



**Automatización de un sistema de riego y climatización para una granja hidropónica de mediana escala de la empresa “Aeroponía del Valle”**

Campaña Torres, David Xerome y Maldonado Moreno, Cristina Isabel

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio PhD.

Sangolquí, 15 de febrero del 2023



CERTIFICADO DE ANÁLISIS  
magister

# Aeroponía el Valle-Campaña- Maldonado-17022023

2% Similitudes  
 < 1% Texto entre comillas  
 < 1% similitudes entre comillas  
 < 1% idioma no reconocido

Nombre del documento: Aeroponía el Valle-Campaña-  
Maldonado-17022023.pdf  
 ID del documento: 767a75d90f99b852b50b74251f6b11ebd5e949fa  
 Tamaño del documento original: 1,26 Mo

Depositante: DAVID CESAR LOZA MATOVELLE  
 Fecha de depósito: 22/2/2023  
 Tipo de carga: Interface  
 fecha de fin de análisis: 22/2/2023

Número de palabras: 27.501  
 Número de caracteres: 164.509

Ubicación de las similitudes en el documento:



## Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	<a href="https://doi.org/10.1101/2023.02.17.531029">idoc.pub   Hidroponía [w1pkky29]</a> <a href="https://doi.org/10.1101/2023.02.17.531029">https://doi.org/10.1101/2023.02.17.531029</a> 1 fuentes similar	< 1%		Palabras idénticas: + 16 (00 palabras)
2	<a href="https://info.informacion-sistemas-de-riego-pdf-free.html">info.info   Revision Sistemas de Riego - VSPUBID</a> <a href="https://info.informacion-sistemas-de-riego-pdf-free.html">https://info.informacion-sistemas-de-riego-pdf-free.html</a> 1 fuentes similar	< 1%		Palabras idénticas: + 16 (51 palabras)
3	<a href="https://www.electroindia.es/producto/modulo-neta-4-canales/">www.electroindia.es   MÓDULO NETA 4 Canales - AV Electromex</a> <a href="https://www.electroindia.es/producto/modulo-neta-4-canales/">https://www.electroindia.es/producto/modulo-neta-4-canales/</a> 4 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: + 16 (52 palabras)
4	<a href="https://repositorio.uba.edu.ar/handle/document/17345678910119/W04_ML_D07_TRABAJO_GRAD_O.pdf?">repositorio.uba.edu.ar   Implementación de un sistema automatizado para cultivo a...</a> <a href="https://repositorio.uba.edu.ar/handle/document/17345678910119/W04_ML_D07_TRABAJO_GRAD_O.pdf?">https://repositorio.uba.edu.ar/handle/document/17345678910119/W04_ML_D07_TRABAJO_GRAD_O.pdf?</a>	< 1%		Palabras idénticas: + 16 (47 palabras)
5	<a href="http://www.emi.es/revista/Electroindustria/Controles/Controles-eficientes-para-la-industria-l...">www.emi.es   Revista Electroindustria - Controladores eficientes para la industria In...</a> <a href="http://www.emi.es/revista/Electroindustria/Controles/Controles-eficientes-para-la-industria-l...">http://www.emi.es/revista/Electroindustria/Controles/Controles-eficientes-para-la-industria-l...</a>	< 1%		Palabras idénticas: + 16 (41 palabras)

## Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	Documento de otro usuario #300cf El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: + 16 (38 palabras)
2	<a href="https://www.fundacionaque.org/cuanta-agua-se-necesita-para-producir-alimentos/">www.fundacionaque.org   Cuánta agua se necesita para producir alimentos - Fund...</a> <a href="https://www.fundacionaque.org/cuanta-agua-se-necesita-para-producir-alimentos/">https://www.fundacionaque.org/cuanta-agua-se-necesita-para-producir-alimentos/</a>	< 1%		Palabras idénticas: + 16 (25 palabras)
3	<a href="https://www.elsoldemexico.com.mx/ganaderia-industrial/¿alimentar-o-contaminar?imp...">www.elsoldemexico.com.mx   Ganadería Industrial: ¿alimentar o contaminar? Impa...</a> <a href="https://www.elsoldemexico.com.mx/ganaderia-industrial/¿alimentar-o-contaminar?imp...">https://www.elsoldemexico.com.mx/ganaderia-industrial/¿alimentar-o-contaminar?imp...</a>	< 1%		Palabras idénticas: + 16 (12 palabras)
4	<a href="http://plantasdelinteriores.com/que-es-la-hidroponia-de-flujo-y-reflujo/">plantasdelinteriores.com   ¿Qué es la hidroponía de flujo y reflujo?</a> <a href="http://plantasdelinteriores.com/que-es-la-hidroponia-de-flujo-y-reflujo/">http://plantasdelinteriores.com/que-es-la-hidroponia-de-flujo-y-reflujo/</a>	< 1%		Palabras idénticas: + 16 (11 palabras)
5	<a href="http://repositorio.espe.edu.ec/handle/document/21000259005/1-ESPISO-001151.pdf?">repositorio.espe.edu.ec   Evaluación de soluciones nutritivas para sistemas aeropón...</a> <a href="http://repositorio.espe.edu.ec/handle/document/21000259005/1-ESPISO-001151.pdf?">http://repositorio.espe.edu.ec/handle/document/21000259005/1-ESPISO-001151.pdf?</a>	< 1%		Palabras idénticas: + 16 (14 palabras)

**Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)** Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- <https://www.honestseedco.com>
- <https://www.espa.com/>
- <http://pump-teo.com/>
- <https://www.netafm.com/>
- <https://www.euro-rain.es/>



Escanea este código QR para  
 obtener más información por  
 GERRAÚ VIZCINO LARA  
 PADILLA



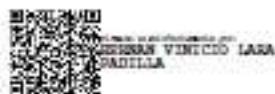
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

### Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **Automatización de un sistema de riego y climatización para una granja hidropónica de mediana escala de la empresa "Aeroponía del Valle"** fue realizado por los señores **Campaña Torres, David Xerome y Maldonado Moreno, Cristina Isabel**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de febrero del 2023



.....  
Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio PhD.

C. C. 0603247362



**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica**

**Carrera de Ingeniería Mecatrónica**

**Responsabilidad de Autoría**

Nosotros, **Campaña Torres, David Xerome y Maldonado Moreno, Cristina Isabel**, con cédula/cédulas de ciudadanía N° **1104139686** y **1400583199**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Automatización de un sistema de riego y climatización para una granja hidropónica de mediana escala de la empresa "Aeroponía del Valle"** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 16 de febrero del 2023

**Campaña Torres David Xerome**

C. C. 1104139686

**Maldonado Moreno Cristina Isabel**

C. C. 1400583199



**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica**

**Carrera de Ingeniería Mecatrónica**

**Autorización de Publicación**

Nosotros, **Campaña Torres, David Xerome** y **Maldonado Moreno, Cristina Isabel**, con cédula/cédulas de ciudadanía N° **1104139686** y **1400583199**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Automatización de un sistema de riego y climatización para una granja hidropónica de mediana escala de la empresa "Aeroponía del Valle"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 16 de febrero del 2023

**Campaña Torres David Xerome**

C. C. 1104139686

**Maldonado Moreno Cristina Isabel**

C. C. 1400583199

## Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres por ser la luz que me guía, a mi familia por siempre apoyarme, y a mis amigos que me han acompañado en este largo camino. Gracias por alentarme en los momentos difíciles y celebrar los triunfos, sin importar lo pequeños que fueran.

