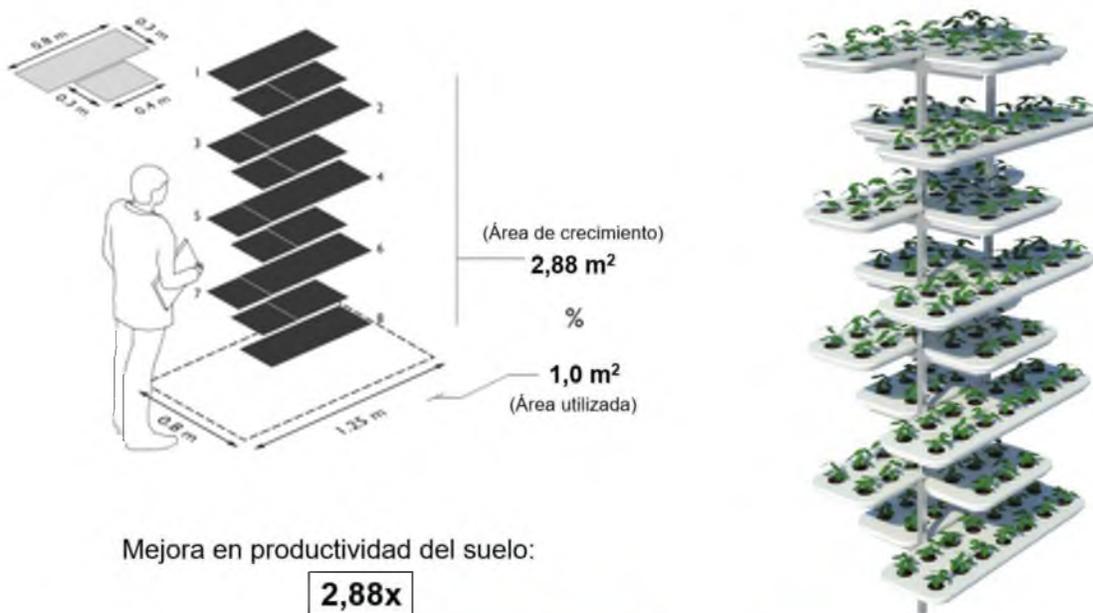
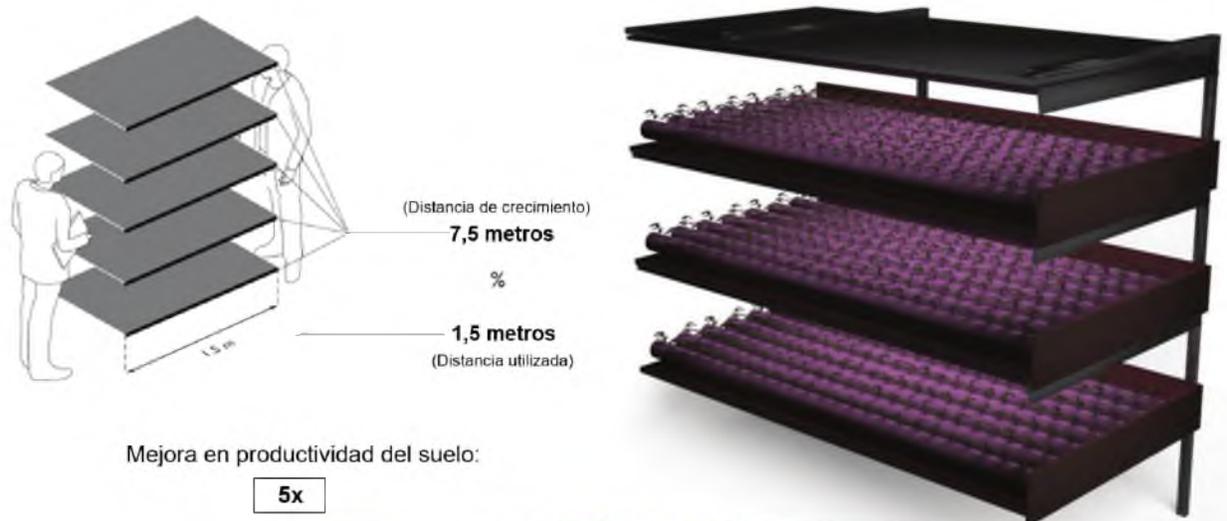


Figura 1-13. Sistema hidropónico columnar. Modificado de (11).

Las camas apiladas (**Figura 1-14**), es el sistema más utilizado en PFAL comerciales existentes ya que son fácilmente instalables y existe gran variedad de oferta en el mercado sobre este tipo de tecnología, son de fácil manejo y mantenimiento (11). Permite utilizar gran variedad de cultivos y tratamientos lumínicos para las plantas y es fácilmente automatizable.



Mejora en productividad del suelo:

5x



Figura 1-14. Sistema de camas hidropónicas apiladas. Modificado de (11).

Por último, se puede mencionar los cilindros apilables, (**Figura 1-15**). El primer concepto de esta tecnología surge en 1970 en el Laboratorio de Investigación Ambiental de la Universidad de Arizona. De todos los equipos mencionados es el que presenta el índice de aprovechamiento de

suelo mayor, equivalente a 7 veces lo producido por métodos convencionales (11). La empresa “Omega Garden” posee una versión comercial de esta tecnología llamado “Volksgarden”.

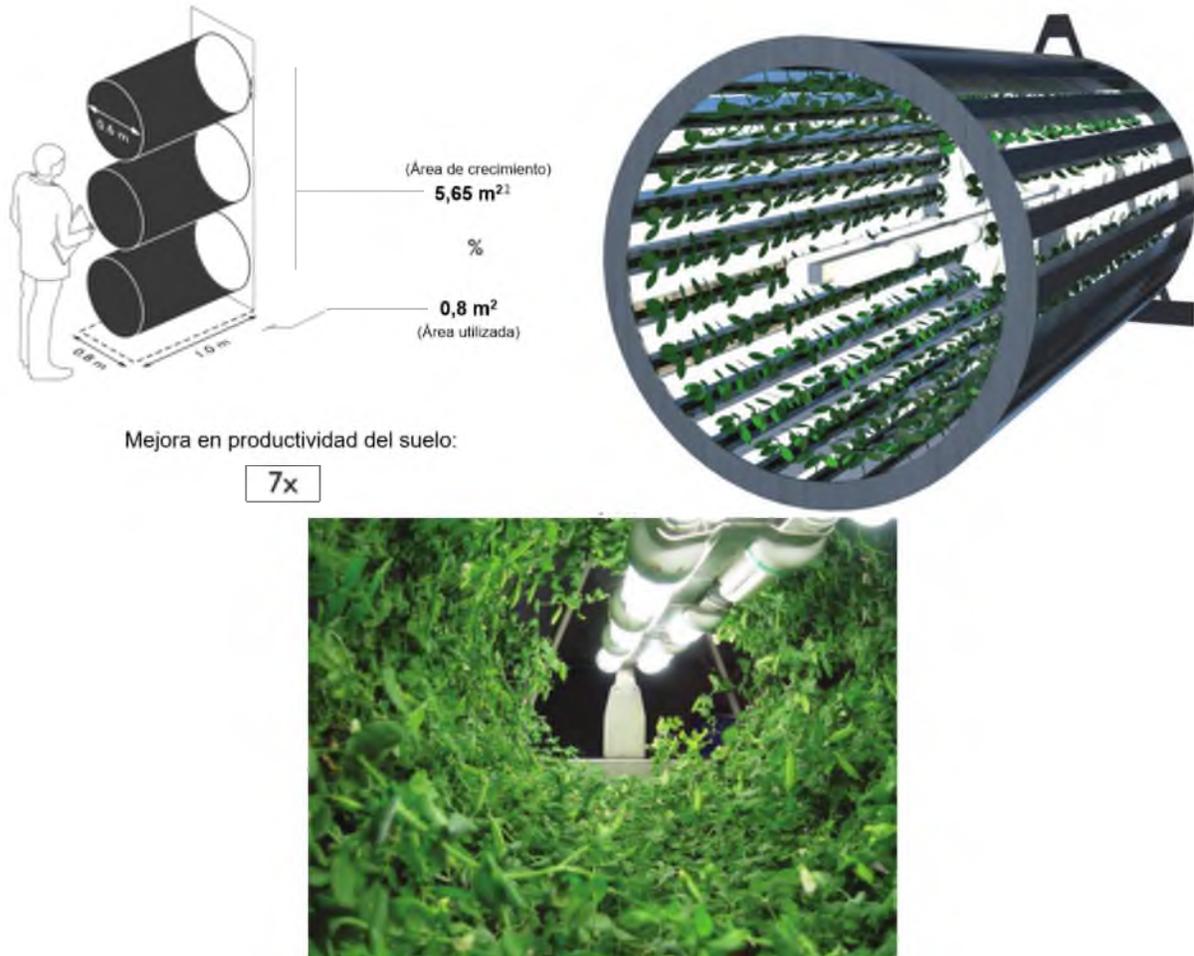


Figura 1-15. Sistema de cilindros hidropónicos apilados (11).

Los cilindros apilados de todas las soluciones presentadas es la que desde un punto de vista de ingeniería es más compleja de atender, debido a que es un sistema móvil, con una carga variable a lo largo del tiempo y que debe interactuar con un ser vivo junto con sus necesidades de luz y agua. Las ofertas actuales de estos sistemas son excesivamente costosos, tienen desventajas para ser sistemas de producción intensivos y presentan un nivel de complejidad elevado que dificulta considerablemente la implementación de sistemas de automatización.

Es por este motivo que se debe presentar un diseño que permita ser utilizado de manera efectiva y de bajo costo en sistemas de PFAL automatizados.

1.6. Economía circular como marco para la implementación de PFAL en zonas urbanas

La economía circular es un concepto que ha tomado relevancia a partir del año 2014 y es un concepto que se ha expandido a diferentes sectores nublando su verdadero significado (30). En este caso se define la economía circular como un cambio sistemático a nivel micro (dentro de la empresa), meso (entre empresas) y macro (entre ciudades o países) donde se elimina el concepto de “fin de la vida” por medio de reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materia estructurada en sistemas de bucle cerrado, en vez de sistemas de producción tradicionales de economía lineal que fomenta la sobreexplotación, impulsados por nuevas tecnologías, nuevos modelos de negocios y consumidores responsables en donde se alcance un desarrollo sostenible creando prosperidad económica, igualdad social, mejora del medio ambiente y en donde futuras generaciones puedan disfrutar de los beneficios (30–32).

Es relevante considerar la eficiencia energética de una fábrica de plantas con luz artificial ya que si es menor a la de un agroecosistema no sería sustentable; sin embargo, se ha demostrado que una fábrica de plantas con luz artificial posee una eficiencia energética de 1411 MJ/kg de masa seca mientras que el invernadero más eficiente con luz artificial tiene un rendimiento de 1699 MJ/kg de masa seca (33) lo que conlleva a que las fábricas de plantas requieren de menos energía para crear una unidad de masa, y al estar dentro de la ciudad el transporte se ve reducido disminuyendo la inversión energética para transportar el alimento y reduce la probabilidad de que el alimento se deteriore mejorando la calidad que recibe el consumidor final.

Desde un punto de vista meso (entre empresas), ya que las fábricas de plantas operan con energía eléctrica, se pueden acoplar a sistemas de producción de bioenergía por medio de los desechos producidos a lo largo del ciclo de la fábrica o de otros proveedores como restaurantes de la ciudad. También es necesario considerar que al ser sistemas de producción intensivos y en un espacio reducido, en donde ocurre principalmente un proceso fotosintético, la captación de dióxido de carbono y liberación de oxígeno se da a una mayor tasa (34), conllevado a la idea de que las PFAL pueden ser usadas como “nanopulmones” en las ciudades, mejorando la calidad de vida de los habitantes al mismo tiempo que generan empleo especializado.

Otra forma en que las fábricas de plantas se pueden incorporar a un modelo de economía circular, se ha teorizado sobre la posibilidad de aumentar la biocomplejidad del sistema productivo al incorporar nuevos elementos en la cadena productiva como los hongos y los peces (13) como se muestra en la **Figura 1-16**, donde se puede observar que cada sistema aporta un componente diferente y se da una recirculación y reutilización de la materia con el beneficio económico de poder ofertar otros productos al mercado.

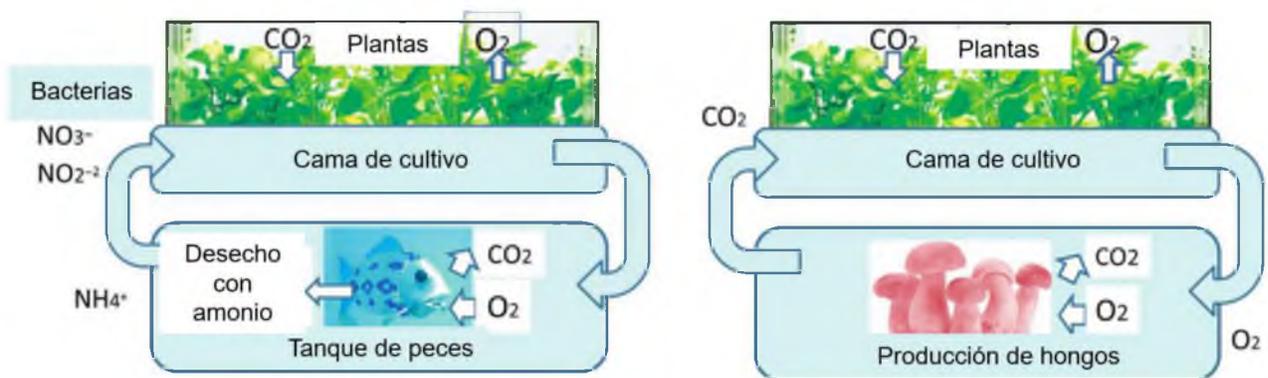


Figura 1-16. Incorporación de otros sistemas biológicos para reutilización de materia en una PFAL. Modificado de (13).

1.7. La incorporación de PFAL en Costa Rica

La implementación de PFAL en Costa Rica requiere de un balance entre políticas ambientales y condiciones económicas que justifique la inversión inicial.

1.7.1. Lucha contra el cambio climático

Desde el 2007, Costa Rica inició el camino para lograr ser carbono neutro para el año 2021 (35), meta que se ha aplazado para el año 2030. Costa Rica se ha propuesto reducir a un máximo absoluto de 9.374.000 toneladas de CO_{2eq} neto para el año 2030 (36), la **Figura 1-17** muestra la trayectoria propuesta para las emisiones de gases de efecto invernadero que el país desea obtener.

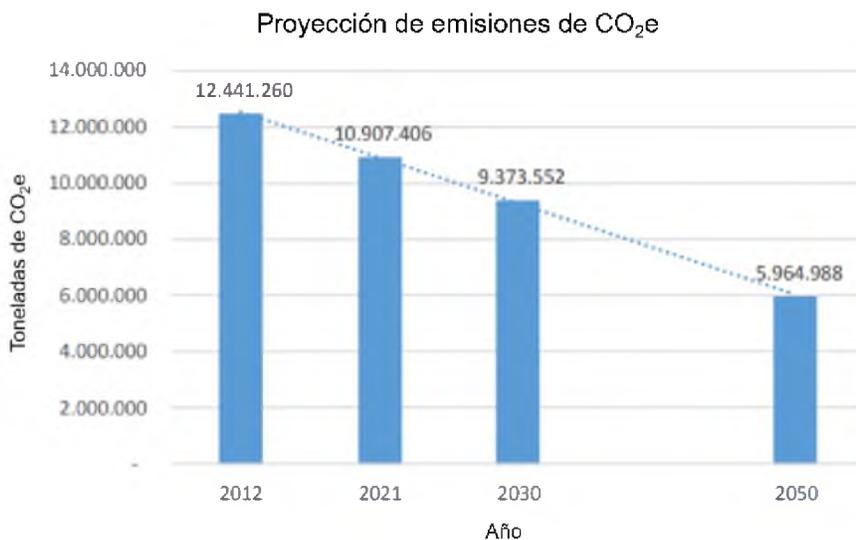


Figura 1-17. Proyección de emisiones de dióxido de carbono equivalente en función del año.

Modificado de (36).

En el 2016 el sector agropecuario contribuía con cerca de un 24% de la emisión total de gases de efecto invernadero (GEI), siendo el segundo sector que más aporta GEI (37), por lo tanto, si

Costa Rica desea ser carbono neutro se deben proponer soluciones para el sector agropecuario, dentro de las cuales las PFAL son una opción.

1.7.2. Acceso a energía renovable

Para implementar una PFAL se debe considerar el costo energético, rubro de mayor peso en los costos totales de operación de una PFAL (13) (**Figura 1-18**); por lo tanto, no sería válido implementar este tipo de tecnología en Costa Rica si este requerimiento culmina en agravar las emisiones de gases de efecto invernadero por producción energética.

Sin embargo, Costa Rica en el año 2017 acumuló 300 días con energía eléctrica con fuentes renovables (38), lo que indica que tiene la capacidad de abastecer los requerimientos energéticos de una PFAL por medio de energía renovable que no contribuye a emisiones de gases de efecto invernadero.

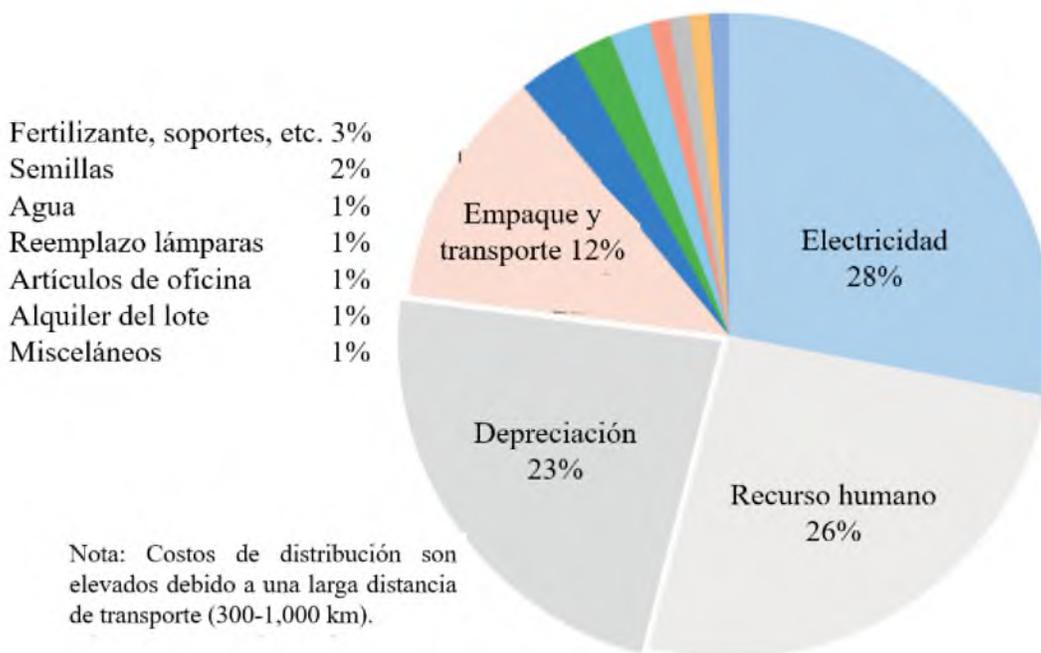


Figura 1-18. Costos de operación de una PFAL en Japón con una producción diaria cercana a 7000 cabezas de lechuga (13).