David Campaña T.

Le dedico esta tesis a mi madre, mi mayor fuente de inspiración y mi ejemplo a seguir siempre, por ser una mujer excepcional, mi apoyo incondicional y la mejor madre del mundo.

Cristina Maldonado Moreno

"Siempre parece imposible hasta que se hace".

N. Mandela

## **Agradecimiento**

Durante nuestra vida es importante detenerse un momento, mirar atrás y evaluar.

Distinguir en nuestro espíritu el valor de la gratitud, entender que vivimos en comunidad y que esa es la única forma de lograr los objetivos y metas que, como individuos, nos trazamos.

Al culminar este camino de estudio y preparación no puedo ni debo dejar de agradecer a Dios y a mi familia: abuelitos, tíos y mis padres por la motivación, el apoyo incondicional y el impulso para seguir aprendiendo.

De igual manera, agradezco a mi compañera, quien ha estado conmigo en cada paso y con quien hemos compartido un largo camino que estamos por culminar, para empezar uno nuevo.

David Campaña T.

Un agradecimiento a mi familia, quienes de una manera u otra influyeron en mí y me brindaron su apoyo para culminar este camino. A mis padres y hermanos por sus palabras de aliento y por inspirarme a ser más y dar más siempre. Y a mi segunda familia, Campaña Torres, por acogerme como parte de su familia y brindarme su apoyo, cuidado y cariño en los buenos y malos momentos.

Un agradecimiento para mis amigos y compañeros con los que he compartido a lo largo de esta carrera, porque ellos fueron quienes me tendieron la mano en cada caída, con quienes compartimos momentos de frustración y alegría, y me impulsaron a llegar al lugar en el que estoy ahora.

Un agradecimiento a mis profesores, porque cada uno me enseñó algo sobre la carrera, pero también sobre mí misma, y puso a prueba mis límites para convertirme en mi mejor versión. Y finalmente, un agradecimiento a David Campaña, mi compañero de tesis y compañero de vida, por su paciencia, su fortaleza y su amor. Gracias por compartir este camino conmigo, anhelo poder seguir cosechando más éxitos juntos.

Cristina Maldonado Moreno



**Índice de contenido**

Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Resumen .....	19
Abstract.....	20
Glosario .....	21
Capítulo 1 Introducción .....	23
Antecedentes .....	23
Planteamiento del Problema.....	29
Justificación e Importancia.....	32
Objetivos .....	35
Objetivo General.....	35
Objetivos Específicos.....	35
Alcance .....	36
Capítulo 2 Fundamentación Teórica.....	38
Agricultura Hidropónica .....	38
Componentes de un Sistema de Riego.....	38
Técnicas de Hidroponía .....	40
Ventajas y Desventajas.....	43
Requerimientos del Sistema de Cultivo Hidropónico.....	44
Cultivo de Lechugas.....	45
Requerimientos de Desarrollo.....	45

Etapas Fenológicas de la Planta de Lechuga .....	46
Plagas, Enfermedades y Fisiopatías .....	46
Nutrientes Necesarios .....	48
Dispositivos de Control .....	49
PLC Controllino .....	50
Shield CNC .....	51
ESP8266 NodeMCU .....	52
Internet de las Cosas (IoT) .....	53
Protocolo IoT .....	54
Entornos de Desarrollo .....	54
Plataformas IoT .....	55
Capítulo 3 Metodología .....	56
Características del Invernadero Hidropónico .....	56
Localización del Invernadero .....	56
Características del Invernadero .....	57
Tipo de Cultivo a Realizarse .....	58
Requerimientos del Sistema .....	59
Diseño e Implementación del Sistema .....	60
Subsistema Hidráulico .....	60
Subsistema Eléctrico .....	85
Subsistema de Control .....	112

Capítulo 4 Experimentación para Calibración del Sistema .....	130
Tiempos de Climatización.....	136
Volumen de Soluciones Nutritivas .....	143
Compensación de Ácido.....	150
Capítulo 5 Resultados y Discusión.....	156
Pruebas de Funcionamiento.....	156
Resultados .....	157
Desarrollo de las Lechugas.....	157
Temperatura del Invernadero.....	163
Niveles de pH y EC .....	164
Rendimiento del Cultivo .....	167
Consumo de Agua .....	168
Conclusiones y Recomendaciones.....	170
Bibliografía.....	174
Apéndices .....	178

### Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Niveles de funcionamiento de la granja hidropónica</i> .....	31
<b>Tabla 2</b> <i>Comparación entre un PLC Canaduiño y PLC Controllino MEGA</i> .....	88
<b>Tabla 3</b> <i>Tabla de asignación de recursos</i> .....	94
<b>Tabla 4</b> <i>Voltajes y corrientes de los elementos del sistema</i> .....	101
<b>Tabla 5</b> <i>Comparación de plataformas para base de datos</i> .....	124
<b>Tabla 6</b> <i>Parámetros y variables de funcionamiento del invernadero</i> .....	130
<b>Tabla 7</b> <i>Factores y niveles para experimento de Tiempos de climatización</i> .....	138
<b>Tabla 8</b> <i>Pruebas para determinar tiempo de climatización</i> .....	138
<b>Tabla 9</b> <i>Factores y niveles para experimento de Volumen de soluciones nutritivas</i> .....	145
<b>Tabla 10</b> <i>Pruebas para determinar volumen de solución nutritiva</i> .....	145
<b>Tabla 11</b> <i>Nivel de pH de acuerdo a los porcentajes de volumen de solución A y ácido</i> .....	151
<b>Tabla 12</b> <i>Pruebas para compensación de ácido de los semilleros</i> .....	153
<b>Tabla 13</b> <i>Datos de lechugas en etapa de semillero</i> .....	157
<b>Tabla 14</b> <i>Datos de lechugas en etapa de crecimiento – Sistema aeropónico</i> .....	158
<b>Tabla 15</b> <i>Datos de lechugas en etapa de crecimiento – Método tradicional</i> .....	159
<b>Tabla 16</b> <i>Peso de lechugas obtenidas por sistema aeropónico vs. método tradicional</i> .....	161

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Técnicas hidropónicas</i> .....	24
<b>Figura 2</b> <i>Técnica hidropónica de flujo y reflujo</i> .....	25
<b>Figura 3</b> <i>Técnica de aeroponía</i> .....	26
<b>Figura 4</b> <i>Diagrama esquemático de la granja hidropónica de la empresa “Aeroponía del Valle”</i> .....	28
<b>Figura 5</b> <i>Semilleros hidropónicos para cultivo de plántulas</i> .....	29
<b>Figura 6</b> <i>Torres aeropónicas para etapa de engorde</i> .....	29
<b>Figura 7</b> <i>Bandejas de cultivo para microgreens</i> .....	30
<b>Figura 8</b> <i>Esquema general del proyecto</i> .....	34
<b>Figura 9</b> <i>Sistema NFT</i> .....	41
<b>Figura 10</b> <i>Sistema de flujo y reflujo</i> .....	41
<b>Figura 11</b> <i>Técnica de raíz flotante</i> .....	42
<b>Figura 12</b> <i>Técnica aeropónica</i> .....	43
<b>Figura 13</b> <i>Ventajas y desventajas entre sistemas hidropónicos</i> .....	44
<b>Figura 14</b> <i>Nivel de nutrientes recomendados para lechuga hidropónica</i> .....	48
<b>Figura 15</b> <i>Rango aceptable de pH para el crecimiento de lechugas</i> .....	49
<b>Figura 16</b> <i>Controllino MEGA</i> .....	50
<b>Figura 17</b> <i>Arduino SHIELD CNC</i> .....	51
<b>Figura 18</b> <i>ESP8266 NodeMCU</i> .....	53
<b>Figura 19</b> <i>Ubicación geográfica del invernadero de la empresa “Aeroponía del Valle”</i> .....	56
<b>Figura 20</b> <i>Esquema del invernadero de la empresa “Aeroponía del Valle”</i> .....	57
<b>Figura 21</b> <i>Invernadero de la empresa “Aeroponía del Valle”</i> .....	58
<b>Figura 22</b> <i>Lechuga tipo mantecosa o Buttercrunch</i> .....	59
<b>Figura 23</b> <i>Diagrama P&amp;ID de la línea de alimentación del sistema previo a la automatización</i> .....	61
<b>Figura 24</b> <i>Diagrama P&amp;ID de la línea de riego del sistema previo a la automatización</i> .....	62

<b>Figura 25</b> Bomba ESPA Prisma 35N.....	62
<b>Figura 26</b> Bomba LEO APm37.....	63
<b>Figura 27</b> Válvula Aquanet PLUS.....	63
<b>Figura 28</b> Válvula K-Rain 7001.....	64
<b>Figura 29</b> Válvula Cepex CPV.....	64
<b>Figura 30</b> Aspersor TEFEN de spray cónico sin goteo.....	65
<b>Figura 31</b> Aspersor Netafim CoolNet Pro.....	65
<b>Figura 32</b> Línea de riego C.....	68
<b>Figura 33</b> Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de riego - C).....	68
<b>Figura 34</b> Línea de impulsión y succión de la bomba para riego C.....	69
<b>Figura 35</b> Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de impulsión de bomba - C).....	69
<b>Figura 36</b> Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de succión de bomba - C).....	70
<b>Figura 37</b> Línea de riego B.....	71
<b>Figura 38</b> Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de riego - B).....	71
<b>Figura 39</b> Línea de impulsión y succión de la bomba para riego B.....	72
<b>Figura 40</b> Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de impulsión de bomba - B).....	72
<b>Figura 41</b> Cálculos de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de succión de bomba - B).....	73
<b>Figura 42</b> Línea de riego M.....	74
<b>Figura 43</b> Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de riego - M).....	74
<b>Figura 44</b> Línea de impulsión y succión de la bomba para riego M.....	75
<b>Figura 45</b> Cálculos de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de impulsión de bomba - M).....	75

<b>Figura 46</b> <i>Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de succión de bomba - M)</i> .....	76
<b>Figura 47</b> <i>Línea de riego D</i> .....	76
<b>Figura 48</b> <i>Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de riego - D)</i> .....	77
<b>Figura 49</b> <i>Línea de impulsión y succión de la bomba para riego D</i> .....	77
<b>Figura 50</b> <i>Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de impulsión de bomba - D)</i> .....	78
<b>Figura 51</b> <i>Pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de succión de bomba - D)</i> .....	78
<b>Figura 52</b> <i>Resumen de pérdidas de presión obtenidas</i> .....	79
<b>Figura 53</b> <i>Curva de rendimiento de la bomba ESPA Prisma 35N</i> .....	80
<b>Figura 54</b> <i>Características de la bomba ESPA Prisma 35N</i> .....	80
<b>Figura 55</b> <i>Curva de rendimiento de la bomba LEO APm</i> .....	81
<b>Figura 56</b> <i>Hidrotank 01 Pentax</i> .....	82
<b>Figura 57</b> <i>Ubicación de la válvula de purga</i> .....	83
<b>Figura 58</b> <i>Válvula de compuerta</i> .....	84
<b>Figura 59</b> <i>Características de bomba Foras JA 100 M</i> .....	84
<b>Figura 60</b> <i>Bomba peristáltica Jihpump MN1</i> .....	85
<b>Figura 61</b> <i>Ventilador Montero Deton FE-50</i> .....	86
<b>Figura 62</b> <i>Sensor AM2301</i> .....	86
<b>Figura 63</b> <i>Sensor de boya</i> .....	87
<b>Figura 64</b> <i>Sensor óptico de nivel</i> .....	87
<b>Figura 65</b> <i>Esquema de conexión del sistema</i> .....	90
<b>Figura 66</b> <i>Diferencia y similitudes entre MOSFET e ISFET</i> .....	91
<b>Figura 67</b> <i>Comparación entre sensores de pH</i> .....	92
<b>Figura 68</b> <i>Diagrama P&amp;ID de la línea de alimentación del sistema propuesto</i> .....	100
<b>Figura 69</b> <i>Características de los reguladores de voltaje</i> .....	103