1.7.3. Método de producción

Identificar la factibilidad de una PFAL en el país es necesario para comprender si es viable la implementación del sistema. La tecnología que compite directamente con la PFAL en Costa Rica es la producción de vegetales en invernaderos; los cuales en los trópicos no son tan eficientes como en climas templados (39), debido a que en los trópicos las altas humedades relativas imposibilitan el enfriamiento evaporativo utilizado en invernaderos para controlar la temperatura interna en caso de temperaturas externas altas. Estas deficiencias de los invernaderos no existen en las PFAL lo que le otorga una ventaja considerable, convirtiéndolo en un sistema deseable desde el punto de vista de competitividad ya que permite obtener una producción más estable y de mayor densidad en menores tiempos (10).

Los métodos más apropiados para una PFAL son las camas apiladas y cilindros apilados debido a que son los que utilizan luz artificial y tienen una mayor densidad de plantación que los sistemas columnares. Las camas a pesar de ser muy utilizadas en el exterior, en Costa Rica pueden resultar inconvenientes debido a que se manejan volúmenes de agua libre por cada cama de siembra (en donde las raíces son sumergidas) a diferentes altitudes lo que en caso de un sismo resulta peligroso para la operación y para los operarios. Los cilindros apilados manejan volúmenes de agua menores, debido a que no todas las plantas tienen las raíces sumergidas al mismo tiempo, lo que los convierte en el candidato ideal para lugares sísmicos; sin embargo, la oferta actual de cilindros apilados es inexistente en Costa Rica y los diseños de los modelos comerciales extranjeros pueden ser mejorados en su diseño y estructura para facilitar su manejo y su incorporación en un sistema industrializado.

1.7.4. Acceso al crédito

Otro reto a superar es el acceso a crédito por parte de las entidades financieras debido a la alta inversión inicial, no obstante, Costa Rica se unió al acuerdo de París en el año 2016, según lo establecido en el decreto N° 9405 de la Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. Dentro del Acuerdo de París se menciona que uno de sus objetivos es: “Promover una implementación y cooperación eficiente y efectiva alentando políticas que movilicen inversiones públicas y privadas que sean predecibles, sustanciales y transparentes en proyectos de desarrollo resistente al clima y bajo en emisiones” (40), lo que se alinea con los principios de banca responsable propuestos por UNEPFI (*United Nations Environment Programme-Finance Initiative*) en los cuales se destaca el interés para motivar prácticas sostenibles y alinear las estrategias de negocio según las metas de desarrollo sostenible propuestas por el protocolo de París (41).

Esto conlleva a que proyectos de PFAL en Costa Rica que tengan un impacto positivo al medio ambiente y que sean novedosos tienen mayor facilidad para acceder al crédito necesario para su implementación, y a su vez ser promovidos debido a que se alinean a las políticas nacionales sobre cambio climático y prácticas sostenibles.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Método de diseño estructural

El diseño para un sistema hidropónico orbital debe cumplir ciertos requisitos específicos necesarios para ser incorporado de manera eficiente en una PFAL. Los criterios utilizados se muestran en el **Cuadro 2-1**. Entre estas características se debe recalcar el uso de materiales de fácil obtención y estandarizados ya que al ser construido en Costa Rica se requiere que la materia prima sea accesible en el mercado local y también se debe mencionar la facilidad de carga de plantas por medios automatizados, debido a que los diseños de cilindros apilados actuales tienen la desventaja de que para cargar o descargar las plantas es necesario desarmar todo el equipo lo que implica un movimiento de masa que puede ser evitado por medio de un diseño que solvante este inconveniente.

Cuadro 2-1. Criterios de diseño propuestos y utilizados para modelo industrial.

Criterio	Descripción
1	Capacidad para almacenar 100 plantas
2	Altura máxima de plantas igual a 30 cm
3	Espaciamiento entre plantas de 20 cm a 10 cm
4	Uso de materiales de fácil obtención y estandarizados
5	Facilidad de manufactura, mantenimiento e instalación
6	Marco externo independiente del marco orbital
7	Facilidad de carga de plantas por medios automatizados
8	Control automatizado y con acceso remoto
9	Fuente de luz LED en el eje central de rotación
10	Larga vida útil
11	Bajo costo
12	Capacidad de soportar un arreglo de 8 máquinas en forma vertical
13	Control de temperatura, humedad relativa, intensidad lumínica, velocidad de rotación y dosificación de nutrientes

Se decidió utilizar lechuga (*Lactuca sativa*) como planta base para el diseño de la máquina debido a que es una planta de fácil obtención en el mercado local y es utilizada comúnmente como modelo de estudio en el sector agrícola, lo que facilita la adquisición de información relevante a las necesidades biológicas de la planta.

Se calculó la carga viva máxima que debe soportar el equipo; para ello se consideró el peso máximo que puede alcanzar una lechuga dentro del sistema, el peso del sustrato dentro del contenedor y el peso máximo del agua atrapada dentro del sustrato como se muestra en la ecuación [2.1],

$$W_{viva,max} = (W_{planta} + W_{sustrato} + W_{agua}) \cdot N_{plantas} \cdot fs \quad [2.1]$$

donde, $W_{planta}(N)$ es la carga unitaria causada por la masa de la planta, $W_{sustrato}(N)$ corresponde a la carga unitaria del sustrato, $W_{agua}(N)$ corresponde a la carga unitaria causada por la masa del agua almacenada en el sustrato, $N_{plantas}$ corresponde al número de plantas que va a ser albergada dentro del sistema que corresponde a 100 (ver criterio 1 del **Cuadro 2-1**) y fs es el factor de seguridad el cual se consideró que fuera del 20%.

La carga del sustrato ($W_{sustrato}(N)$) se determinó mediante la ecuación [2.2],

$$W_{sustrato} = V_{sustrato} \cdot \rho_{sustrato} \cdot g \quad [2.2]$$

donde, $V_{sustrato}(m^3)$ corresponde al volumen abarcado por el sustrato, $\rho_{sustrato}(\frac{kg}{m^3})$ se define como la densidad aparente del sustrato y $g(\frac{m}{s^2})$ es la aceleración gravitacional que corresponde a $9,81 m/s^2$. Se trabajó con lana de roca como sustrato con una densidad aparente de $0,06 g/cm^3$ y un espacio poroso correspondiente al 97,6% del volumen (42), el cual se consideró de $1000 cm^3$.

La carga unitaria del agua (W_{agua} (N)) se determinó por medio de la ecuación [2.3].

$$W_{agua} = \frac{V_{sustrato}}{2} \cdot P \cdot \rho_{agua} \cdot g \quad [2.3]$$

donde, P es el porcentaje de porosidad del sustrato denotado en fracción decimal y ρ_{agua} corresponde a la densidad del agua la cual se asumió como 1000 kg/m^3 .

Una vez determinada la carga y las dimensiones básicas, se utilizó el software Inventor de AutoDesk (43) para modelar el equipo en un entorno tridimensional. La selección de los materiales se basó en la facilidad de adquisición, manufactura, costo y resistencia a las cargas al que sería expuesto.

El diseño comenzó por el desarrollo del marco orbital el cual contempla las restricciones impuestas por los criterios 2 y 3 del **Cuadro 2-1**, luego se incorporó el marco externo que satisface el criterio 6 del mismo cuadro y finalmente la cama de agua. Se agregaron conexiones no permanentes para los accesorios como sensores y componentes electrónicos.

2.2. Método de diseño del sistema electrónico

El sistema electrónico del equipo se encarga de operar diferentes elementos como las luces, ventiladores y la bomba de agua, debido a esto, se decidió seccionar el sistema electrónico en subsistemas para facilitar el diseño, en caso de que varios subsistemas requieran de alimentación con alto voltaje o corriente alterna se incorporó un conjunto de relevadores para operar estos equipos.

Se determinó el tipo de luz a utilizar y la distribución deseada que permita una exposición uniforme en cada planta por medio de un arreglo geométrico simétrico. A partir de estos requerimientos se calculó la potencia eléctrica necesaria para operar el sistema de iluminación.

Para el sistema de procesamiento de datos y control se utilizó el microcontrolador ESP-8266 y por medio de las especificaciones y tolerancias mencionadas en la hoja técnica se diseñó el circuito necesario para operar el microcontrolador.

La medición de datos se realizó por medio del sensor de temperatura y humedad relativa modelo DHT11. Para la medición de consumo eléctrico se decidió utilizar 1 voltímetro y amperímetro digitales de incorporación fija de 0 a 100 V y de 10 amperios, conectado al sistema de iluminación para monitorear el consumo de potencia en tiempo real.

Se incorporó una interfaz gráfica por medio de una pantalla de matriz de puntos de 128x64 pixeles, con el fin de permitir al usuario cambiar el estado de las luces, ventiladores y bomba de agua sin necesidad de reprogramar el microcontrolador.

2.3. Método de diseño para sistema de potencia mecánica

Se utilizó un motor de pasos debido a que este permite mantener el torque incluso si no está rotando, lo que permite tener un freno mecánico sin necesidad de incorporar componentes adicionales. También, este tipo de motor posee la ventaja de que se puede ajustar la velocidad de rotación alterando la señal correspondiente enviada al controlador del motor. Esta señal es producida por un circuito externo el cual envía un pulso eléctrico en un intervalo dado, cada vez que este pulso es recibido por el controlador del motor, este mueve el rotor un paso (correspondiente a 1.8°). Para el cálculo del intervalo entre pulsos para generar una velocidad de rotación específica, se utilizó la ecuación **Error! Reference source not found.**[2.4],

$$t = \left(\frac{x \cdot \frac{360}{P}}{3600000} \right)^{-1} = \left(x \frac{rev}{h} \cdot 5,55 \times 10^{-5} \frac{h \cdot ms}{rev \cdot paso} \right)^{-1} \quad [2.4]$$

donde t corresponde al tiempo en milésimas de segundo entre intervalos, P es la resolución del motor (°/paso) y x corresponde a la velocidad de rotación deseada en revoluciones por hora.

2.4. Método de diseño para plataforma de automatización

Para programar el microcontrolador se utilizó la plataforma Arduino IDE con el lenguaje C++. Se creó un software secundario en Visual Studio Community en la plataforma UWP (plataforma universal de Windows) en el lenguaje C#. Este software se encarga de desplegar de manera intuitiva para el usuario la información almacenada en el base de datos y por medio de protocolo TCP/IP se comunica directamente con el microcontrolador para obtener la información del mismo en tiempo real y permitiendo cambiar la configuración del sistema de manera remota.

2.5. Evaluación de rendimiento

2.5.1. Prueba de rendimiento

Se realizó una prueba preliminar para asegurar la operación del prototipo. La prueba consistió en trasplantar 40 lechugas adquiridas de la empresa Villaplants Costa Rica SRL ubicada en Agua Caliente de Cartago de Costa Rica (9°50'09.9"N 83°54'38.1"W) al sustrato de lana de roca, los cuales fueron saturados durante 15 minutos en agua con un pH entre 6 y 8 según las recomendaciones del fabricante. Se utilizó una solución para hidroponía mayor y menor del fabricante Ever Green con una concentración de 5 ml de solución mayor y 2,5 ml de la menor por cada litro de agua. Los ingredientes de ambas soluciones se presentan en el **Cuadro 2-2**.

Cuadro 2-2. Composición de solución hidropónica.

Solución	Elemento	Concentración (%) P/V
Mayor	Nitrógeno (N)	5,00
	Fósforo (P ₂ O ₅)	4,60
	Potasio (K ₂ O)	4,81
	Calcio (CaO)	2,80
	Magnesio (MgO)	1,30
	Inerte	81,49
	Total	100,00
Menor	Magnesio (MgO)	2,80
	Azufre (S)	2,00
	Boro (B)	0,04
	Cobre (Cu)	0,01
	Hierro (Fe)	1,60
	Manganeso (Mn)	0,04
	Molibdeno (Mo)	0,00024
	Zinc (Zn)	0,04
	Sodio (Na)	0,02
	Inertes	93,45
	Total	100,00

Se utilizó una exposición de luz de 16 horas sin control de temperatura o humedad y con velocidad de 1 revolución por hora. El sistema se dejó operar durante 2 semanas sin intervención. Al concluir se procedió a extraer la biomasa con valor comercial, la cual fue pesada para cada una de las plantas. Se determinó la relación de biomasa generada (R) según la cantidad de energía utilizada mediante la ecuación [2.5],

$$R = \frac{M}{E} \quad [2.5]$$

donde M es la masa producida dentro del sistema (g) y E es la energía utilizada durante el ciclo de producción (kWh).

Para determinar la masa que se produce en el sistema se pesó una muestra de 10 plantas antes de entrar al equipo, luego 15 días después de ingresar y luego de 30 días. Se comparó contra la referencia de 3,6 g ($\pm 0,6$) (44) y de 2,9 g (45) en los cuales ambos son lechugas hidropónicas en invernadero 30 días después de que se desarrollaron las primeras 2 hojas. Se considera que el rendimiento de lechuga en invernadero es de 6,91 kg/m² en un periodo de 60 días (46), el cual fue utilizado como base para estimar la producción necesaria en el sistema hidropónico.

2.6. Evaluación financiera

Se determinaron los costos de consumo energético del sistema, costos de materiales, fabricación y depreciación utilizando la información obtenida conforme se desarrolló el proyecto a partir de las mediciones en el equipo y utilizando los precios de venta para industria del kWh vigentes en el año 2019 del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), precio para industria del m³ de agua en el año 2019 del instituto de Acueductos y Alcantarillados (AyA) y precios de compra para la materia prima. Los costos de materiales se determinaron en función del material utilizado (y no de la cantidad comprada) en dólares con una tasa de cambio de 587,94 colones por dólar que corresponde al promedio del tipo de cambio del día 8 de junio del 2019 al 7 de julio del 2019 proveniente del Banco Central de Costa Rica. Los costos se estimaron con base en los precios al por menor y considerando los impuestos de venta para productos de Costa Rica. En el caso de productos importados se consideró el precio al por menor, impuesto de venta, nacionalización y transporte desde China hasta Costa Rica.

Se analizó la distribución de los costos para proponer cambios que permita mejorar el desempeño del sistema desde un punto de vista financiero.

Se realizó un estudio del flujo de caja en un periodo de 24 meses (2 años) para determinar la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN) los cuales son indicadores para evaluar el proyecto. Se asume que todo el producto producido es vendido, no aumenta la cantidad de plantas producidas, que los costos son fijos en el tiempo y que no hay pérdida de producto.

2.7. Evaluación de implementación del sistema para uso industrial.

Se propone un modelo de uso del sistema hidropónico orbital de manera industrializada donde se explora de manera teórica las ventajas y desventajas que una implementación de alta escala implicaría, por medio del uso de varios equipos colocados de manera vertical maximizando el uso del espacio junto con sistemas de control necesarios y la tecnología extra necesaria.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

El sistema hidropónico orbital consiste en 5 elementos básicos independientes denominados: marco externo, marco orbital, cama de agua, sistema de control y sistema de iluminación. El diseño del prototipo permite ajustar los elementos a diferentes condiciones de operación como la altura de la cama de agua, separación entre rieles, velocidad de rotación y condiciones ambientales con el fin de aumentar la flexibilidad del mismo para futuras pruebas experimentales con diferentes cultivos. En la **Figura 3-1** se muestra el modelo digital del prototipo junto con la señalización de los elementos básicos.

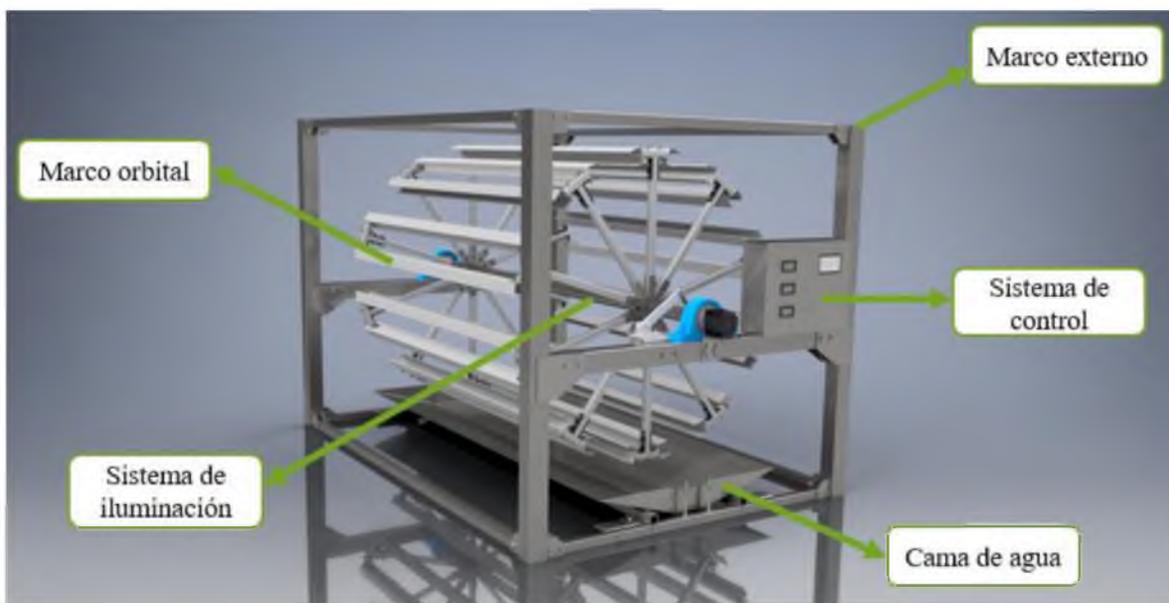


Figura 3-1. Prototipo de sistema hidropónico orbital computarizado y sus elementos.

El modelo industrial de S.Hi.O.C (Sistema Hidropónico Orbital Computarizado) debe cumplir con ciertos requerimientos de diseño, establecidos por las necesidades de implementación, manejo, mantenimiento, manufactura, vida útil y precio.