<b>Figura 70</b> Fuente de voltaje de corriente continua.....	104
<b>Figura 71</b> Transformador 120/24V AC.....	105
<b>Figura 72</b> Circuito de alimentación .....	106
<b>Figura 73</b> Circuito de potencia.....	108
<b>Figura 74</b> Calefactor para líquidos Caredy HX-906 .....	109
<b>Figura 75</b> Módulo de expansión PCF8574 .....	109
<b>Figura 76</b> Características de Arduino Shield CNC.....	110
<b>Figura 77</b> Módulo de relés Songle.....	110
<b>Figura 78</b> Tablero eléctrico – vista exterior.....	111
<b>Figura 79</b> Tablero eléctrico – vista interior.....	111
<b>Figura 80</b> Diagrama de comunicaciones del sistema.....	114
<b>Figura 81</b> Diagrama de flujo del menú del encoder .....	116
<b>Figura 82</b> Pantalla de modo manual: a) Pantalla de espera, b) Primer nivel, c) Segundo nivel, d) Tercer nivel.....	117
<b>Figura 83</b> Pantalla de modo IoT: a) Espera de confirmación, b) Modo confirmado, c) Selección de función .....	118
<b>Figura 84</b> Pantalla "CONTROL IOT" .....	120
<b>Figura 85</b> Pantalla "SET RIEGOS" .....	121
<b>Figura 86</b> Pantalla "ENVIO DATOS".....	122
<b>Figura 87</b> Esquema de conexión de la base de datos .....	125
<b>Figura 88</b> Programa Node-Red, a) Conexión de nodos, b) Código de nodo de función.....	127
<b>Figura 89</b> Código de creación de tabla en PlanetScale .....	128
<b>Figura 90</b> Hoja de cálculo de Excel, a) Tabla de datos, b) Gráficas de tiempo .....	129
<b>Figura 91</b> Características del sensor AM2301.....	131
<b>Figura 92</b> Características del medidor electrónico APERA.....	132
<b>Figura 93</b> Datos de calibración de pH y EC del medidor electrónico APERA .....	133



<b>Figura 94</b> <i>Toma de datos con el medidor electrónico APERA</i> .....	136
<b>Figura 95</b> <i>Diagrama de tiempos del riego</i> .....	137
<b>Figura 96</b> <i>Diagrama de Pareto de efectos – Tiempos de climatización</i> .....	140
<b>Figura 97</b> <i>Análisis de varianza – Tiempos de climatización</i> .....	140
<b>Figura 98</b> <i>Diagrama de Pareto de efectos removiendo la interacción – Tiempos de climatización</i> .....	141
<b>Figura 99</b> <i>Análisis de varianza removiendo la interacción – Tiempos de climatización</i> .....	141
<b>Figura 100</b> <i>Gráficas de residuos (Verificación de supuestos) – Tiempos de climatización</i> .....	142
<b>Figura 101</b> <i>Resumen del modelo – Tiempos de climatización</i> .....	142
<b>Figura 102</b> <i>Ecuación de regresión – Tiempos de climatización</i> .....	142
<b>Figura 103</b> <i>Variación de temperatura de acuerdo a los parámetros de climatización</i> .....	143
<b>Figura 104</b> <i>Gráfica de efectos principales - Nivel de conductividad eléctrica (CE)</i> .....	147
<b>Figura 105</b> <i>Gráfica de efectos principales - Nivel de pH</i> .....	148
<b>Figura 106</b> <i>Nivel de conductividad eléctrica (CE) de acuerdo a los porcentajes de volumen de solución A y ácido</i> .....	149
<b>Figura 107</b> <i>Nivel de pH de acuerdo a los porcentajes de volumen de solución A y ácido</i> .....	149
<b>Figura 108</b> <i>Gráfica de efectos - Nivel de pH después de la compensación de ácido</i> .....	154
<b>Figura 109</b> <i>Comparación de longitud de hoja más grande de lechuga obtenido por sistema de Aeroponía y sistema tradicional</i> .....	160
<b>Figura 110</b> <i>Comparación de número de hojas de lechuga obtenido por sistema de Aeroponía y sistema tradicional</i> .....	161
<b>Figura 111</b> <i>Comparación de peso promedio de lechuga obtenido por sistema de aeroponía y sistema tradicional</i> .....	162
<b>Figura 112</b> <i>Temperaturas del invernadero durante el ciclo de cultivo de las lechugas</i> .....	163
<b>Figura 113</b> <i>Histograma de temperaturas del invernadero durante el ciclo de cultivo de las lechugas</i> .....	164

<b>Figura 114</b> <i>Niveles de pH de los tanques B y D durante el ciclo de cultivo de las lechugas ...</i>	165
<b>Figura 115</b> <i>Histograma de niveles de pH de los tanques B y D durante el ciclo de cultivo de las lechugas .....</i>	166
<b>Figura 116</b> <i>Niveles de EC de los tanques B y D durante el ciclo de cultivo de las lechugas...</i>	166
<b>Figura 117</b> <i>Histograma de niveles de EC de los tanques B y D durante el ciclo de cultivo de las lechugas .....</i>	167
<b>Figura 118</b> <i>Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con el proyecto.....</i>	170

## Resumen

El aumento de la población a nivel mundial demanda el uso de nuevas tecnologías que permitan aumentar la producción de alimentos, sin afectar el medio ambiente. Las técnicas hidropónicas ayudan a cubrir esta necesidad, sin embargo, requieren de supervisión y mantenimiento constante. El presente proyecto pretende diseñar un sistema automatizado para el huerto hidropónico de la empresa “Aeroponía del Valle”, en donde se aplican técnicas de hidroponía de flujo y reflujos y de aeroponía. Dicho sistema permite controlar y monitorear los parámetros de crecimiento necesarios para un cultivo de lechuga de mediana escala, lo que permitirá mejorar la calidad del producto y obtener un mayor rendimiento del cultivo. Se utilizó un PLC Controllino para controlar los parámetros de temperatura y humedad ambiente, nivel de pH y conductividad eléctrica, tiempo y frecuencia de riego. Además, se creó una aplicación IoT y una base de datos que permita llevar una estadística de toda la producción. Se realizaron experimentos de calibración de dichos parámetros y los resultados se analizaron en base al tiempo de cultivo y las características de las lechugas obtenidas. Al final, se demostró que el sistema presenta grandes ventajas frente a los métodos de cultivo tradicionales en cuanto a rendimiento, tiempo de cultivo y consumo de agua.

*Palabras clave:* hidroponía, automatización, agricultura, riego, control

### **Abstract**

The increase in the world population demands the use of new technologies that helps increase food production without affecting the environment. Hydroponic techniques fulfill this need, however, they require constant supervision and maintenance. This project aims to design an automated system for the hydroponic farm of the company "Aeroponía del Valle", where ebb and flow hydroponics and aeroponics techniques are applied. Said system allows to control and monitor the growth parameters necessary for a medium-scale hydroponic lettuce crop, which will improve the quality of the product and obtain a higher crop performance. A Controllino PLC was used to control the parameters of ambient temperature and humidity, pH level and electrical conductivity level, irrigation time and irrigation frequency. In addition, an IoT application and a database were created to get statistics of the production. Calibration experiments of these parameters were carried out and the results were analyzed based on the cultivation time and the characteristics of the lettuce obtained. In the end, it was shown that the system has great advantages over traditional cultivation methods in terms of performance, cultivation time and water consumption.

*Key words:* hydroponics, automation, agriculture, irrigation, control

## Glosario

**Acidificación** - Se refiere a una disminución de la cantidad de iones carbonato en el agua

**Bombas peristálticas** – Es un tipo de bomba hidráulica que se utiliza para desplazar una variedad de fluidos, dichas bombas son típicamente usadas cuando se emplean fluidos limpios o estériles ya que el mecanismo de la bomba no los contamina al desplazarlos (Flores et al., 2018).