3.1. Diseño estructural del sistema hidropónico orbital

El sistema hidropónico orbital computarizado debe soportar una carga de compresión de 8 veces su peso total, esto con el fin de permitir un crecimiento vertical de hasta 8 equipos en el cuarto de cultivo. El equipo experimenta una carga viva que corresponde al peso de las plantas que varía en función del tiempo, el peso del volumen de agua ubicado en la cama de agua y el volumen de agua almacenado en los contenedores de plantas. Para determinar la carga de diseño es necesario comenzar con un dimensionamiento básico que permita determinar la ubicación de manera ideal y que se ajuste a los criterios de diseño.

3.1.1. Dimensionamiento inicial del sistema

La primera etapa de diseño consistió en la selección de varias distancias básicas, (alto, ancho, largo máximo del equipo, la distancia de las hileras de las plantas, la cantidad de hileras y la distancia entre la planta y el eje central). Se decidió utilizar una distancia de 1 m de alto y 1 metro de ancho en el marco exterior esto con el fin de satisfacer el criterio 4 del **Cuadro 2-1** ya que la ubicación de los equipos en planta se facilitaría si las dimensiones son simples, el mismo efecto se vería durante la manufactura, en especial por la longitud estandarizada de 6 m para los perfiles metálicos. El largo del equipo estaría en función de la distancia de las hileras de plantas.

Se ha demostrado que una separación de 10 cm entre planta y 20 cm entre hileras de lechuga obtienen mejores rendimientos por m² que otras distribuciones, generando plantas con alturas de hasta 25 cm, se han utilizado espaciamiento entre plantas de hasta 30 cm (47). Se decidió utilizar un espaciamiento máximo entre plantas de 20 cm, no obstante, la separación de las plantas puede ser variable dependiendo de la geometría del contenedor, esto satisface el criterio 3 del **Cuadro 2-1**.

Para cumplir el criterio 1 del **Cuadro 2-1** se debe distribuir homogéneamente las plantas con el fin de minimizar la fatiga que experimentan los componentes estructurales. En la **Figura 3-2** se muestra la propuesta de distribución que satisface el criterio 2 del **Cuadro 2-1** al utilizar una distancia de 40 cm con respecto al eje de rotación, esto un espaciamiento entre hileras de 23,51 cm. Esta distribución sería la máxima permitida ya que de extremo a extremo se tiene 80 cm y al utilizar una altura máxima de 1 m indica que se tiene 20 cm para acomodar la cama de agua y los contenedores de plantas.

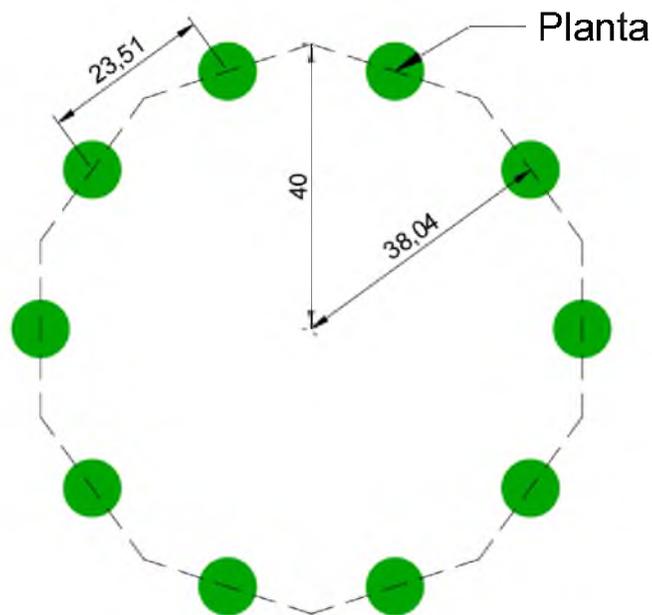


Figura 3-2. Distribución espacial máxima de plantas propuesta, vista frontal (unidades en cm).

Esta distribución permite una capacidad de 10 hileras, con el fin de sujetar 50 plantas a una separación de 20 cm (5 plantas por riel), lo que implica una distancia de 1m. Utilizando esta distancia se puede cargar el equipo hasta con 100 plantas con una separación de 10 cm.

La longitud del eje debe tener como mínimo la distancia máxima de hileras más 50 cm con el fin de generar un espacio entre el marco orbital y el marco externo para facilitar la inserción de plantas, el mantenimiento y el ensamble del equipo.

3.1.2. Sistema de sujeción

El sistema de sujeción del marco orbital tiene como objetivo sostener los contenedores de plantas de tal manera que mantengan su posición durante la rotación, de tal forma que las plantas reciban luz y que puedan ser removidas de manera sencilla al deslizar en dirección paralela al eje. La **Figura 3-3** muestra un modelo conceptual de como un sistema automatizado podría descargar o cargar la máquina. Bajo este modelo de trabajo se asume que la máquina siempre estará equilibrada con respecto a la cantidad de contenedores ubicados en cada fila.



Figura 3-3. Modelo conceptual de sistema automatizado para manipulación de contenedores en el sistema hidropónico orbital donde los contenedores de plantas son colocados y deslizados en los rieles.

Para realizar este proceso se decidió utilizar perfilera liviana tipo “C” (**Figura 3-4.a**). Al usar este tipo de perfil en pares ubicados en paralelo se alcanza una restricción de 5 grados dejando libre el grado que corresponde al paralelo a los perfiles. La **Figura 3-4.b**. muestra una vista

transversal del modelo conceptual de sujeción en el cual se puede observar como el perfil “C” rodea una parte del contenedor limitando su movimiento.



Figura 3-4. (a) Propuesta de perfil “C” para sujeción. (b) Modelo conceptual de sujeción.

3.1.3. Determinación de carga de diseño

La carga utilizada para diseñar los elementos estructurales considera la masa viva de la planta, del sustrato y del agua para cada contenedor cúbico de 10 cm de lado. Se consideró una masa máxima de la planta de 0,5kg, que corresponde a una carga de 4,91 N.

El peso de la lana de roca se estimó por medio de la ecuación [3.1], donde se utilizó una densidad aparente de 0,06 g/cm³ y un espacio poroso correspondiente al 97,6% del volumen (42).

$$W_{sustrato} = (0,1 \text{ m})^3 \cdot \frac{0,06 \text{ g}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \cdot \frac{1.000.000 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,58 \text{ N} \quad [3.1]$$

La cantidad de agua máxima almacenada en cada contenedor se estimó asumiendo que el nivel freático estaría 5 cm sobre la cara inferior del contenedor, el espacio disponible para almacenar

agua sería el correspondiente al espacio poroso de la lana de roca en dicho volumen. En la ecuación [3.2] se muestra el procedimiento utilizado para determinar la carga del agua, se asume una densidad de 1.000 kg/m^3 .

$$W_{\text{agua}} = 0,1 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 0,05 \text{ m} \cdot \frac{97,6}{100} \cdot \frac{1.000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 4,79 \text{ N} \quad [3.2]$$

Al sumar la carga de la planta, del sustrato y del agua se obtiene la carga viva unitaria máxima como se muestra en la ecuación [3.3]. Posteriormente se multiplica por la cantidad de contenedores y se obtiene lo que se denomina la carga viva máxima para el prototipo (ecuación [3.4]). Se denota como viva porque esta cambiara a lo largo de la operación del sistema debido a que la planta aumentara su masa y el agua variará su masa dependiendo de su posición en el ciclo de operación, ya sea adquiriendo masa al ser sumergida en la cama de agua o al perder masa por absorción de la planta y evaporación con el medio.

$$W_{\text{viva,unitaria}} = 4,90 \text{ N} + 0,58 \text{ N} + 4,79 \text{ N} = 10,27 \text{ N} \quad [3.3]$$

$$W_{\text{viva,max}} = 100 \cdot W_{\text{viva,unitaria}} = 1027 \text{ N} \quad [3.4]$$

Para la sujeción de los contenedores se utilizaron perfiles estructurales livianos tipo “Strut” perforado. Este perfil debe medir 1 m de largo, esto para tener espacio para sujetar contenedores de 10 cm.

Dada la longitud de 1m, se determinó la carga correspondiente a los perfiles ($W_{\text{Stud,unit}}$) (ecuación [3.5]), y la carga total ($W_{\text{Stud,max}}$) se obtiene multiplicado la carga unitaria por la cantidad de piezas utilizadas (ecuación [3.6]).

$$W_{Stud,unit} = 1 \text{ m} \cdot 1,44 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 14,12 \text{ N} \quad [3.5]$$

$$W_{Stud,max} = W_{Stud,unit} \cdot 20 = 282,4 \text{ N} \quad [3.6]$$

Donde 1,44 kg/m es la masa lineal del perfil estructural (dado por el fabricante (48)). El perfil utilizado para darle soporte a los perfiles Strut, denominados rayos, son de aluminio 6061 con una densidad aproximada de 2.710 kg/m³ (49) y con un perfil cuadrado de 19 mm x 19 mm con un espesor de 1,2 mm. Se decidió utilizar este material debido a la reducción de peso del orbital es de importancia en el diseño para consumir menos energía al rotar.

Para estimar el peso del elemento de aluminio se utilizó una longitud de 40 cm del decágono mostrado en la **Figura 3-2** (ecuación [3.7]) y la carga total se calculó según la ecuación [3.8] donde se contempla la carga de los 20 elementos de aluminio necesarios.

$$A_{perf,alum} = (0,019 \text{ m})^2 - (0,019 \text{ m} - 2 \cdot 0,0012 \text{ m})^2 = 85,44 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad [3.7]$$

$$W_{alum} = 0,4 \text{ m} \cdot 85,44 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 2.710 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 20 = 18,00 \text{ N} \quad [3.8]$$

De la información obtenida anteriormente, se determinó la carga de diseño que debe soportar el eje de rotación y el marco exterior. Para ello se sumó la carga máxima viva, la carga del perfil Strut y la carga del aluminio, a este total se le agregó un factor de seguridad de un 20%, (ecuación [3.9]).

$$W_{diseño} = (1027 \text{ N} + 282,4 \text{ N} + 18,00 \text{ N}) \cdot 1,20 = 1592,88 \text{ N} \quad [3.9]$$

3.1.4. Ensamblaje del marco orbital

Se realizó un modelo digital del marco orbital en el cual se utilizó uniones no permanentes para satisfacer el criterio 5 del **Cuadro 2-1**, en el cual es necesario que los perfiles tipo “C” se instalen de tal manera que se vean enfrentados, para ello debe instalarse un componente intermedio entre el rayo y el perfil. Se utilizó el software AutoCAD de AutoDesk para determinar las dimensiones de este componente intermedio como se observa en la **Figura 3-5.a**, donde x es variable y depende de las dimensiones del perfil “C”, en la **Figura 3-5.b** se muestra el componente final modelado en Inventor.

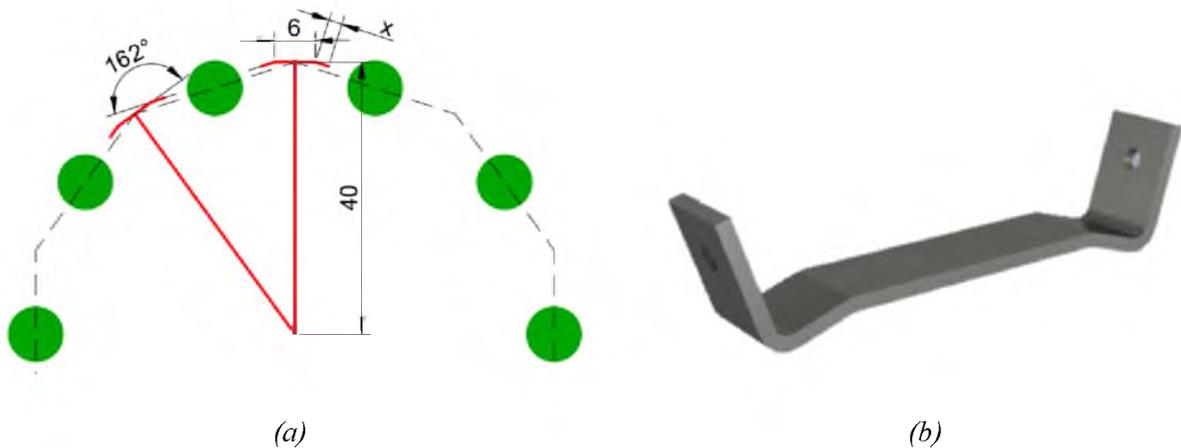


Figura 3-5. (a) Determinación de dimensiones de componente medio entre rayo y perfil “C” (unidades en cm) donde x representa una distancia dependiente del ancho del riel. (b) Modelo tridimensional del componente.

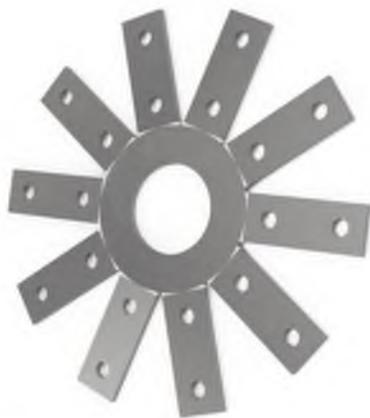
Este elemento medio es sujetado por dos soportes en “L” (ver **Figura 3-6**) al rayo de aluminio por medio de una doble conexión pernada. Se realizó de esta manera para poder eliminar todos los grados de libertad de ambos soportes. El espesor de este elemento es igual al espesor del

componente medio mostrado en la Figura 3-5.b con el fin de realizar un mejor aprovechamiento de la lámina de metal.

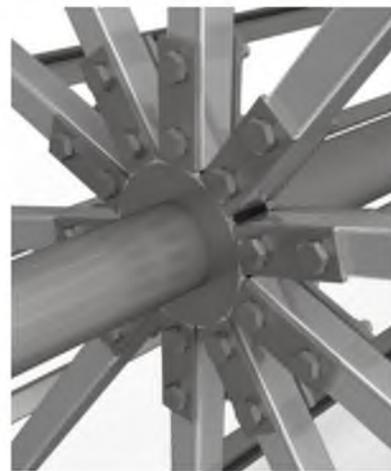
La unión entre el eje central y los rayos se realiza por medio de un par de piezas compuestas como se muestra en la Figura 3-7.a las cuales son permanentemente unidas al eje; sin embargo, la unión con los rayos es doblemente pernada con el fin de restringir por completo el movimiento. El espesor de este componente es equivalente al de los soportes “L” y al soporte medio. Este componente se dimensionó de tal manera que los rayos no entraran en contacto entre ellos ni con el eje como se muestra en la Figura 3-7.b.



Figura 3-6. Soporte en L para sujeción de rieles.



(a)



(b)

Figura 3-7. (a) Soporte entre rayos y eje. (b) Ensamble entre el soporte con los rayos y el eje.

Una vez modelado los elementos anteriores se procedió a incorporar el rayo y generar el ensamble correspondiente como se muestra en la Figura 3-8.a, este elemento se acomodó en un arreglo radial para ser unido con el eje. Se incorpora finalmente los perfiles tipo “C” y se obtiene el marco orbital como se observa en la Figura 3-8.b.

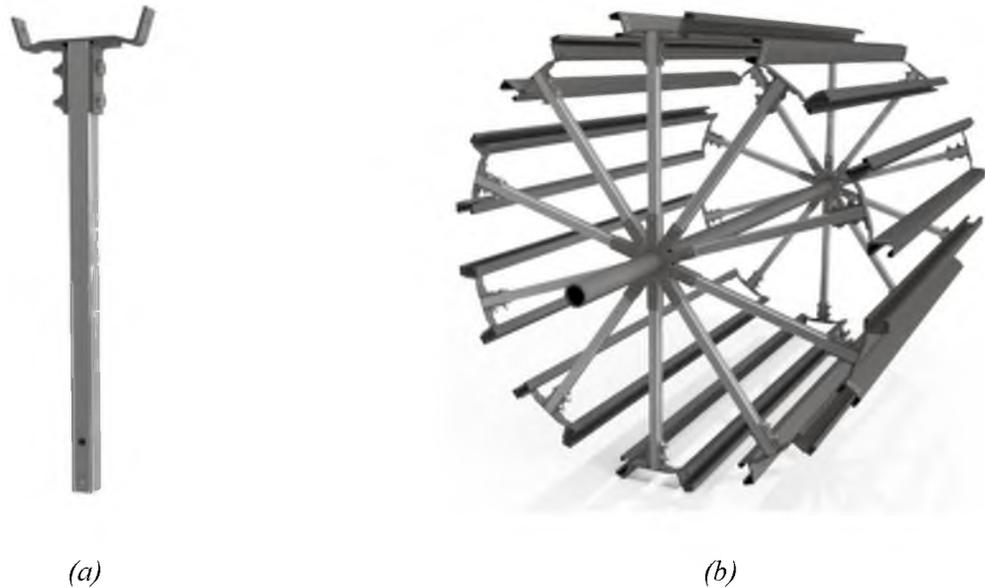


Figura 3-8. (a) Ensamble de rayo unitario. (b) Ensamble de marco orbital.

3.1.5. Ensamble de marco externo

Utilizando el software Inventor de Autodesk se determinó que el marco orbital tiene una masa de 43,71 kg lo que implica una carga de 428,79 N. Al agregarse la carga viva máxima se obtiene una carga total de 1455,79 N que es usada para diseñar el marco externo.

Para este componente se utilizaron dos tipos de perfiles cuadrados de acero galvanizado de 50mm con 2,37mm de espesor para la estructura principal y un segundo de 25mm y 1,8mm para tensores. Se acomodaron de tal manera que el ancho y alto fuera de 1m, el largo es de 1,5m. Se colocó en la parte frontal y trasera dos perfiles cuadrados de 50mm con 2,37mm de espesor de manera horizontal para soportar la carga del marco orbital, la Figura 3-9 muestra este ensamble.

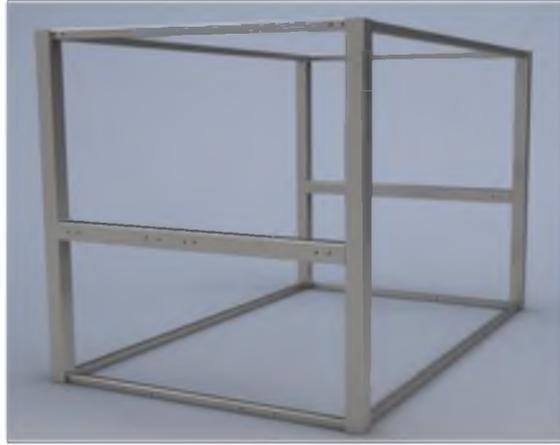


Figura 3-9. Estructura utilizada para marco externo.