**Ebb & Flow** – Es un sistema hidropónico de tipo flujo y reflujo, también conocido como sistema de inundación y drenaje que consiste en inundar el medio de cultivo con una solución nutritiva a base de agua y luego drenar el líquido permitiendo que el medio se seque en ciclos intermitentes a lo largo del cultivo, de esta manera las raíces crecen en búsqueda de humedad y se logra una mejor absorción de nutrientes para la planta (Porrás, 2021).

**Hidroatomizado** – Término utilizado en aeroponía, se refiere a la generación de una neblina presurizada con un tamaño de gota de agua adecuado para un entorno aeropónico, generalmente 50 micras.

**IoT** – El Internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés), según la definición dada por Madakam et al. (2015), es una red abierta y completa de objetos inteligentes que tienen la capacidad de auto organizarse, compartir información, datos y recursos, reaccionar y actuar ante situaciones y cambios en el entorno.

**Microgreens** – Los microgreens o micro vegetales son verduras cosechadas antes de su etapa de madurez, generalmente miden entre 2 y 7 cm y pueden ser cosechados en un período entre 7 y 21 días, cuando sólo se tiene el tallo y pequeños brotes de hojas. Tienen un sabor más intenso y mayor concentración de nutrientes que la planta desarrollada. Estos productos pueden ser fácilmente incorporados en las comidas y potencian su valor nutricional (Lirola, 2018).

**PLC** – Un Controlador Lógico Programable (PLC por sus siglas en inglés) es un dispositivo basado en microprocesador que tiene una memoria programable para almacenar instrucciones e implementar funciones lógicas, de secuencia, de tiempo, de conteo y aritméticas para controlar máquinas y procesos (Bolton, 2015).

**Sensor de conductividad eléctrica** – El sensor de conductividad eléctrica (EC) mide la capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica. Su unidad de medición es el Siemens/cm (S/cm), que también se puede expresar en microSiemens/cm ( $\mu\text{S/cm}$ ), o en miliSiemens (mS/cm). En el caso de medidas en soluciones acuosas, el valor de la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad.

**SNH** – La solución nutritiva hidropónica (SNH) es el medio acuoso en el cual se encuentran disueltos los nutrientes esenciales para el adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas, y es la vía principal de nutrición de cultivos en hidroponía y sustratos. Una solución nutritiva completa debe tener nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, molibdeno, manganeso, boro, zinc, cobre y níquel, estos elementos se encuentran en forma de iones para que puedan ser fácilmente absorbidos por las raíces de las plantas. Existen dos tipos de soluciones complementarias, la solución A que contiene los macro elementos y la solución B que contiene los micro elementos, generalmente se utiliza en proporción 2:1 respectivamente (Porrás, 2021).

**Sustrato inerte** – Es el "suelo" donde se arraiga la planta, es inerte ya que no reacciona químicamente con la solución nutritiva y su misión es únicamente anclar la planta y mantener una adecuada relación aire/agua. Para cultivos hidropónicos se suele utilizar como sustrato inerte láminas de espumaflex o bandejas de cultivo hidropónico (Quintero et al., 2011)

## Capítulo 1

### Introducción

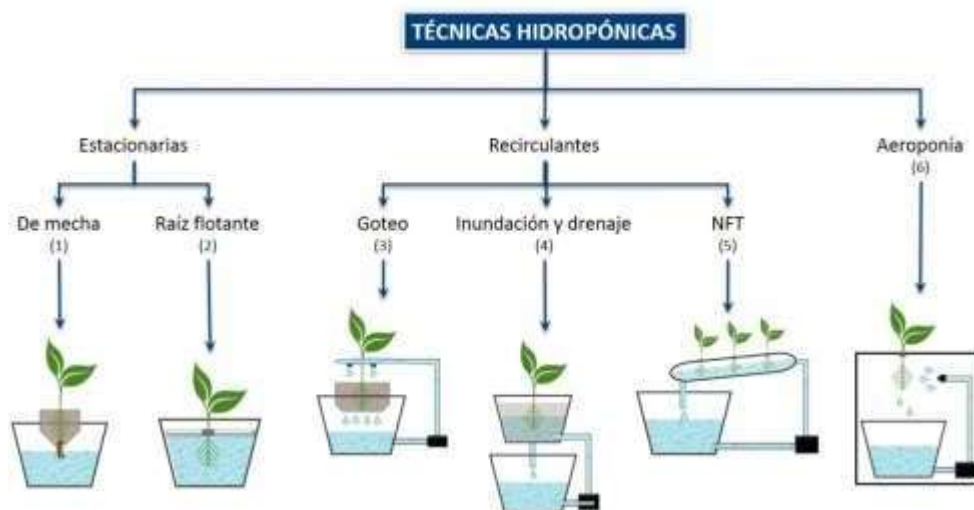
#### Antecedentes

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, para el año 2050 la población mundial podría llegar hasta 9.1 mil millones de personas y la producción de alimentos deberá aumentar en un 70% (FAO, 2009). Para los países en desarrollo, el 80% de este aumento provendría de la intensificación del cultivo y el 20% de la expansión de tierra cultivable, pero continuar con el proceso de cultivo convencional elevaría los niveles de gases de efecto invernadero, comprometería los ecosistemas, degradaría los suelos, contaminaría nuestras aguas y llevaría a muchas especies animales a la extinción (Colombo et al., 2015).

En Ecuador, el interés por los alimentos orgánicos se multiplicó durante la emergencia sanitaria del Covid-19, lo cual llevó a las grandes empresas a acelerar el desarrollo de las plantas para poder cubrir las demandas de los supermercados. Sin embargo, la época invernal extendida que se ha vivido ha afectado de gran manera al sector de la agricultura debido a las lluvias intensas, lo que provoca pérdidas parciales o totales de cultivos y encarece los productos agrícolas (Morales, 2021). A partir de esta problemática, nace la necesidad de buscar otras alternativas que consuman menos recursos naturales y que permitan el rápido crecimiento de las plantas. Los cultivos hidropónicos son una alternativa aceptable actualmente, en especial en países con alta demanda de alimentos y producción insuficiente. Su objetivo es cultivar plantas sin presencia de tierra mediante el uso de soluciones de nutrientes minerales en un solvente de agua (Sreekumar, 2020), e incluye varias técnicas como se describen en la **Figura 1**. Las técnicas aplicadas a la granja hidropónica de la empresa Aeroponía del Valle son de Aeroponía y de Inundación y drenaje.