Para ensamblar la estructura se utilizó soportes soldados a los perfiles mayores y estos soportes se sujetan a los perfiles menores por medio de conexiones pernadas. Los soportes utilizados son de 3,18mm de espesor y son de dos tipos: el primer tipo es el utilizado entre los perfiles mayores y menores como el que se muestra en la Figura 3-10.a; el segundo tipo es el utilizado entre los perfiles mayores y los dos perfiles ubicados en el centro del equipo, este soporte se muestra en la Figura 3-10.b.



(a)



(b)

Figura 3-10. (a) Modelo de soporte menor. (b) Modelo de soporte mayor.

Finalmente, se colocó el rodamiento y el soporte correspondiente en el medio de los perfiles horizontales centrales y se realiza la conexión pernada entre perfiles. El marco externo finalizado se muestra en la Figura 3-11.



Figura 3-11. Marco externo con soportes, uniones no permanentes y roles.

3.1.6. Diseño de cama de agua

La cama de agua consiste en una lámina de acero galvanizado de 1.58mm de espesor doblada para formar un área transversal con forma trapezoidal. Esto permite que los contenedores se sumerjan lentamente en el agua con nutrientes y al momento de salir permita que el exceso de agua escurra dentro de la cama evitando pérdida de agua. En Figura 3-12 se muestra el modelo tridimensional de la cama de agua.

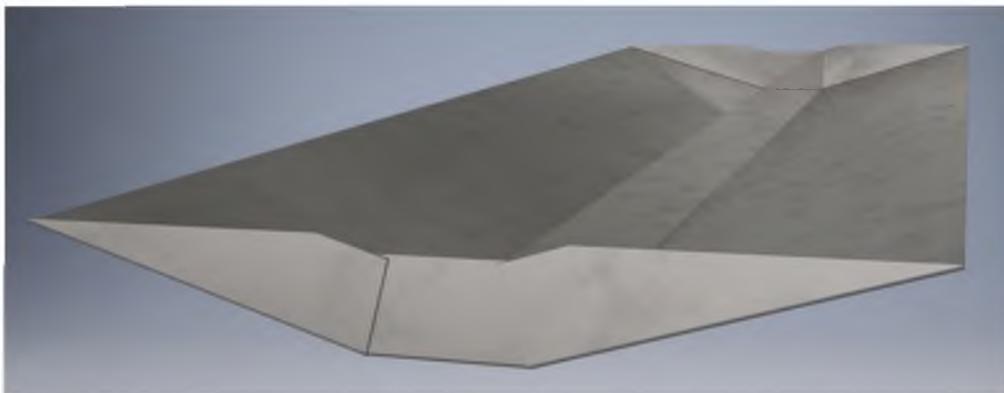


Figura 3-12. Modelo tridimensional de cama de agua.

Para ajustar la altura de la cama de agua con el fin de darle flexibilidad al equipo se diseñó un juego de soportes de altura ajustable por medio de un sistema de barras roscadas ancladas al marco externo. Estos soportes tienen forma de “Z” (**Figura 3-13**) y están fabricados con una lámina de acero galvanizado de 3.8mm doblada unidos permanentemente a la base de la cama de agua. El ajuste de la altura se realiza por medio de tuercas como se muestra en la **Figura 3-14**.



Figura 3-13. Soporte en Z para cama de agua.

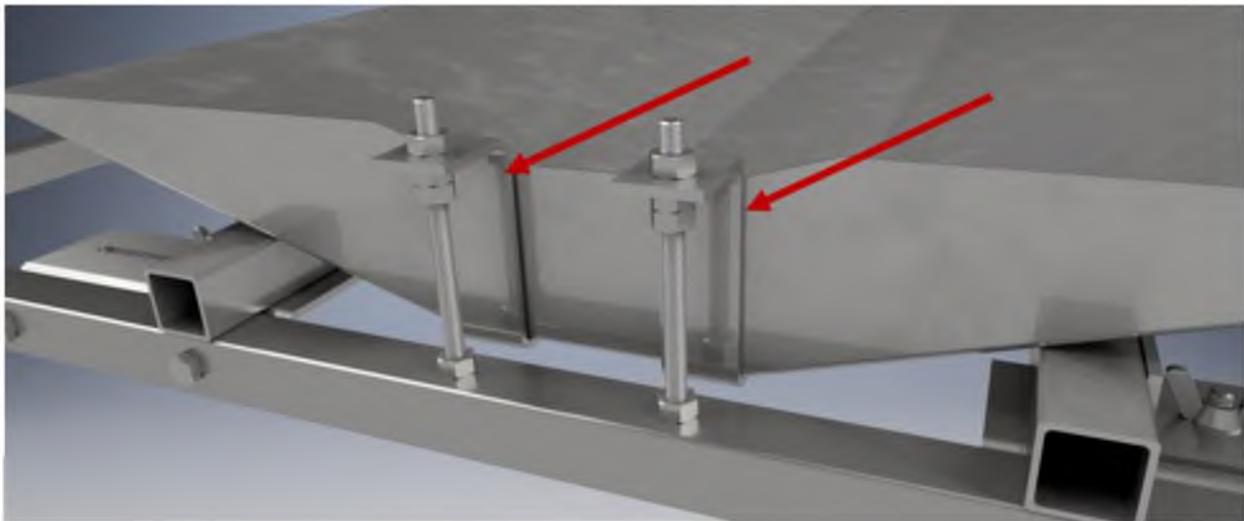


Figura 3-14. Soporte con ajuste de altura para cama de agua.

Debido a que el peso del agua ejerce una carga distribuida en las paredes de la cama de agua es necesario unos soportes que permitan transmitir la carga al marco externo. Para ello se utilizó

dos perfiles cuadrados de acero galvanizado de 25 mm y 1.8mm de espesor. Estos perfiles se ajustan por medio de una unión no permanente hasta estar en contacto con la cama de agua permitiendo que al cambiar la altura de la cama de agua los soportes secundarios puedan alterar su posición. En **Figura 3-15** se muestra el sistema descrito.

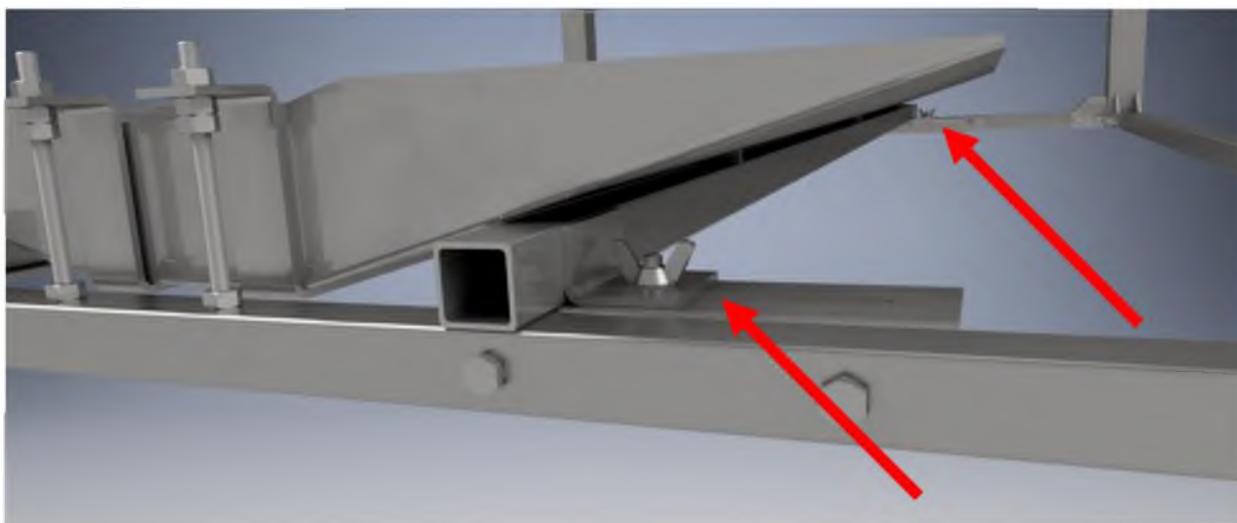


Figura 3-15. Soporte secundario para cama de agua.

3.2. Diseño de sistema electrónico

El sistema electrónico se divide en cuatro categorías: 1) sistema central de control, 2) sistema de distribución de potencia, 3) sistema de iluminación y 4) sistema de potencia mecánico, cada uno con componentes diferentes. Estos sistemas comparten información entre ellos con el fin de operar el equipo.

En la **Figura 3-16** muestra las rutas de comunicación que existen entre cada uno de los componentes de los distintos sistemas. Se debe destacar que existen dos modos de operar el equipo: de manera automática y de manera manual. Esto se logra a través de lógica de bajo nivel la cual capta los estados de los controles con los que el usuario interactúa y cambia la configuración del equipo acorde a ello. En el diagrama de comunicación se observa como las

entradas manuales se conectan con las puertas lógicas que a su vez se conectan con el microcontrolador principal y al sistema objetivo.

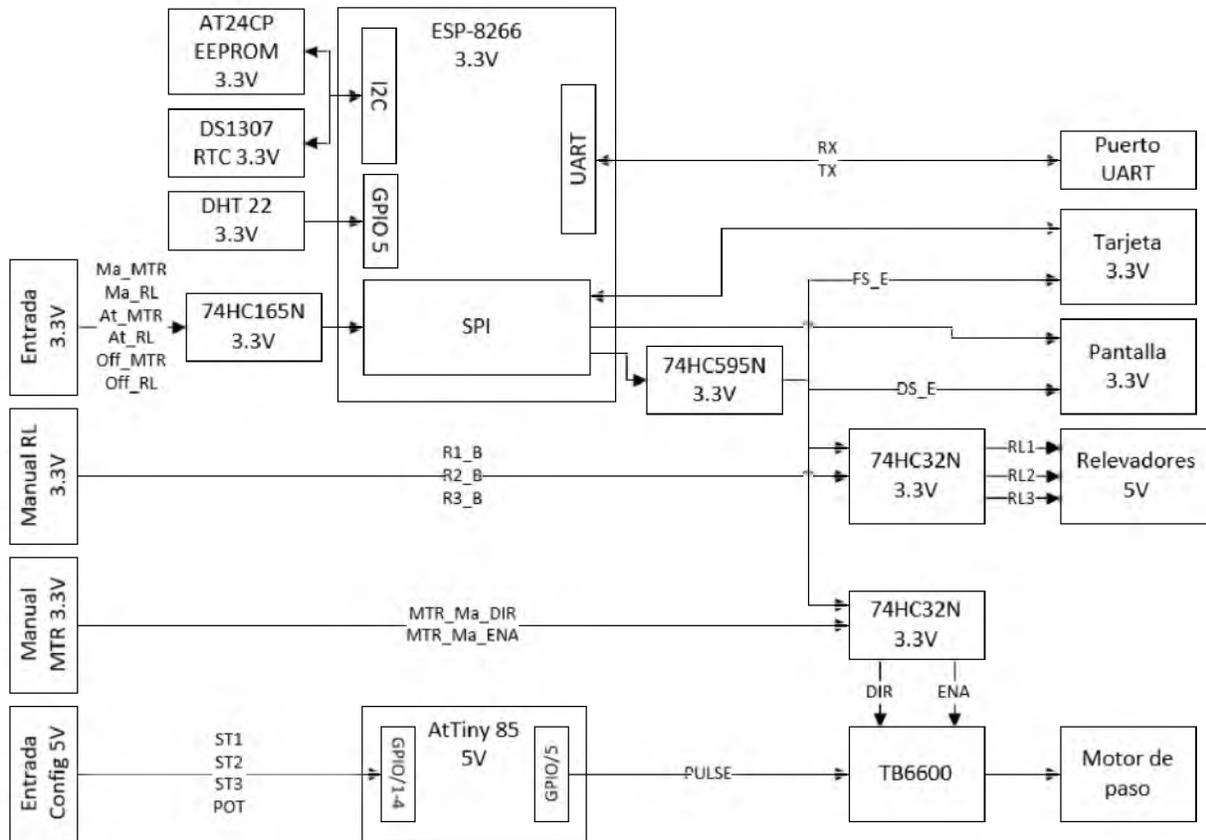


Figura 3-16. Diagrama de comunicación entre dispositivos electrónicos y voltajes de operación.

3.2.1. Diseño de sistema de potencia eléctrica

La distribución de potencia consta de 3 componentes principales. El primero de estos componentes es una fuente de poder de 240 W que transforma la corriente alterna a 12 VDC. Este quipo cuenta con protección a inversión de voltaje, sobrecalentamiento y sobrecarga. El segundo componente es el LM2576 que es un regulador de voltaje conmutado que se encarga de tomar los 12 V en la fuente de poder y genera una línea de 5 V con una capacidad máxima de 3 A, posteriormente los 5 V son convertidos a 3.3 V por el tercer componente, un regulador de

voltaje lineal LM1117 con una capacidad máxima de 800 mA, como se observa en **Figura 3-17**. Los componentes pasivos (resistencias, capacitores,) se seleccionaron y conectaron según las especificaciones indicadas en las hojas técnicas de cada componente.

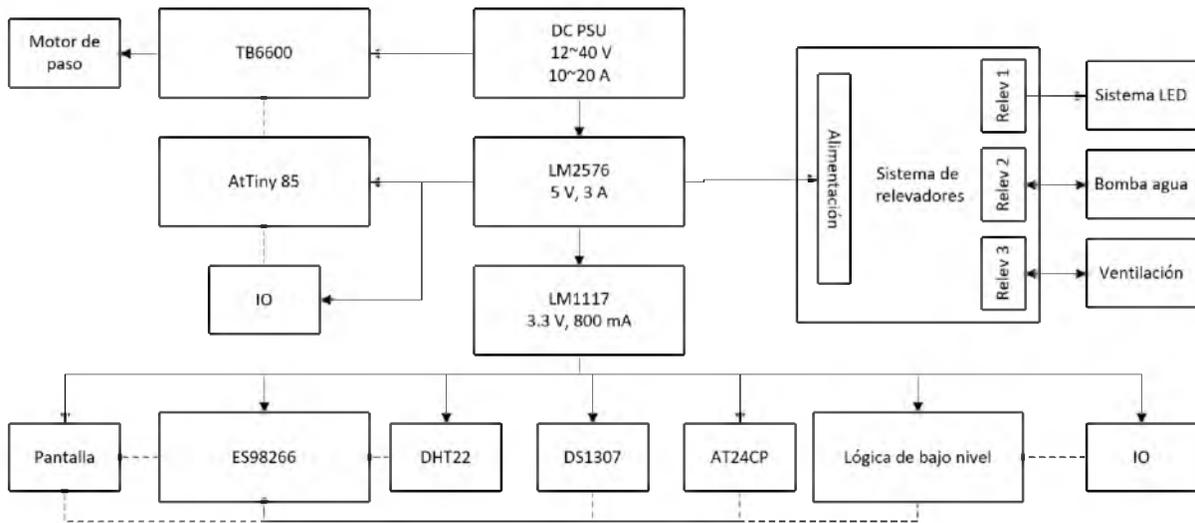


Figura 3-17. Diagrama de distribución de potencia eléctrica, la línea punteada representa intercambio de información, la línea continua denota transmisión de potencia.

Con el diagrama anterior se crean 3 líneas de voltaje (12 V, 5 V, 3.3 V) lo que permite alimentar los diferentes dispositivos electrónicos directamente desde la placa de circuitos. Para los componentes que se encuentran fuera de la placa madre (sistema de luces) o equipos de alta potencia (bomba de agua y ventilador) se utiliza un trío de relevadores de 5 V los cuales son operados por un trío de transistores 2N2222 y señales lógicas de 3.3 V. Se decidió utilizar esta configuración para ser recargados con la línea de 3.3 V, ya que todos los componentes lógicos operan a este nivel. La línea de 5 V posee un fusible de protección de 3 A y la línea de 3.3 V tiene otro de 750 mA.

Para facilitar la medición de consumo eléctrico se incorpora un medidor de voltaje y amperaje digital modelo DSN-VC288 como el de la **Figura 3-18** que permiten en tiempo real realizar la lectura de los componentes internos del equipo.



Figura 3-18. Multímetro digital utilizado para mediciones en tiempo real.

3.2.2. Diseño de sistema de control

El microcontrolador ESP-8266 de Espressif (**Figura 3-19**) es el encargado del sistema de control, el cual posee conexión a internet por medio de Wi-Fi con protocolo IP/TCP, y es manejado por un procesador Tensilica L106 de 32-bit que opera a 160 MHz. El módulo tiene una memoria flash de 4 MB accedida por la interfaz serial periférica del microcontrolador.



Figura 3-19. Microcontrolador ESP8266MOD 12E.

Debido a que es necesario almacenar la configuración de operación dada por el usuario se incorporó una memoria borrable y programable de solo lectura conocidas como EEPROM de

16kB modelo AT24C16. Esta memoria utiliza la interfaz serial de dos cables conocida como I²C y en caso de que el equipo sea apagado o pierda potencia eléctrica la información de configuración de operación puede ser accedida desde esta memoria.

Por medio de la interfaz I²C se opera un reloj de tiempo real DS1307 el cual cuenta con la capacidad de brindar el año, mes, día, hora, minuto y segundo según se necesite con una precisión de hasta ± 1 minuto por año. Cuenta con una batería externa de 3.3 V que permite que este siga operando, incluso si el equipo se encuentra apagado.

Además, el sistema de control tiene conectado un sensor de humedad relativa y temperatura DHT11 con una precisión de ± 2 C y $\pm 5\%$ de humedad relativa. Este sensor utiliza un protocolo de comunicación propietario y requiere que la línea utilizada para enviar información esté positiva lo cual se realiza por medio de una resistencia (pull up) de 10 k Ω .

La pantalla utilizada para interactuar con el usuario es de matriz de puntos de 128x64 pixeles modelo HJ12864ZW controlada por la interface serial periférica (SPI). Esta interfaz es levemente diferente a la de I²C ya que requiere de un tercer cable por cada dispositivo conectado a la interfaz. Este cable se encarga de enviar una señal que determina cual dispositivo debe recibir la información. En la interfaz I²C cada dispositivo tiene una dirección única la cual es compartida entre dispositivos, así el microcontrolador puede indicar la dirección del dispositivo al que desea comunicarse previo a enviar la información permitiendo que solo sea recibida por el objetivo correspondiente.

Se utiliza un registro de desplazamiento de serial a paralelo tipo 74HC595N para poder controlar que dispositivo debe recibir la información del SPI, también es utilizado para enviar la señal de control automática de otros sistemas.

Los relevadores del sistema de potencia son controlados por una puerta lógica tipo “OR” modelo 74HC32N encargada de servir como punto de encuentro entre las señales manuales (creadas por los interruptores) y automáticas (enviadas por el registro de desplazamiento). Debido a que los relevadores operan a 5 V y la puerta lógica a 3.3 V se utiliza un juego de transistores 2N2222 como interruptor eléctrico.

Para que el usuario pueda interactuar con la pantalla se colocaron 5 botones operados a través de un registro de desplazamiento de paralelo a serial modelo 74HC165N el cual es periódicamente leído por el microcontrolador, cada una de las entradas al registro está conectada por medio de una resistencia (“pull down”) de 10 k Ω a tierra para evitar interferencias.

Se utilizó un contenedor metálico para albergar estos componentes (**Figura 3-20**) con las dimensiones de 30x25x10 cm.

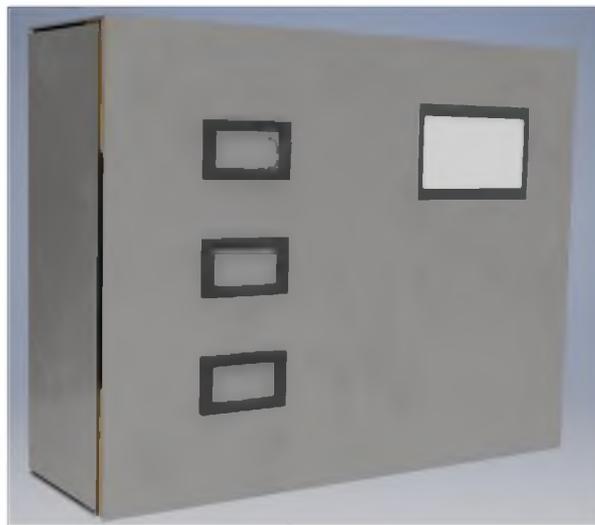


Figura 3-20. Modelo digital del panel de control y distribución de potencia.

3.2.3. Diseño de placa madre

Basándose en los criterios anteriores se diseñó la placa madre en el software EasyEDA como se muestra en la **Figura 3-21**.

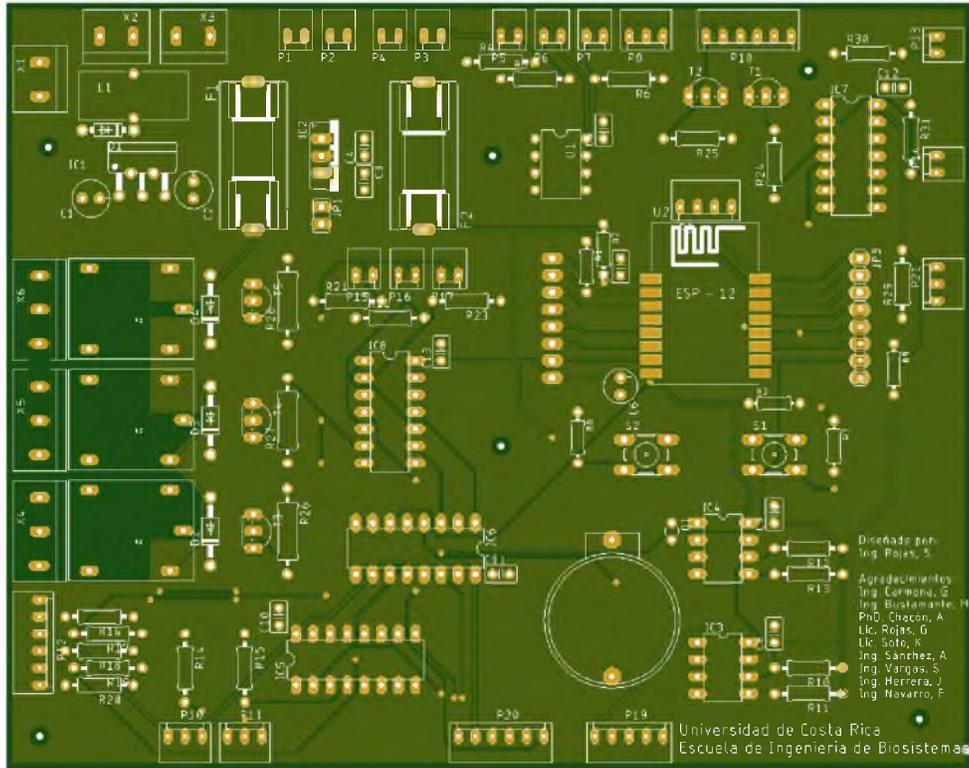


Figura 3-21. Diseño final de placa madre.

3.2.4. Diseño de sistema de iluminación

El cumplimiento del criterio 9 del **Cuadro 2-1** requiere de un análisis espacial del equipo en función de la capacidad de las luces tipo LED y requerimientos de las plantas. Se utilizó LEDs tipo SuperFlex como se muestra en la **Figura 3-22**. Este tipo de tecnología permite ángulos de distribución de hasta 90° con respecto al eje vertical del emisor, esto permite una distribución uniforme a lo largo de un área mayor.



Figura 3-22. LED tipo SuperFlex.

Para determinar la cantidad de luces LED a utilizar se realizó una distribución espacial por medio de dibujo en 2D utilizando un ángulo de 60° con respecto a la vertical esto debido a que se desea mejorar el traslape entre la luz emitida por los LEDs. Se comenzó por una distribución de manera radial como se muestra en la **Figura 3-23.a** donde la zona sombreada representa el área de influencia de los LEDs y se aprecia que abarcan toda la sección radial del sistema. La **Figura 3-23.b** muestra la distribución de la luz de forma longitudinal en dirección al eje de rotación, en este caso el traslape se da entre emisores de 450nm y 670nm de longitud de onda. Esta distribución permite que cada planta sea irradiada en una relación 1:2 o 1:3 de luz azul y roja respectivamente.

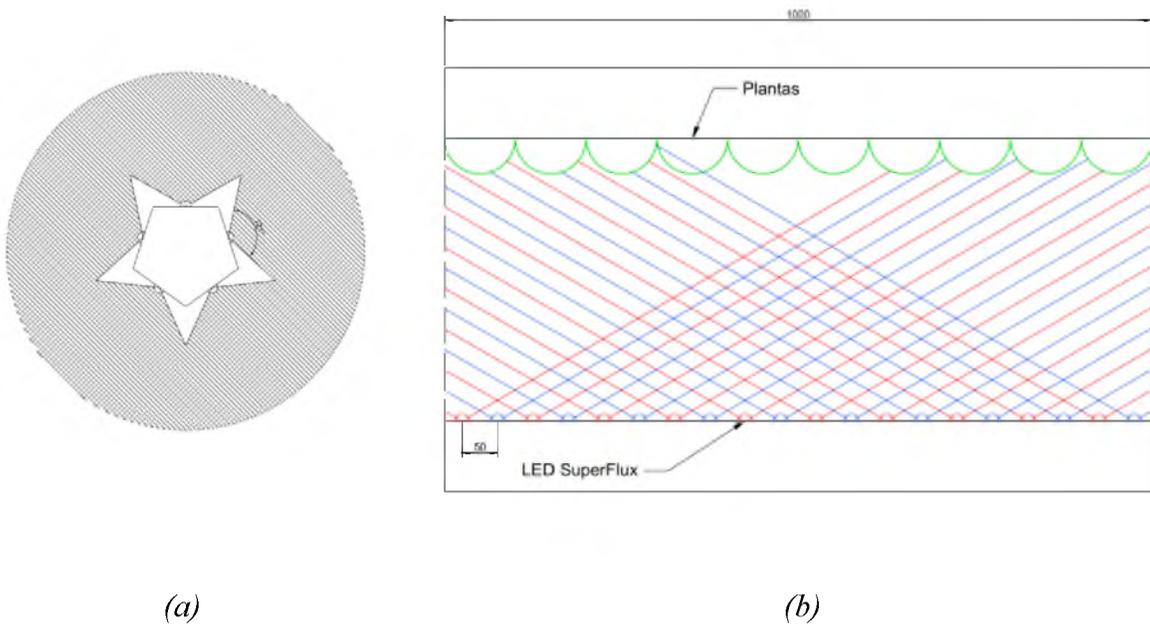


Figura 3-23. (a) Distribución radial de luz. (b) Distribución longitudinal de luz unidades en mm.

La utilización de los LEDs SuperFlux permite disminuir la cantidad de diodos necesarios por sistema hasta un total de 100 elementos reduciendo así el consumo energético del sistema y haciendo un uso más efectivo de la energía.

3.2.5. Diseño de sistema de potencia mecánica.

El motor de paso es modelo 57HS11230 (**Figura 3-24.a**), Nema 23 de 3 A con un torque de 3 N·m y un ángulo de rotación de 1.8°, el cual es alimentado por un controlador basado en TB6600 (**Figura 3-24.b**) que puede otorgar de 0.5 A hasta 3.5 A con una alimentación de 9 V a 40 V corriente directa. Este controlador puede ser configurado para operar a diferentes corrientes y micropasos. Requiere de 3 señales de entrada para controlar si el motor está encendido, la dirección que debe usar y un pulso para indicar cuando dar un paso. Las señales de encendido y dirección son suministradas por el sistema de control a través de una puerta lógica que se encarga de servir como punto de encuentro entre la señal automática y manuales. La señal de pulso es generada por el microcontrolador AtTiny 85 (**Figura 3-24.c**) de Atmel que opera a 8 MHz con 5 V el cual a través de una interfaz manual es configurado para que genere el pulso a intervalos constantes, efectivamente controlando la velocidad del motor.

El AtTiny 85 cuenta con su propio código que le permite interpretar las señales provenientes de las entradas para así calcular el intervalo temporal entre pulsos para alcanzar una velocidad de rotación establecida, los intervalos se determinaron para 7 velocidades como se muestra en el **Cuadro 3-1**.

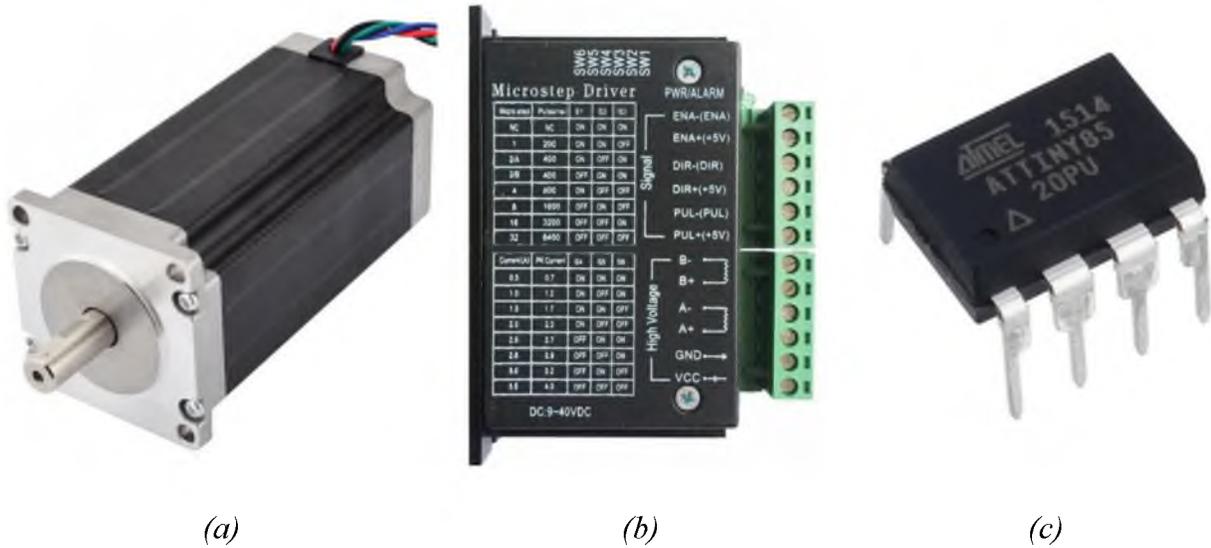


Figura 3-24. Dispositivos principales del sistema mecánico de potencia.

Cuadro 3-1. Relación entre velocidad de rotación e intervalo de pulsos utilizados.

Velocidad (rev/h)	Intervalo entre pulsos (ms)
0.125	144000
0.25	72000
0.5	36000
1	18000
2	9000
3	6000
4	4500

3.3. Diseño de plataforma de monitoreo, almacenamiento de datos y lógica de operación de microcontroladores

3.3.1. Programación del controlador principal ESP8266

El software programado para el ESP8266 opera la mayoría de dispositivos electrónicos dentro del sistema y es uno de los pilares fundamentales para operar el equipo, esto causa la necesidad de que el código utilizado sea robusto, flexible y con la mayor cantidad de corroboraciones para evitar el traspaso de información falsa o incoherente que comprometa la operación del equipo.

La **Figura 3-25** muestra un diagrama de operación simplificado de la lógica que utiliza el microcontrolador donde la configuración inicial ocurre únicamente una vez cuando se enciende el dispositivo, posteriormente realiza la rutina de manera indefinida o hasta que se apague el equipo.

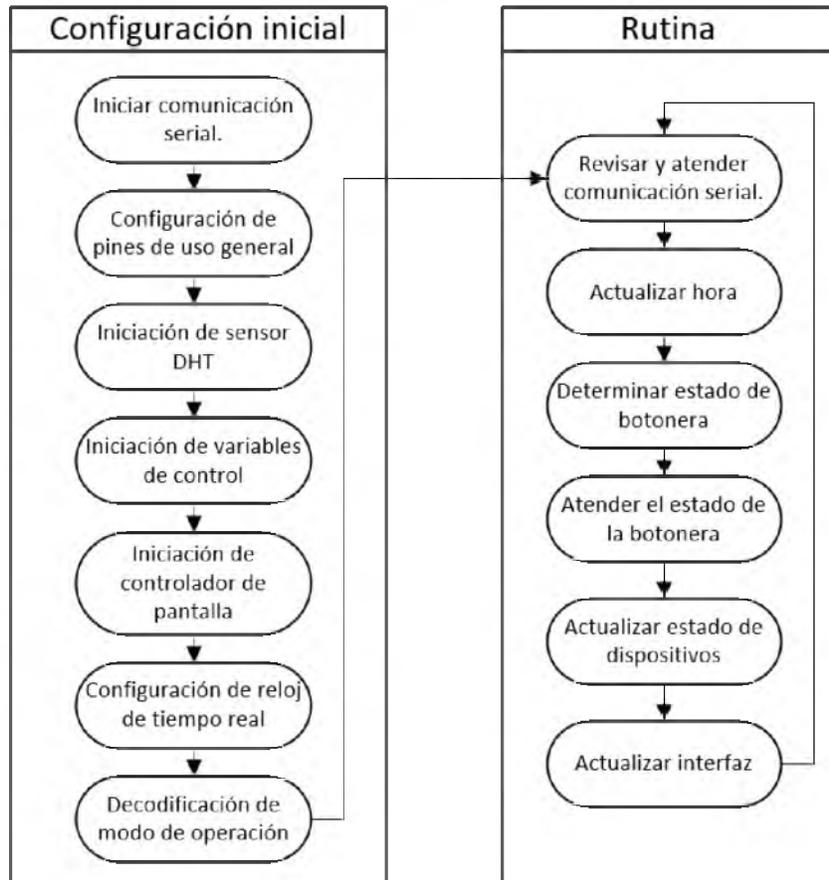


Figura 3-25. Diagrama simplificado de operación de ESP8266.

Dentro de las funciones principales que debe ejecutar el programa es la decodificación del modo de operación de los 3 dispositivos de potencia externa (luz Led, bomba de agua, ventilación) y el modo de operación del motor. Para ello se almacena la configuración correspondiente en la EEPROM AT24CP16A en forma de bytes según la tabla de equivalencias del **Cuadro 3-2**, donde ‘*’ indica que no importa el valor que ese bit posea. Los bits del 7 al 4 corresponden a un

indicador único para cada uno de los dispositivos con el fin de verificar la identidad del mismo. El software permite guardar 7 conjuntos de configuraciones independientes lo que otorga la facilidad de almacenar en memoria diferentes tratamientos para diferentes productos.

Cuadro 3-2. Tabla de equivalencias para configuración de dispositivos.

	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0	Equivalencia
Cnf 1	*	*	*	*	*	*	*	0	El dispositivo está deshabilitado o en modo manual
Cnf 2	*	*	*	*	*	*	0	1	El dispositivo está siempre encendido
Cnf 3	*	*	*	*	*	0	1	1	El dispositivo opera dentro de un rango de tiempo
Cnf 4	*	*	*	*	*	1	1	1	El dispositivo cambia su estado en un intervalo de tiempo definido
Cnf 5	*	*	*	*	0	*	*	*	El estado del dispositivo no se reporta en el informe
Cnf 6	*	*	*	*	1	*	*	*	El estado del dispositivo es reportado en el informe

La comunicación del microcontrolador con cada uno de los dispositivos externos es transmitida por medio de un registro de desplazamiento el cual interactúa con una puerta lógica de bajo nivel que se encarga de interpretar las señales del registro de desplazamiento y manuales. El **Cuadro 3-3** muestra el dispositivo que controla cada bit del byte que es enviado al registro de desplazamiento.

Cuadro 3-3. Descripción de byte para registro de desplazamiento de salida.

bit	Descripción
0	Define la dirección del motor
1	Define si el motor está encendido
2	Selección de esclavo para comunicación SPI en memoria flash externa
3	Selección de esclavo para comunicación SPI con la pantalla
4	Estado del relevador 3
5	Estado del relevador 2
6	Estado del relevador 1
7	Sin uso

Las entradas digitales son recibidas a través de un byte extraído del registro de desplazamiento de paralelo a serial 74HC165 el cual captura el estado de las 5 botoneras y los dos interruptores manuales, esta información es revisada durante cada ciclo del microcontrolador y manejada según sea el caso. Posteriormente se actualiza la pantalla de información según sea necesario, por ejemplo la **Figura 3-26-a** muestra el estado de la pantalla en su menú principal y la **Figura 3-26-b** muestra como cambió para desplegar otra información al presionar el botón correspondiente.



Figura 3-26. Ejemplo de actualización de pantalla según interacción del usuario. (a) estado inicial, (b) estado final.

3.3.2. Programación de controlador secundaria AtTiny85

Este microcontrolador comienza configurando tres entradas digitales, una entrada analógica y una salida digital. A partir de la combinación de las tres entradas digitales se asigna un intervalo de tiempo entre pulsos que genera la salida digital establecidos en el **Cuadro 3-1**, dicho intervalo se puede ajustar de manera más fina utilizando un potenciómetro acoplado a la entrada analógica. Debido a que se cuenta con 3 señales digitales operadas por el usuario (por medio de interruptores) se posó un total de $2^3 = 8$ posibles combinaciones, de ahí se obtiene 1 para asignar el estado estático y 7 combinaciones para las velocidades mencionadas anteriormente.