Figura 1

## Técnicas hidropónicas



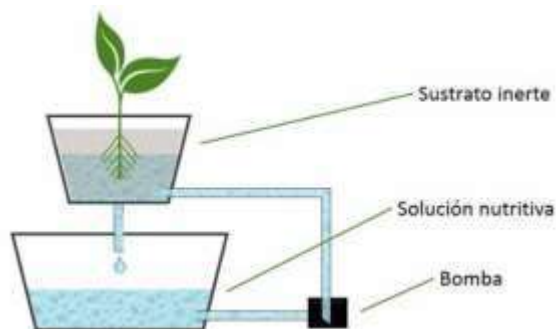
*Nota.* Tomado de *Droplet size analysis of high pressure aeroponic system*, por V. Sreekumar, 2020, Massey University.

La hidroponía de flujo y reflujo, también conocido como de inundación y drenaje o Ebb & Flow, es un sistema que consiste en inundar el medio de cultivo con una solución nutritiva a base de agua y luego drenar el líquido permitiendo que el medio se seque en ciclos intermitentes a lo largo del cultivo, de esta manera las raíces crecen en búsqueda de humedad y se logra una mejor absorción de nutrientes para la planta. El sistema más básico tiene un recipiente donde se ubica el sustrato inerte que sostiene las plantas, y un depósito de solución nutritiva justo debajo, esta solución se suministra por medio de una bomba y cae por gravedad de vuelta al depósito, como se observa en la **Figura 2**. En este proyecto se va a controlar los ciclos de flujo y reflujo del medio de cultivo, que de ahora en adelante se referirá como semillero.



## Figura 2

### *Técnica hidropónica de flujo y reflujo*



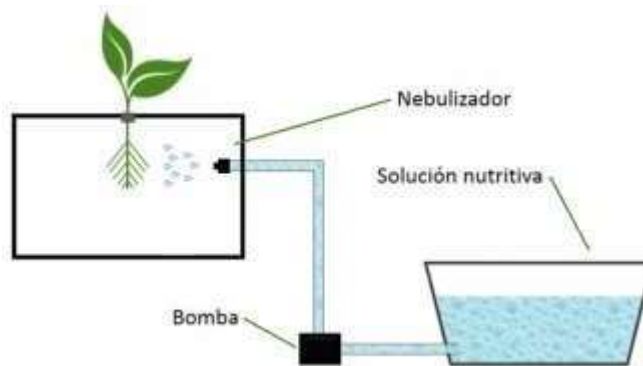
*Nota.* Tomado de *Droplet size analysis of high pressure aeroponic system*, por V. Sreekumar, 2020, Massey University.

La aeroponía es una técnica en la cual las raíces de las plantas se encuentran en un entorno oscuro, suspendidas en el aire por medio de canastas hidropónicas, teniendo como única fuente de nutrientes la solución nutritiva que se suministra en intervalos de tiempo por medio de un rocío hidroatomizado, como se observa en la **Figura 3**. Este ambiente limpio y estéril reduce en gran medida las posibilidades de propagar enfermedades e infecciones de las plantas que comúnmente se asocian con otros medios de cultivo, permite una producción continua durante todo el año y produce alimentos de manera limpia, eficiente y rápida. Además, la tecnología aeropónica ofrece un aumento del 80% en el peso seco de la biomasa por metro cuadrado en comparación con las técnicas de cultivo hidropónicas y basadas en el suelo, es decir, que las plantas cultivadas aeropónicamente absorben más minerales y vitaminas en comparación con otras técnicas de cultivo (NASA, 2006). Los sistemas aeropónicos varían según el tamaño de gota de la niebla utilizada y se seleccionan de acuerdo a su aplicación. A nivel industrial el método más eficiente es el aeropónico de alta presión (60-90 psi) y bajo flujo (HPA) donde se forman gotas de 50  $\mu\text{m}$ , es decir 40 veces más pequeñas que una gota normal, sin embargo, representa una inversión más alta y requiere más control ya que las pequeñas fluctuaciones en las condiciones de crecimiento pueden provocar la pérdida de todo

el producto, sea por falta de nutrientes o por la proliferación de bacterias y hongos. Esta técnica es aplicada tanto para las torres de engorde de la granja hidropónica de la empresa, así como para el riego de los microgreens.

### Figura 3

*Técnica de aeroponía*



*Nota.* Tomado de *Droplet size analysis of high pressure aeroponic system*, por V. Sreekumar, 2020, Massey University.

En la **Figura 4**, se muestra un esquema explicativo de la granja hidropónica de la empresa “Aeroponía del Valle”, esta consiste en un invernadero que abarca todos los procesos de cultivo y un cuarto adjunto donde se ubicarán los elementos de control. El sistema de riego se realiza por medio del control de entrada y salida de tres tanques que almacenan la mezcla de las soluciones nutritivas de acuerdo a cada tipo de cultivo, más un tanque que contiene el líquido de fumigación. El riego se realiza por medio del accionamiento de una única bomba combinada con válvulas ON/OFF que permiten el paso de la solución de un tanque a la vez, mientras que las condiciones ambientales de temperatura y humedad se controlan por medio de ventiladores y aspersores aéreos.

Todos los tanques tienen sensores de nivel, y se deberá monitorear los niveles de pH y conductividad eléctrica de los tanques correspondientes a los semilleros y las torres para poder determinar el estado de la solución y, si es necesario, corregir las cantidades y equilibrar las