3.3.3. Plataforma de monitoreo y recopilación de datos

La plataforma llamada “S.Hi.O.C Manager” tiene como principal función servir como puente de comunicación entre el microcontrolador de S.Hi.O.C y el usuario de manera remota por medio de internet, también permite presentar los datos históricos almacenados en la base de datos de manera amigable para el usuario. La **Figura 3-27** muestra la interfaz principal presentada al usuario. Entre la información que presenta se puede mencionar la temperatura, humedad relativa, fecha y configuración utilizada durante el proceso de producción.

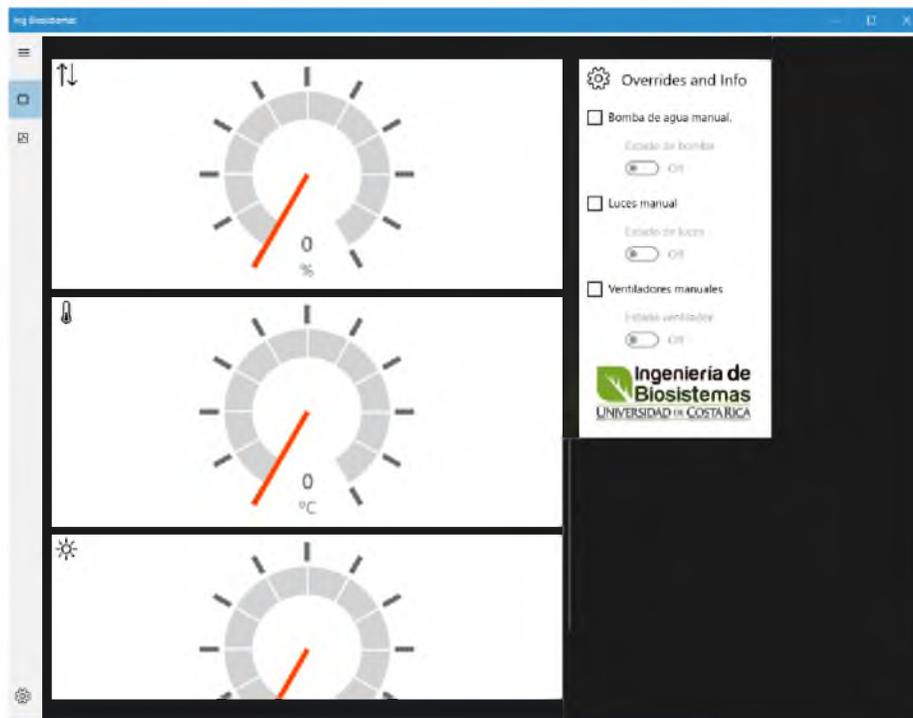


Figura 3-27. Interfaz principal del programa S.Hi.O.C manager.

La información es almacenada en una base de datos MySQL localizada en un servidor remoto, el periodo de recolección de datos se define a través de la configuración del microcontrolador. La **Figura 3-28** muestra como fluye la información entre la base de datos, el cliente remoto y el equipo S.Hi.O.C.

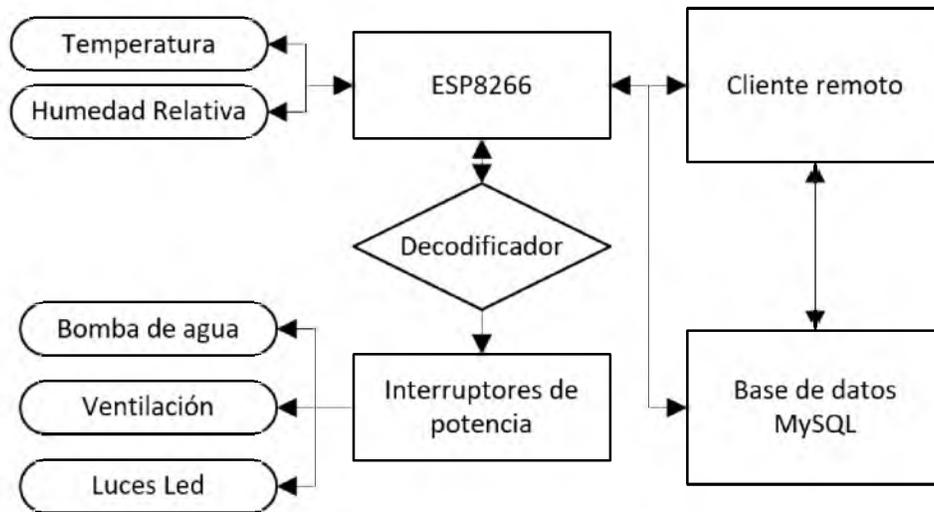


Figura 3-28. Diagrama de flujo de información digital.

3.4. Construcción y modificaciones menores

3.4.1. Construcción de marco externo y marco orbital

El proceso de construcción tardó 6 meses en concluirse y fue realizado en el Instituto Nacional de Aprendizaje (INA) por estudiantes avanzados de metalmecánica. La **Figura 3-29** muestra una de las modificaciones menores realizadas durante el proceso de construcción que corresponde específicamente a la manera en que los perfiles superiores e inferiores horizontales se unen a los perfiles verticales. Esto se debe a que se decidió cambiar el perfil superior e inferior cuadrado de 2.5cm a uno cuadrado de 5cm, equivalente al de los perfiles verticales, ya que esto facilita la nivelación de las partes en la unión. Implementar este cambio significó alterar el modo en que se realiza la conexión en las esquinas y se utilizó un par de piezas en forma de “L” que rodea el perfil vertical en su parte externa e interna.



Figura 3-29. Muestra de modificación de diseño en proceso de construcción.

El marco orbital presentó el inconveniente de que el diámetro externo de la tubería utilizada era mayor que el diámetro de la chumacera comercial que se utilizaría. Para corregir este problema se introdujo una barra cilíndrica que posee las dimensiones correctas dentro de la tubería y se alineó y soldó, posteriormente se rectificó el eje y se realizó una perforación en el centro del eje para acoplar el motor junto con un prisionero. La **Figura 3-30** muestra el marco orbital con la tubería y con el acople incorporado.



(a)



(b)

Figura 3-30. Marco orbital sin acople para motor (a) y con acople para motor (b).

El producto final fue cubierto con pintura anticorrosiva y la **Figura 3-31** muestra el resultado final de la construcción de la estructura.



(a)



(b)

Figura 3-31. Resultado final de construcción de marco externo y orbital.

3.4.2. Construcción de sistema electrónico

A partir del diseño digital se utilizó los servicios de la empresa JLCPCB ubicada en China a los cuales se les envió el diseño y se fabricó la placa, el producto se muestra en la **Figura 3-32** junto con los componentes instalados.

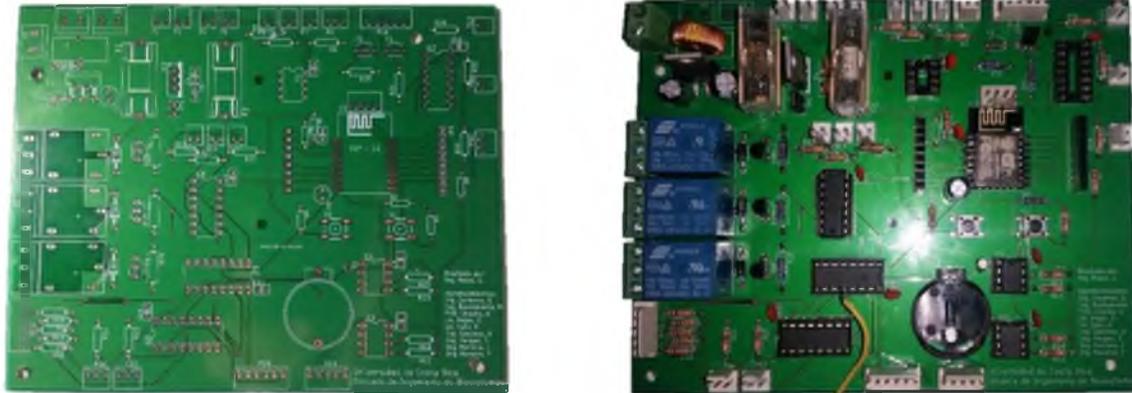


Figura 3-32. Placa madre de producción y ensamble de tarjeta madre.

Todo el sistema de control se colocó en la caja de metal previamente seleccionada y se incorporó las botoneras necesarias para que el usuario pueda interactuar con el equipo, la **Figura 3-33** muestra la instalación final del panel de control.



Figura 3-33. Presentación final del panel de control.

3.4.3. Construcción de contenedores para sustrato

Se utilizó una lámina de acero expandido para crear los contenedores con dimensiones de 10cm x 10cm x 10cm, el material seleccionado se escogía debido a que fabricar los contenedores con plástico sería inviable económicamente para las etapas de pruebas, la lámina es de bajo costo y otorga la firmeza necesaria para sujetar el sustrato en el marco del equipo. La **Figura 3-34** muestra el sustrato colocado en los contenedores.



Figura 3-34. Contenedores de lámina expandida con el sustrato incorporado.

3.4.4. Construcción del sistema de potencia mecánica

Durante la prueba preliminar del sistema se detectó la imposibilidad del motor de girar correctamente el marco orbital, esto se debió a que el sustrato no entraba a capacidad de campo en el equipo lo que causa que el sustrato en contacto con el agua almacenara un alto volumen con respecto al sustrato no expuesto, esta diferencia de volumen causa un desbalance de masa en el eje y por ende genera un torque mayor al que el motor puede otorgar. Esta condición no se consideró en el diseño ya que se contemplaba que el sustrato estaba siempre cercano a capacidad de campo y por lo tanto las diferencias de masa no serían elevadas permitiendo que el torque del motor fuera suficiente.

El fenómeno se evidenció cuando el equipo se desconectaba y se rotaba manualmente saturando todos los sustratos, en este punto el motor si podía mantener el sistema operando, no obstante debido a motivos prácticos asegurar que el sustrato está a capacidad de campo durante la instalación en el equipo es improbable por lo tanto se agregó una reductora planetaria 25:1 Nema 23, como se muestra en la **Figura 3-35**. Esta reductora permite generar hasta 75Nm con el mismo motor, sin considerar pérdidas por fricción.



Figura 3-35. Reductora 25:1 Nema 23.

Se construyó un acople para conectar la reductora al eje debido a que el eje ya poseía una entrada para el motor que es más pequeño que el de la reductora y ya que estaba instalado y rectificado se decidió que un acople era más rápido de construir comprometiendo en menor medida la estructura, la **Figura 3-36** muestra el modelo del acople y el dibujo técnico y la **Figura 3-37** muestra los elementos instalados.

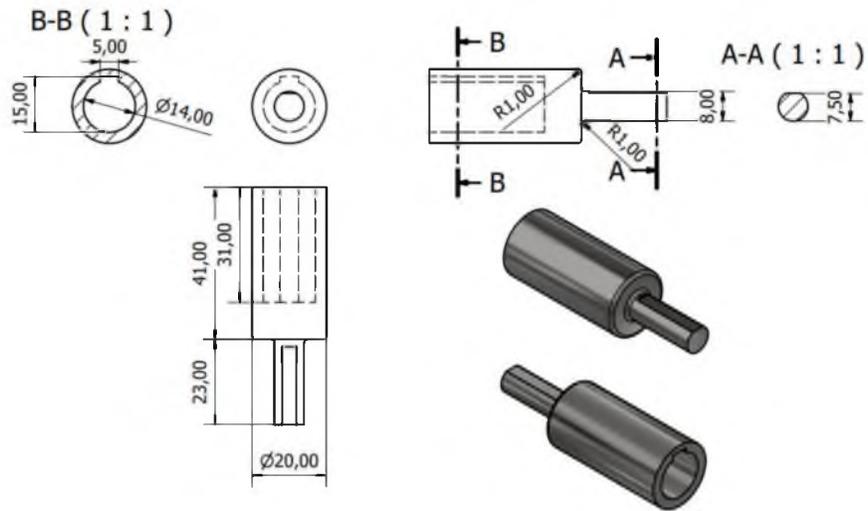


Figura 3-36. Dibujo técnico de acople, unidades en mm.



Figura 3-37. Elementos del sistema de potencia instalados.

3.4.5. Construcción del sistema de iluminación

Se diseñó un contenedor decagonal extruido que se ubica en el centro del eje y abarca toda la sección interna. En cada una de las caras se agregó un total de 90 espacios definidos y distribuidos uniformemente donde se colocan los LEDs dando la posibilidad de instalar hasta 900 LEDs de manera uniforme, el diseño contempla un modelo conformado por dos partes

idénticas que por medio de un sistema de sujeción se unen ambas partes alrededor del eje, este modelo digital se presenta en la **Figura 3-38** junto con el modelo real instalado. Para la primera prueba se instalaron un total de 200 luces LED rojas de 640nm y 100 luces azul de 470nm espaciadas uniformemente de tal manera que se asegure una distribución de 2:1 (rojo:azul). Debido a la limitante de luces LED disponible se utilizaron 100 luces de cara plana y 100 luces con lente de 90°, en el caso de la luz roja. Se conectaron las luces azules en serie, en grupos de 4 y las luces rojas se conectaron en serie en grupos de 6, estos grupos se conectan en paralelo con la fuente de poder.

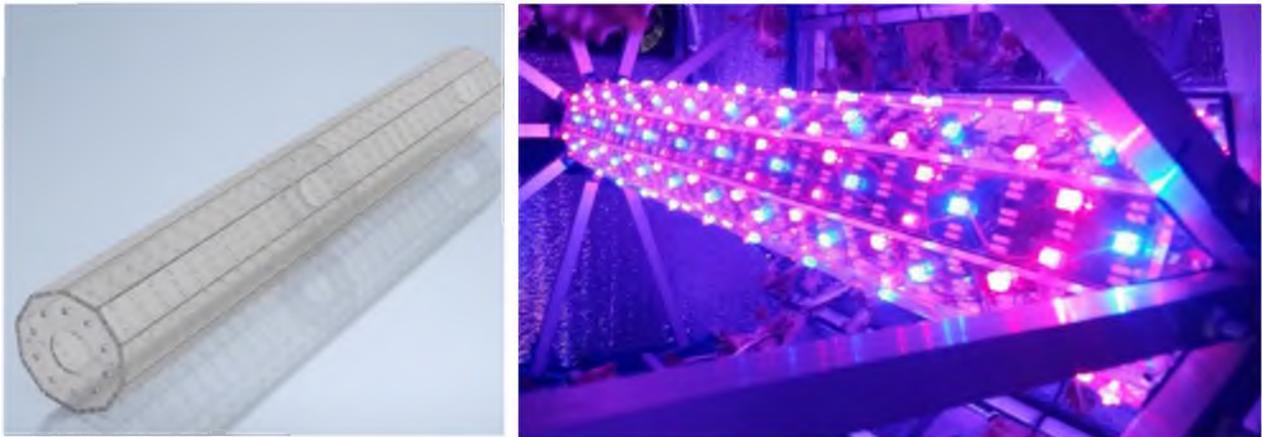


Figura 3-38. Modelo digital del sistema de iluminación y su implementación.

3.4.6. Construcción del sistema de ventilación

En la prueba preliminar se detectó que era necesario realizar cambios de aire durante la operación del sistema. Para solucionar el faltante de ventilación se decidió instalar 2 ventiladores de 12 Watts en la parte trasera del sistema que inyectan aire como se muestra en la **Figura 3-39**. Estos ventiladores están anclados a dos barras sujetas al marco estructural externo y el cableado

se maneja de manera interna conectados al tercer relé del panel de control lo que permite que los ventiladores se puedan operar con el sistema automático.



Figura 3-39. Ventiladores instalados en la parte trasera del equipo.

3.4.7. Modificaciones menores y detalles secundarios

El sistema se aisló del ambiente por medio de un aislante de doble cara cortado a medida que cubre todas las paredes del equipo, también se colocó un tanque con una bomba de agua en la parte externa del equipo en donde recircula el agua que se incorpora al equipo. Se colocó un juego de cuatro ruedas en la base de la estructura para facilitar su manipulación y transporte, la **Figura 3-40** muestra el prototipo final.

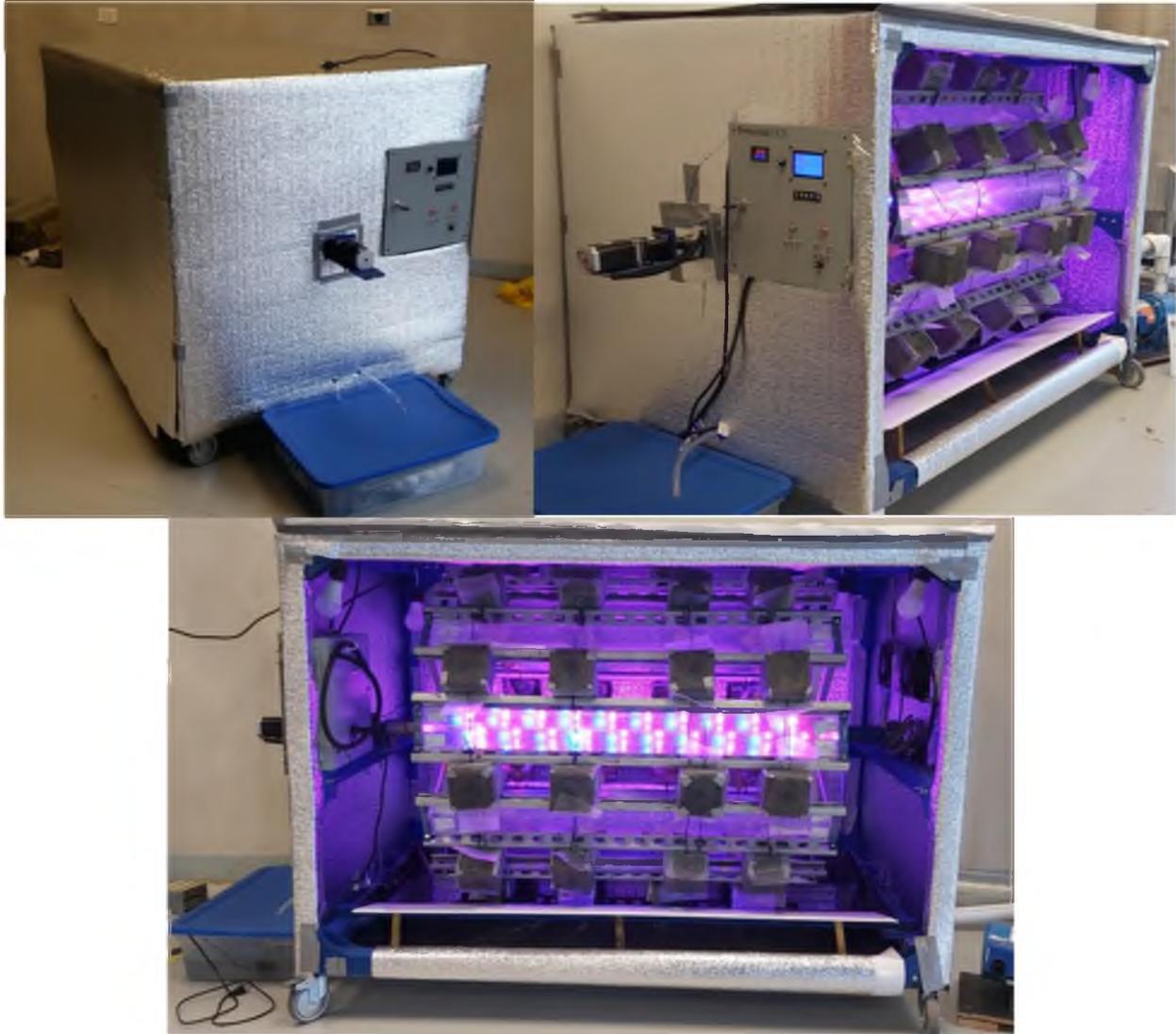


Figura 3-40. Modelo de prototipo concluido.

3.5. Rendimiento de la producción

El **Cuadro 3-4** muestra el resumen de los resultados obtenidos en masa fresca a lo largo de 30 días dentro del equipo. El día 5 se comprende como el quinto día después de la germinación y es el día en que las plantas son trasplantadas dentro del sistema hidropónico orbital.

Cuadro 3-4. Resumen de peso fresco según día dentro del sistema.

	Peso fresco día 5 (g)	Peso fresco día 20 (g)
Promedio	0,48	2,79
STD	0,14	0,73
Mediana	0,45	2,65
n	10	10

Comparando el peso promedio al día 20 con las referencias de 3,6 g y 2,9 g (ver sección 2.5.1) correspondientes al día 30 de lechugas de invernadero se determina que las lechugas del sistema hidropónico orbital están 0,8 g y 0,11 g respectivamente por debajo, sin embargo, esto lo logran 10 día antes.

A partir del rendimiento de $6,91 \text{ kg/m}^2$ se determina que el sistema hidropónico orbital debe producir al menos $10,36 \text{ kg}$ de lechuga (con un área de $1,5 \text{ m}^2$) en un periodo de 60 días. Ya que el sistema hidropónico orbital en $1,5 \text{ m}^2$ posé 100 lechugas cada una de estas deberá pesar $103,6 \text{ g}$. Esto tiene su importancia en que para 60 días se reporta que el peso fresco de la lechuga es de 295 g (44) y 245 g (50), por lo tanto para tener un rendimiento por área equivalente a la de un invernadero el sistema hidropónico tiene que producir por lo menos lechugas con una masa de entre 33% y 45% de una lechuga de invernadero.

Utilizando la masa ganada entre el día 5 y el día 20 se determina el rendimiento según la cantidad de energía utilizada por medio de la ecuación 2.5 es de $3,06 \cdot 10^{-5} \frac{\text{g}}{\text{kJ}}$. Este parámetro es importante debido a que puede ser utilizado como base para etapas de optimización del sistema hidropónico orbital.

3.6. Análisis financiero

3.6.1. Costos de materiales, construcción y operación

El **Cuadro 3-5** muestra un resumen de los costos de fabricación de cada sistema del equipo. Se puede observar que tres sistemas “Estructural”, “Potencia mecánica” e “Hidroponía” cubren el 57,64% de los costos totales.

Cuadro 3-5. Resumen de costos de fabricación.

Sistema	Costo	Porcentaje del total (%)
Potencia mecánica	\$ 208,67	19,78
Hidroponía	\$ 204,17	19,36
Mano de obra	\$ 204,10	19,35
Estructura	\$ 195,11	18,50
Extras	\$ 132,88	12,60
Iluminación	\$ 72,29	6,85
Placa madre	\$ 37,63	3,57
Total	\$ 1.054,85	100,00

El **Cuadro 3-6** muestra un resumen de los costos de operación mensual del equipo determinado a partir de la materia prima utilizada y mediciones de consumo energético. El costo de energía eléctrica que corresponde a un 30,49% es el segundo más alto; este resultado era el esperado debido a que, al ser un sistema completamente cerrado, la energía que debía ser suplida por el sol debe ser generada de manera artificialmente. Para el estudio, la depreciación se estimó utilizando un valor de rescate de \$500,00 en un periodo de 10 años.

Cuadro 3-6. Resumen de costos operativos mensuales a máxima capacidad por máquina.

Rubro	Costo	Porcentaje del total (%)
Depreciación	\$ 5,55	32,47
Electricidad	\$ 5,21	30,49
Mantenimiento	\$ 2,00	11,70
Solución mayor	\$ 1,83	10,73
Semilla	\$ 1,42	8,33
Solución menor	\$ 0,92	5,37
Agua	\$ 0,15	0,91
Total	\$ 17,09	100,00

Dentro de los costos de operación existe un rubro que se maneja de manera diferenciada ya que solo ocurre cada 4 meses que corresponde al reemplazo del sustrato, este costo corresponde a \$200,00. Este se incorpora en el flujo de caja cada 4 meses y para la estimación del precio de venta mínimo se diluye en un periodo de 4 meses dando como resultado \$ 50,00.

3.6.2. Rentabilidad y punto de quiebre del sistema

Por medio del flujo de caja se estimó que el precio de venta mínimo para que el proyecto sea financieramente indiferente (entiéndase que logra pagar la inversión inicial y genera capital suficiente para mantener la operación, $VAN=0$) es de \$1,69 por unidad de lechuga, para que el proyecto sea financieramente deseable se determinó que un precio de venta de \$1,85 por unidad , generando un valor actual neto $VAN = \$2.286,24$ con una tasa interna de retorno $TIR = 8\%$. En este escenario se recupera la inversión inicial en un periodo de 9 meses como se observa en la **Figura 3-41**.

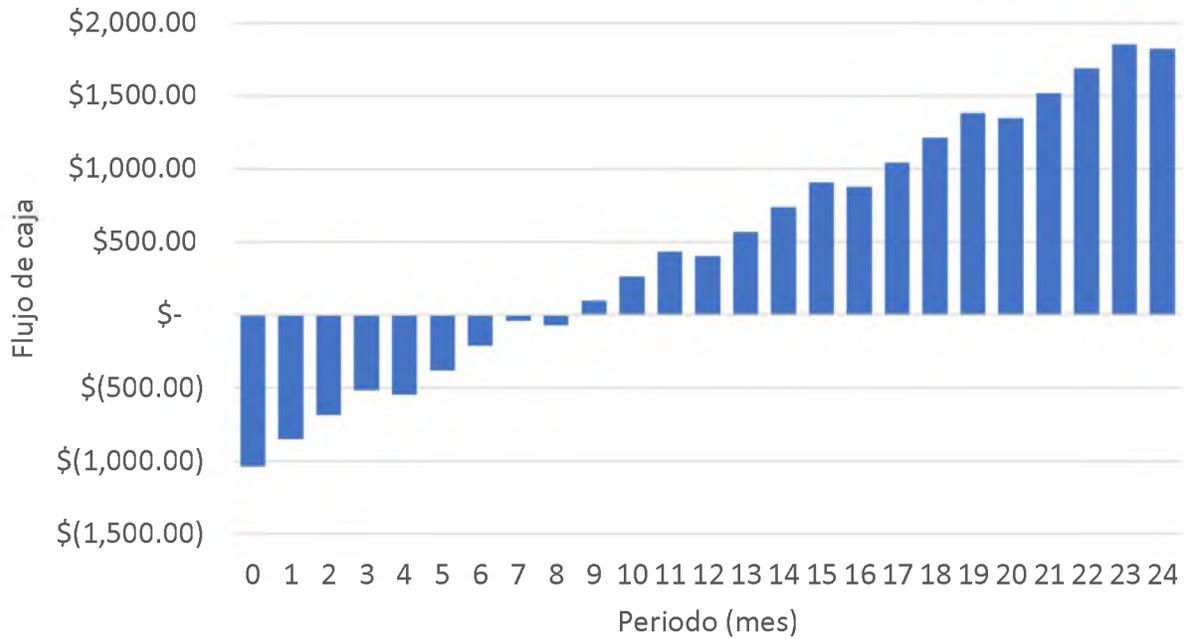


Figura 3-41. Flujo de caja para periodo de 24 meses.

3.6.3. Aspectos económicos

Existen elementos que otorgan valor agregado a las lechugas producidas por el sistema que no son contemplados en el análisis financiero pero que tienen un impacto positivo para el medio ambiente y la sociedad.

Entre estos elementos se debe mencionar la reducción en el desperdicio del alimento debido a que es manipulado en su totalidad en un ambiente controlado, en donde se otorga las condiciones óptimas para su desarrollo disminuyendo el descarte de producto debido a que no alcanza requerimientos del mercado.

Adicionalmente, la producción se ubica en zonas urbanas, por lo que los tiempos de transporte hacia el consumidor son reducidos y es más sencillo mantener la calidad e inocuidad del

alimento, reduciendo el desperdicio que ocurre en el anaquel, disminuyendo las pérdidas de la producción en el proceso de desarrollo, poscosecha, y transporte.

El entorno del sistema orbital que se crea para desarrollar las plantas que facilita la optimización del uso de recursos y de la materia prima a un nivel que no se puede alcanzar en métodos tradicionales de producción, esto conlleva a una reducción de costos operativos; pero tiene la contraparte de que el consumo energético es mayor y al ser un biosistema sintético el conocimiento necesario para operarlo y mantenerlo en su punto óptimo es elevado, requiriendo personal con alto conocimiento técnico, aunque en menor cantidad.

Desde el punto de vista de protección al ambiente, se reduce el consumo de agua, fertilizante y plaguicidas. El mayor consumo energético puede ser compensado con fuentes renovables para la generación eléctrica, como en el caso de Costa Rica que genera la mayoría de su energía eléctrica por medio de sistemas renovables (hidroeléctrica, geotérmica y eólica). Debido a que la producción se realiza en las zonas de alta demanda de alimento (ciudades) las emisiones y costos debido al transporte se ven reducidos y al no utilizar suelo como medio de crecimiento se disminuye la degradación que se daría si se utiliza un sistema convencional de siembra, esto conlleva a la posibilidad de restaurar zonas utilizadas previamente para la producción de hortalizas para conservación o para producir otros productos de mayor valor que son inviables para sistemas de producción vertical.

3.7. Implementación del sistema hidropónico orbital de manera industrial

La implementación del sistema hidropónico orbital de manera industrializada requiere de mejorar varios factores financieros y de logística que permitan asegurar un nivel de producción

aceptable y rentable. A continuación, se detalla los aspectos financieros que se deben mejorar para que la implementación del sistema hidropónico orbital sea exitosa a escala industrial.

3.7.1. Aspectos financieros a mejorar

El sustrato es uno de los factores que se deben reconsiderar antes de implementar de manera industrializada, ya que contempla un 74% de los costos de operación y contribuye a un 98% de los costos de construcción del apartado “Hidroponía” del **Cuadro 3-5**, siendo el principal elemento a optimizar. Dentro de las opciones que se pueden contemplar está en utilizar bloques de menor tamaño y por ende más baratos, comprar al por mayor o determinar sustratos alternativos que otorguen las cualidades necesarias para ser usado en el sistema hidropónico orbital.

Con respecto al “sistema de potencia mecánica” se debe indicar que, debido a la instalación de la reductora, se puede colocar un motor de menor tamaño (mitad del costo que el actual), por lo que se puede reducir el costo de este sistema en \$40,00; con este cambio también se reducen los costos energéticos. Se debe explorar alternativas de potencia como motores neumáticos o hidráulicos que pueden tener una misma fuente de potencia y ser compartida entre varios equipos.

La escalabilidad del sistema depende de la rapidez de construcción, así como de la facilidad para implementarlo a la cadena de producción ya establecida. Para facilitar este proceso se recomienda utilizar estructuras prefabricadas como la mostrada en la **Figura 3-42**, en las cuales solo se instalaría el marco orbital, eliminando así los costos de fabricación del marco externo.



Figura 3-42. Estantería modular. Fuente: Mecalux (51).

Entre otras consideraciones se debe mencionar que el sistema de ventilación sería uno para todo el cuarto de cultivo y no por máquina dando un control ambiental global, los equipos no estarían cubiertos por aislante, el sistema de alimentación de agua sería global a lo largo de todo el cuarto utilizando un sistema de irrigación que alimenta a todas las máquinas y el sistema de control trascendería a varios equipos por cada unidad de computo, ya que esto disminuye costos y no es necesario que cada máquina tenga su propia unidad de procesamiento de datos. Un microcontrolador puede procesar la información de varios equipos y controlarlos de manera simultánea.

3.7.2. Consideraciones de logística e implementación.

Dependiendo de la escala de producción, el control de los equipos se torna más complejo y la cosecha manual puede requerir de más personal el cual solo sería útil durante ese proceso. Es en este punto cuando se requiere de sistemas de automatización para la recolección de las plantas. Debido a que el sistema hidropónico se diseñó contemplando el uso de sistemas automáticos, se

puede implementar sistemas de elevadores que recojan únicamente los productos listos para ser procesados.

La **Figura 3-43** muestra una propuesta para implementar el sistema hidropónico orbital de manera industrializada, en el cual se puede observar cómo se utiliza únicamente el marco orbital y un sistema de sujeción de tarimas independiente fabricado por un tercero. En este caso se utiliza un único cuarto que almacena una gran cantidad de equipos y tiene un sistema de refrigeración industrial que gobierna sobre toda la cámara. La **Figura 3-44** muestra en detalle como los equipos son agrupado y se utilizan pasarelas metálicas para crear accesos a los colaboradores que requieren para trabajar en los equipos.

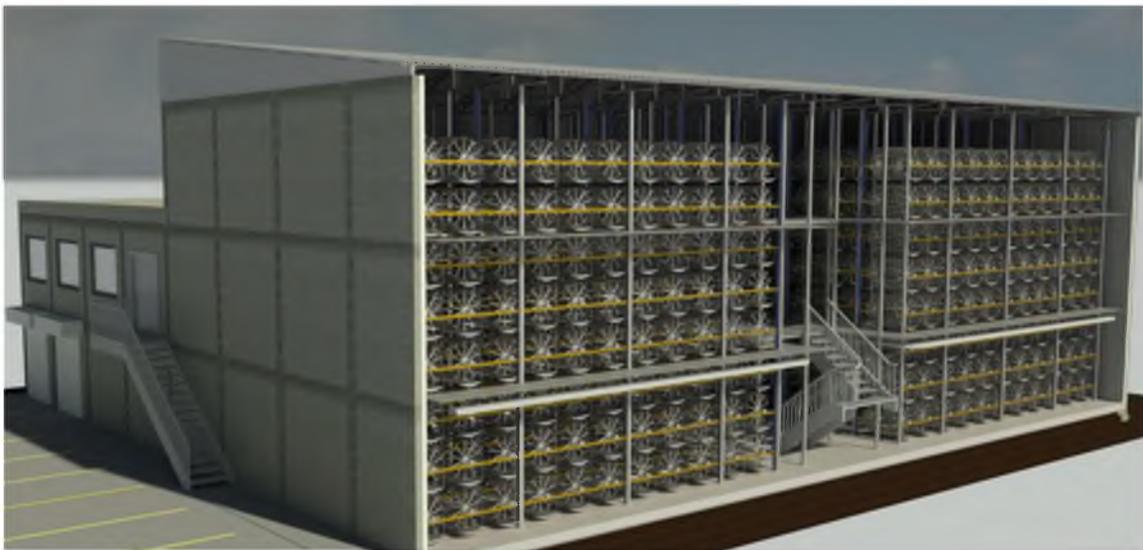


Figura 3-43. Propuesta de distribución en planta del sistema hidropónico orbital.



Figura 3-44. Detalle de propuesta de distribución en planta para el sistema hidropónico orbital.

En una operación a nivel industrial se debe implementar todo un sistema de poscosecha que se encargue de procesar los productos cultivados de manera inmediata y que no salga de las instalaciones, esto con el fin de mantener la inocuidad y calidad del producto, un ejemplo de esto se presenta en la **Figura 3-45** donde se observa que la línea de procesamiento es continua y contempla equipos para el lavado, corte y empaque de los cultivos. En esta sección también se debe contar con cámaras de refrigeración que tengan acceso a despacho por medio de camiones.



Figura 3-45. Propuesta sección de poscosecha en donde la cadena de producción se da de manera lineal en un mismo lugar.

Se debe contemplar espacios apropiados para los colaboradores como comedores, baños, vestidores, cuartos de limpieza, oficinas, laboratorio, bodegas para almacenamiento de fertilizante, cuarto de mezcla para solución hidropónica, cuarto de máquinas, oficina para control de calidad y se debe poseer un cuarto de germinación en el cual las plantas crecen dentro del sustrato que va a ser utilizado en las máquinas para que el sistema radicular se desarrolle y expanda permitiendo que la planta se sujete correctamente dentro del sistema hidropónico.

Las secciones de oficinas y comedores deben estar separadas y aisladas de la sección de producción para evitar el ingreso de contaminantes a la planta, un ejemplo de estas instalaciones se presenta en la **Figura 3-46**, donde se puede observar cómo se distribuye el espacio para el primer piso de la planta, la **Figura 3-47** muestra la distribución en el segundo piso.