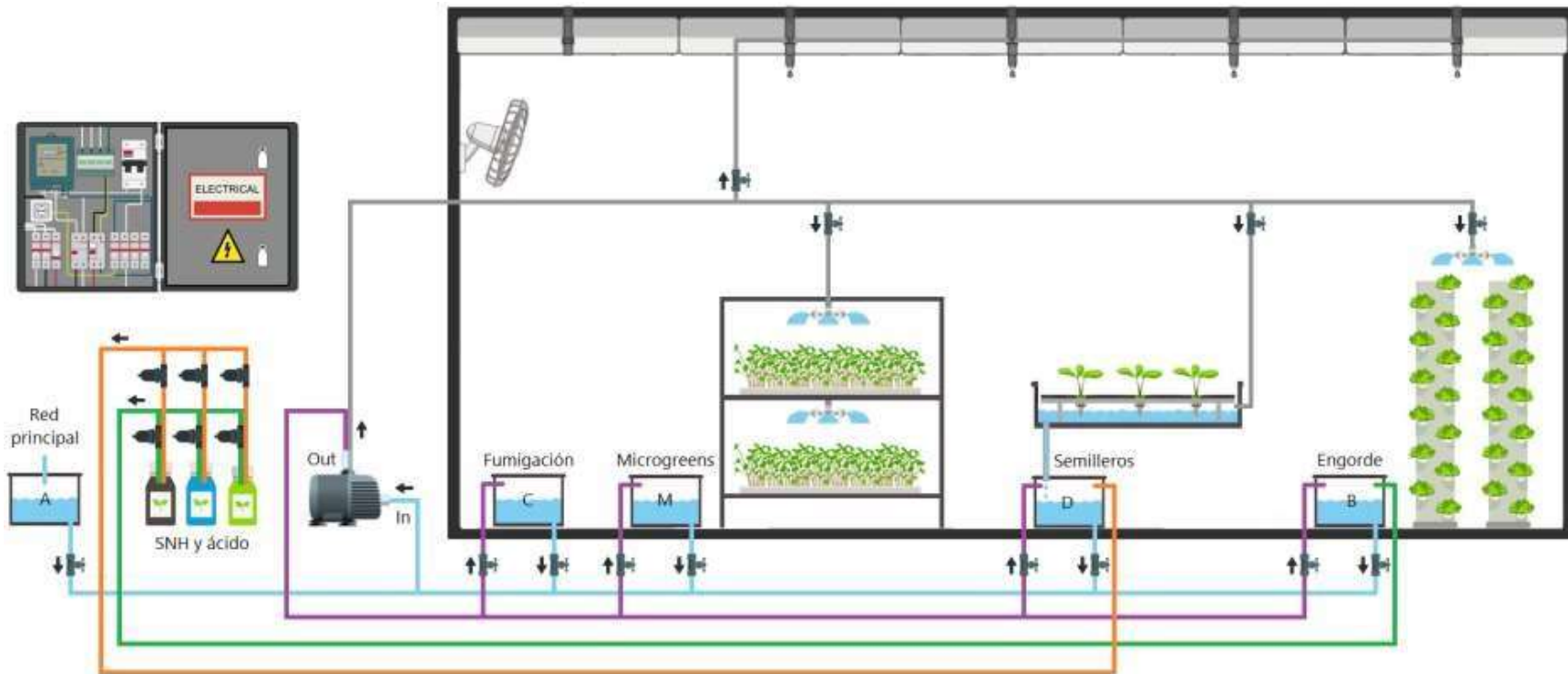
mezclas de agua, solución y ácido. Los rangos de operación y tiempos de riego requeridos se encuentran descritos en la **Tabla 1**. El agua que alimenta a todos los tanques viene desde un reservorio conectado a la red de agua potable, mientras que la solución hidropónica y el ácido se cargan desde los recipientes respectivos empleando bombas peristálticas.

Cuando el riego se realiza manualmente, el operario es el encargado de activar la bomba y abrir las válvulas que permitan el paso de la solución hacia las plantas, y si el riego no es suministrado con la frecuencia adecuada o existe alguna falla que no se identifique a tiempo, ocasionaría la muerte de las plantas y la pérdida de toda la producción. Al implementar la mecatrónica, se puede tener un mejor control de las variables críticas como el nivel de los tanques, estado de la solución nutritiva, horarios de riego, condiciones ambientales, además de establecer protocolos para detectar errores y emitir alarmas que permitan tomar decisiones oportunas de manera rápida.

Por esta razón, este proyecto pretende diseñar un sistema automatizado que permita controlar y monitorear los parámetros de crecimiento necesarios para un cultivo hidropónico de mediana escala, lo que permitirá mejorar la calidad del producto y obtener un mayor rendimiento del cultivo. La etapa de germinación de la semilla se realizará mediante hidroponía de flujo y reflujo, donde se obtendrán las plántulas que pasarán a la etapa de crecimiento. En esta etapa, también conocida como engorde, las plántulas se ubican con las raíces hacia adentro en las torres de cultivo y, aplicando aeroponía de alta presión, se realiza el riego hasta obtener la planta lista para su cosecha. La técnica de aeroponía también será aplicada para el cultivo de microgreens.

**Figura 4**

Diagrama esquemático de la granja hidropónica de la empresa "Aeroponía del Valle"



## Planteamiento del Problema

El sistema de riego a ser automatizado en este proyecto, aplica dos técnicas hidropónicas: riego recirculante de flujo y reflujos para los semilleros y riego por aeroponía de alta presión para el cultivo de microgreens y el riego de las torres de engorde. Las **Figuras 5, 6 y 7** muestran las instalaciones de la empresa previo a la automatización.

### Figura 5

*Semilleros hidropónicos para cultivo de plántulas*



### Figura 6

*Torres aeropónicas para etapa de engorde*



**Figura 7***Bandejas de cultivo para microgreens*

El riego se realiza por medio del control de tres tanques que almacenan la mezcla de las soluciones nutritivas de acuerdo a cada unidad de cultivo, más un tanque que contiene el líquido de fumigación. Se debe realizar un monitoreo de pH y conductividad eléctrica en cada tanque de solución para corregir las cantidades y equilibrar las mezclas de agua, solución y ácido según sea necesario. Además, se deben realizar fumigaciones en el invernadero 3-4 días a la semana y controlar la temperatura y humedad ambiental por medio de los ventiladores y aspersores aéreos. En la **Tabla 1**, se detallan los niveles óptimos de funcionamiento de la granja hidropónica para los cultivos en general.

**Tabla 1***Niveles de funcionamiento de la granja hidropónica*

<b>Variabes</b>	<b>Niveles</b>
pH	5.5 – 6.5
Conductividad eléctrica	500-700 $\mu\text{S/cm}$ en microgreens 600-800 $\mu\text{S/cm}$ en semilleros 1000-1200 $\mu\text{S/cm}$ en engorde
Duración y frecuencia del riego	20 segundos cada hora para microgreens Una inundación cada 3 horas para semilleros 20 segundos cada 20 minutos para engorde 30 segundos cada 12 horas para fumigación
Temperatura del agua	16 – 24 °C
Temperatura ambiente	24 – 27 °C
Humedad relativa	60 – 80%

Para la automatización del sistema completo se hará uso de Controllino, un PLC que es compatible con el software libre de Arduino y brinda la confiabilidad de un PLC de grado industrial (Controllino, 2022). Este dispositivo se encargará del control, monitoreo y supervisión de los riegos, esto incluye el accionamiento de las válvulas, la lectura de los sensores de nivel, la lectura de sensores de humedad relativa y temperatura para la climatización y el accionamiento de los motores a paso de las bombas peristálticas para el ingreso de solución nutritiva, todo esto de acuerdo a los horarios de riego y requerimientos descritos en la **Tabla 1**. En la **Figura 8**, se muestra un esquema general del proyecto en diagrama de bloques.

Se realizará una aplicación IoT para el control de forma remota del sistema y la notificación de advertencias o fallas. De acuerdo a la solicitud de la empresa, al ya contar con

una suscripción pagada, se utilizará la aplicación móvil de Blynk, una plataforma de IoT que permite conectar dispositivos a la nube, diseñar aplicaciones para controlarlos y supervisarlos de forma remota, y administrar miles de productos implementados (Blynk, 2022). Además, con la plataforma PlanetScale se recolectarán datos de los sensores implementados que servirán para establecer cartas de control de calidad de la producción de la granja hidropónica, de esta manera se podrán evaluar las variables y realizar mejoras.