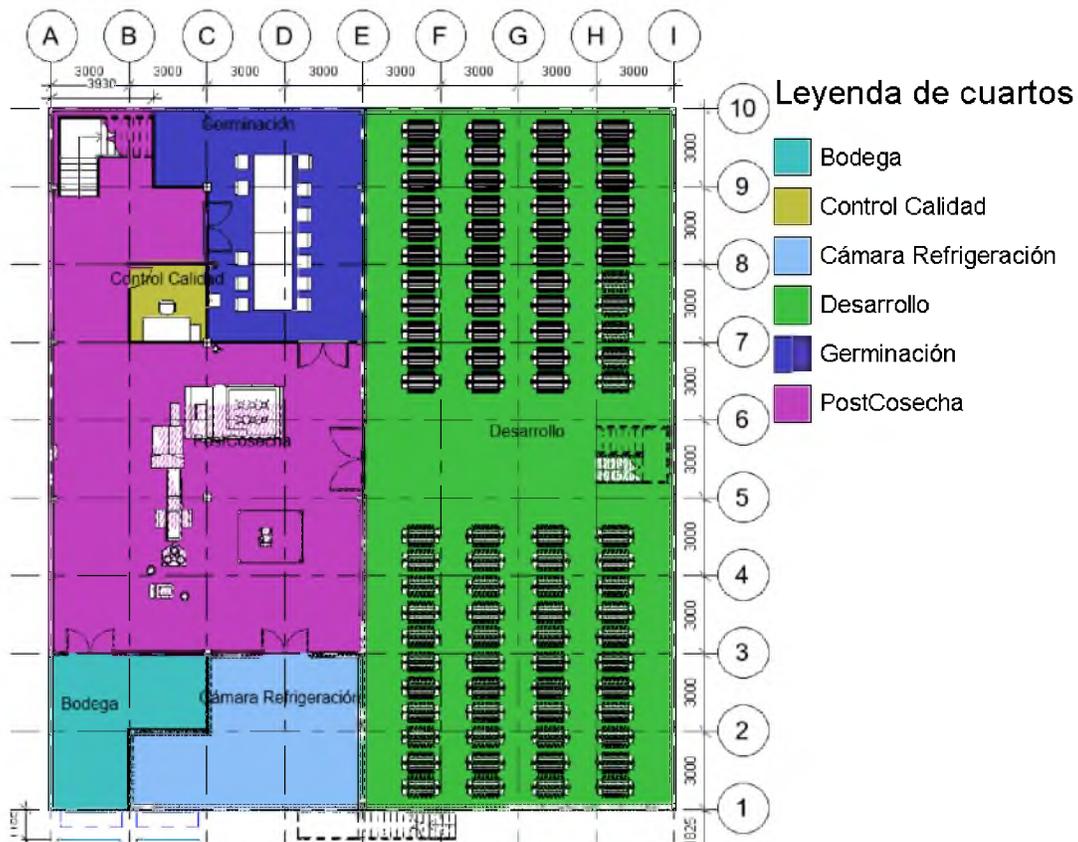


Figura 3-46. Propuesta de distribución de planta, primer piso.

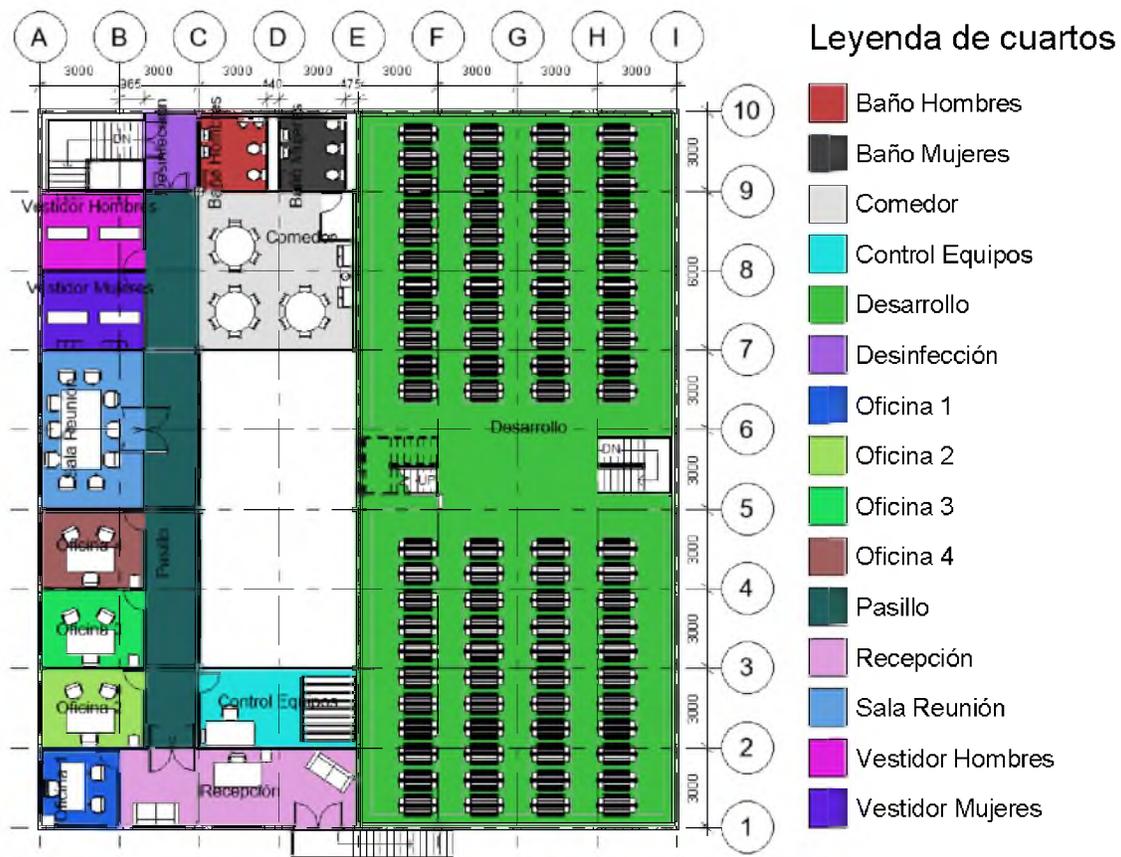


Figura 3-47. Propuesta de distribución de planta para segundo piso.

De las figuras anteriores lo más importante a destacar es como el único acceso al primer piso (excluyendo las salidas de emergencia y zonas de descarga) es por medio de la escalera ubicada en el cuadrante A,B-9,10 ya que fuerza a las personas a pasar primero por una sala de desinfección lo que crea una barrera de protección contra los contaminantes externos y a su vez todo el cuarto de desarrollo solo puede ser accesado pasando primero por el cuarto de poscosecha lo que crea una segunda barrera entre el producto en desarrollo y el ambiente externo.

La optimización de materiales en el sistema hidropónico es una forma para alargar la vida útil del equipo y facilitar su manufactura y ensamblaje. Dentro de las mejoras que se pueden realizar es cambiar la perfilera Strut por perfiles de aluminio extruido hechos a la medida que son más

livianos y por ende exigen menor potencia del motor y son menos susceptibles a la oxidación, las uniones entre el eje y los rayos del marco orbital se pueden mejorar al utilizar piezas circulares en vez de piezas compuestas lo que facilita su manufactura.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

1. Se logró diseñar un sistema hidropónico orbital con la capacidad para ser implementado de manera industrial con materiales locales y con la capacidad de ser automatizado.
2. Al día 20 las lechugas del sistema hidropónico orbital se encuentran con una masa 1 g por debajo de las lechugas de invernadero a los 30 días.
3. En los primeros 15 días se obtiene un rendimiento en función de la energía de $3,06 \times 10^{-5} \frac{g}{kJ}$
4. Con la información recolectada en la etapa de construcción se estableció que el precio del equipo es de \$ 1.054,85 y el precio de venta del producto debería ser de \$ 1,85 para que el proyecto sea financieramente deseable y un precio mínimo de \$ 1,69, sin embargo, el precio en el mercado nacional es de \$ 0,77.
5. Se determinó que es necesario buscar alternativas para el sustrato utilizado en el equipo debido al alto costo generado.
6. El equipo posee ventajas desde un punto de vista ambiental ya que aprovecha de mejor manera el agua, elimina el consumo de plaguicidas, reduce la cantidad de fertilizante y no explota el suelo.
7. Para utilizar el equipo de manera industrial es recomendable utilizar estructuras prefabricadas para el soporte de los marcos orbitales, así como explorar alternativas de potencia mecánica como sistemas hidráulicos o neumáticos.

CAPÍTULO 5. RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan las recomendaciones o temas a investigar o resolver:

- Determinar la combinación óptima entre los parámetros de sustrato, flujo de fotones fotosintéticamente activos, velocidad de rotación, ventilación, concentración de nutrientes, estado fenológico al ingreso del sistema que otorguen la mejor calidad de producto.
- Realizar experimentación con diferentes tipos de iluminación y combinaciones de longitudes de onda para determinar el efecto de la iluminación en el sistema hidropónico orbital sobre las plantas.
- Incorporar un sistema de control basado en algoritmos de controlador PID (proporcional-integral-derivativo) con el fin de optimizar la forma en que el sistema de automatización controla las variables ambientales.
- Implementar un sistema de enfriamiento que tenga la capacidad de mantener una temperatura deseada o alterarla de manera controlada, ya que los ventiladores instalados solo permiten alcanzar una temperatura equivalente a la temperatura externa.
- Realizar investigación con otro tipo de hortalizas para determinar plantas que se adapten con facilidad al sistema hidropónico orbital.
- Se recomienda diseñar un perfil extruido a base de aluminio que reduzca el peso del marco orbital y que a su vez permite un desplazamiento sencillo de los contenedores sin comprometer la estabilidad estructural con el fin de reducir el consumo de energía necesario para rotar el marco orbital.

- Refinar los contenedores de plantas para generar un prototipo funcional acorde al sistema de rieles utilizados en el equipo, que sean de bajo costos, reutilizables y de fácil mantenimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Shiina T, Hosokawa D, Roy P, Orikasa T, Nakamura N, Thammawong M. Life cycle inventory analysis of leafy vegetables grown in two types of plant factories. *Acta Hortic.* 2011;919(July 2014):115–22.
2. Alexandratos N, Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050. *Land use policy.* 2012;20(4):375.
3. United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. World Population Prospects The 2017 Revision Key Findings and Advance Tables. *World Popul Prospect 2017* [Internet]. 2017;1–46. Available from: https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf
4. UNDESA. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision [Internet]. 2018. Available from: <https://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>
5. FAO. How to Feed the World in 2050. Insights from an Expert Meet FAO [Internet]. 2009;2050(1):1–35. Available from: <http://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-forum/en/>
6. FAO and ITPS. Status of the World's Soil Resources (SWSR) - Main Report. [Internet]. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. 2015. 608 p. Available from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01241064/>
7. Mullan D. Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems. *Catena* [Internet]. 2013;109:234–46. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.007>
8. FAO. Global food losses and food waste - Extent, causes and prevention. Rome; 2011.
9. CEPAL. Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe . ONU [Internet]. 2018;35. Available from: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/10/S1700334_es.pdf

10. Anpo M, Fukuda H, Wada T. *Plant Factories With Artificial Light. Adapting to Environmental Disruption and Clues to*. Amsterdam: Elsevier; 2019.
11. Graff GJ. *Skyfarming*. University of Waterloo; 2011.
12. German Aerospace Center (DLR). *Vertical Farm 2.0 Designing an Economically Feasible Vertical Farm – A combined European Endeavor for Sustainable Urban Agriculture*. 2015;
13. Kozai T, Niu G, Takagaki M. *Plant Factory. An indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*. London: Elsevier B.V.; 2015. 432 p.
14. Kozai T. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. *Proc Japan Acad Ser B*. 2013;89(10):447–61.
15. Ueno M, Kawamitsu Y. Design of a plant factory suitable for Okinawa. *Eng Appl Sci Res*. 2017;44(September):182–8.
16. Anpo M, Fukuda H, Wada T. *Plant factory using artificial light: adapting to environmental disruption and clues to agricultural innovation*. Amsterdam: Elsevier; 2018.
17. Resh HM. *Hydroponics for the Home Grower*. 2015. 319 p.
18. Pennisi G, Blasioli S, Cellini A, Maia L, Crepaldi A, Braschi I, et al. Unraveling the Role of Red:Blue LED Lights on Resource Use Efficiency and Nutritional Properties of Indoor Grown Sweet Basil. *Front Plant Sci* [Internet]. 2019 Mar 13;10(March). Available from: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2019.00305/full>
19. Yan Z, He D, Niu G, Zhai H. Evaluation of growth and quality of hydroponic lettuce at harvest as affected by the light intensity, photoperiod and light quality at seedling stage. *Sci Hortic (Amsterdam)* [Internet]. 2019 Apr;248(August 2018):138–44. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304423819300020>
20. Li J, Zhang G. *Light Emitting Diodes. Materials, Processes, Devices and Applications. Volumen 4*. Switzerland: Springer; 2019.

21. Xu Y, Chang Y, Chen G, Lin H. The research on LED supplementary lighting system for plants. *Optik (Stuttg)* [Internet]. 2016;127(18):7193–201. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.05.056>
22. Kane R, Sell H. *Revolution in Lamps. A Chronicle of 50 years of progress.* Segunda ed. Lilburn, GA: The Fairmont Press, Inc.; 2001.
23. Shen YZ, Guo SS, Ai WD, Tang YK. Effects of illuminants and illumination time on lettuce growth , yield and nutritional quality in a controlled environment. *Life Sci Sp Res.* 2014;2:38–42.
24. Ohyama K, Manabe K, Omura Y, Kozai T, Kubota C. Potential use of a 24-hour photoperiod (continuous light) with alternating air temperature for production of tomato plug transplants in a closed system. *HortScience.* 2005;40(2):374–7.
25. Asao T. *Hydroponics - A Standard Methodology for Plant Biological Researches.* Hydroponics - A Standard Methodology for Plant Biological Researches. Croatia: InTech; 2012.
26. Jones B. *Hydroponics : a practical guide for the soilless grower.* 2nd ed. Florida: CRC Press; 2005.
27. Domingues DS, Takahashi HW, Camara CAP, Nixdorf SL. Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Comput Electron Agric* [Internet]. 2012;84:53–61. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.006>
28. Genuncio G da C, Gomes M, Ferrari AC, Majerowicz N, Zonta E. Hydroponic lettuce production in different concentrations and flow rates of nutrient solution. *Hortic Bras* [Internet]. 2012 Sep;30(3):526–30. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-05362012000300028&lng=en&tlng=en
29. Poorter H. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. *Vegetatio.* 1993;104–105(1):77–97.

30. Kirchherr J, Reike D, Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour Conserv Recycl* [Internet]. 2017 Dec;127:221–32. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344917302835>
31. Toop TA, Ward S, Oldfield T, Hull M, Kirby ME, Theodorou MK. AgroCycle – developing a circular economy in agriculture. *Energy Procedia* [Internet]. 2017 Sep;123(1):76–80. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217328436>
32. Jun H, Xiang H. Development of Circular Economy Is A Fundamental Way to Achieve Agriculture Sustainable Development in China. *Energy Procedia* [Internet]. 2011;5:1530–4. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.262>
33. Graamans L, Baeza E, van den Dobbelsteen A, Tsafaras I, Stanghellini C. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agric Syst* [Internet]. 2018 Feb;160(November):31–43. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003>
34. Zhang R, Liu T, Ma J. Plant factory: A new method for reducing carbon emissions. In: *AIP Conference Proceedings* [Internet]. 2017. p. 040016. Available from: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4977288>
35. Kowollik M. Costa Rica carbono neutral : un país pequeño con metas grandes. *FES Costa Rica* [Internet]. 2014;8:6. Available from: <http://library.fes.de/pdf-files/bueros/fesamcentral/11122.pdf>
36. Gobierno de Costa Rica, MINAE. Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional de Costa Rica [Internet]. San José, Costa Rica; 2015. p. 1–19. Available from: http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Costa_Rica_First/INDC_Costa_Rica_Version_2_0_final_ES.pdf
37. Abarca S. Las emisiones del sector agropecuario y la Agricultura, Forestales y Otros Usos de la Tierra (AFOLU) de los inventarios nacionales de Gases Efecto Invernadero (GEI). *INTA* [Internet]. 2016;7. Available from: http://www.sepsa.go.cr/PRODUCTOS/ALERTA_AGROCLIMATICO/docs/2016-07/AFOLU_vrs_SAG.pdf

38. Rojas P. Costa Rica acumula 300 días con electricidad 100% renovable. crhoy [Internet]. 2017; Available from: <https://www.crhoy.com/ambiente/costa-rica-acumula-300-dias-con-electricidad-100-renovable/>
39. Kumar KS, Tiwari KN, Jha MK. Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions : A review. 2009;41:1269–75.
40. European Comision. The Paris Protocol – A blueprint for tackling global climate change beyond 2020 [Internet]. Bruselas; 2015. Available from: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/international/paris_protocol/docs/com_2015_81_en.pdf
41. UNEP FI. Principles for responsible banking [Internet]. Châtelaine, Geneva: UNEP FI; 2017. Available from: <https://www.unepfi.org/wordpress/wp-content/uploads/2019/05/PRB-Consultation-Document-11-Web-1.pdf>
42. Dannehl D, Suhl J, Ulrichs C, Schmidt U. Evaluation of substitutes for rock wool as growing substrate for hydroponic tomato production. J Appl Bot Food Qual. 2015;88:68–77.
43. Autodesk. Inventor Overview [Internet]. 2019 [cited 2019 Jun 6]. Available from: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview#>
44. Gent MPN. Composition of hydroponic lettuce: Effect of time of day, plant size, and season. J Sci Food Agric. 2012;92(3):542–50.
45. Llanos HB, Gutiérrez CR del C, García M. Análisis De Crecimiento Funcional , Acumulación De Biomasa Y Translocación De Materia Seca De Ocho Hortalizas Cultivadas En Invernadero. Rev Investig e Innov Agropecu y Recur Nat. 2014;2(1):7–118.
46. Carrillo GM, Herrera AL, Evelia L, Bernal P, Flores ML, Jesús J, et al. Evaluación técnica y financiera del cultivo de lechuga en invernadero, como alternativa para invierno. Scielo [Internet]. 2015;33:10. Available from: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v33n3/2395-8030-tl-33-03-00251.pdf>
47. Maboko MM, Du Plooy CP. Effect of plant spacing on growth and yield of lettuce

- (*lactuca sativa* L.) in a soilless production system. *South African J Plant Soil*. 2009;26(3):195–8.
48. TecnoFijaciones. Catálogo Strut [Internet]. 2019 [cited 2019 Jun 16]. Available from: <https://tecnofijacionescr.com/tienda/canal-strut-perforado/canal-strut/canal-strut-perforado-1-5-8x13-16-3-mts-ps560eh-powerstrut/>
 49. Beer FP, Johnston ER, DeWolf JT, Mazurek DF. *Mecánica De Materiales* 5 Edición. 2009;736.
 50. Richmond F. Validación de variedades de lechuga tipo americana en sistema hidropónico: II. Boletín del programa Nac Sect Prod agrícola bajo Ambient protegidos [Internet]. 2015;9(50):1–11. Available from: [http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinAP9\(52\).pdf](http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinAP9(52).pdf)
 51. Mecalux. Soluciones de almacenaje. [Internet]. 2019 [cited 2019 Jun 17]. Available from: www.mecalux.com.mx