Actualmente, la granja cuenta con 4 bandejas para cultivo de microgreens, 8 semilleros para cultivo hidropónico y 22 torres para cultivo aeropónico, esta última representa el 40% de la capacidad total del invernadero para la etapa de engorde. Para este proyecto se trabajará con la capacidad actual, ya que la empresa desea recuperar la inversión del proyecto antes de maximizar su producción.

### **Justificación e Importancia**

Uno de los más grandes retos en la aeroponía es el tamaño de las gotas para el riego, ya que si son muy grandes se reduce el oxígeno para las raíces y la planta no se desarrolla de manera correcta. Para este proyecto, se trabajará con un riego en forma de nebulizaciones con un tamaño de gota de 50  $\mu\text{m}$ . Otro factor crítico es la frecuencia de exposición de las raíces a la solución nutritiva, por lo cual este tipo de sistemas demanda mucha atención a los horarios y períodos de riego, esto dependerá del tipo de cultivo a realizar y la técnica de riego aplicada. En cuanto al sistema hidropónico de flujo y reflujo, la principal desventaja son los niveles inestables de pH y nutrientes, ya que, al realizar una recirculación de la solución, la planta absorbe los nutrientes necesarios lo cual altera las propiedades de la solución al regresar al depósito y necesita ser equilibrada nuevamente. Al tomar medidas de estas variables, se puede manipular las cantidades de cada sustancia para preparar la solución que la planta requiera.

En los cultivos hidropónicos es primordial tomar en cuenta tres aspectos, que son el nivel de pH, el nivel de conductividad y la temperatura del agua (los rangos óptimos de cada variable se muestran en la tabla 1), los cuales influyen en la capacidad de absorción de

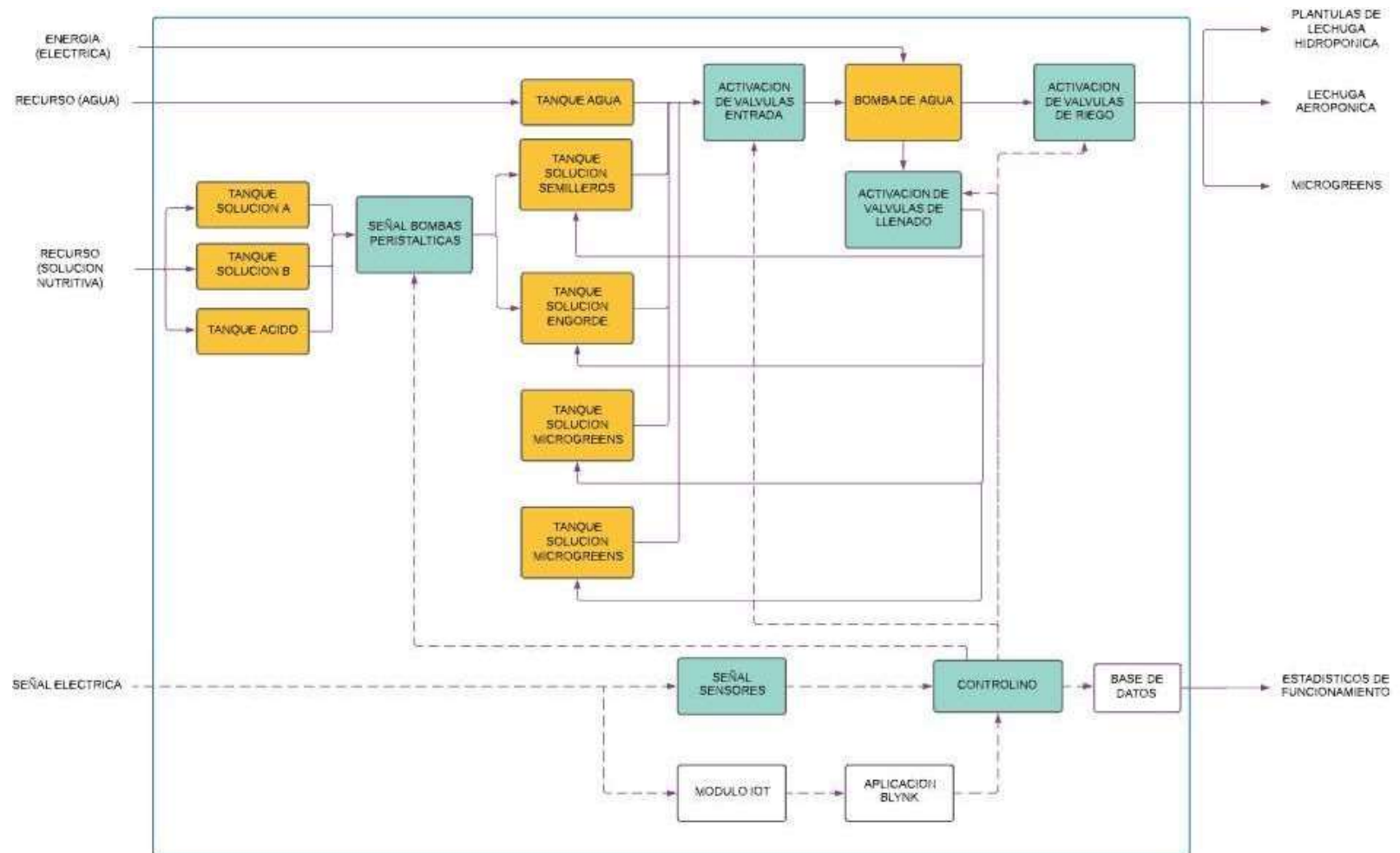


nutrientes de las plantas. De igual manera, existen otros factores ambientales como la temperatura ambiente y humedad relativa que se relaciona con el nivel de estrés de la planta, ya que al estar en un ambiente muy caliente se puede deshidratar, mientras que un ambiente muy húmedo puede contribuir a la formación de hongos y en un ambiente muy frío no sobrevive. Finalmente, los tiempos de riego también son de alta importancia, ya que la falta de un ciclo de riego puede afectar en el crecimiento de la planta o acabar con la producción. Al tener un control de todas estas variables por medio de sensores adecuados y actuadores como aspersores, ventiladores, bombas, entre otros, se logra crear un ambiente de desarrollo propicio para que las plantas puedan crecer de manera óptima, obteniendo un menor tiempo de producción y una mejor calidad del producto final.

Por estas razones, un sistema automatizado resulta conveniente, ya que permite ahorrar recursos y tomar decisiones oportunas de forma inmediata en el control de los factores determinantes del cultivo. Además, se recolectan datos que servirán para establecer cartas de control de calidad de la producción de la granja hidropónica para evaluar las variables y realizar mejoras. Gracias al empleo de tecnologías inalámbricas y un software intuitivo de fácil manejo, se pueden generar informes del estado del sistema y avisos de seguridad, como roturas en tuberías y datos históricos que, representados en cartas de control, permitirán evaluar los índices de calidad de la granja hidropónica.

Figura 8

Esquema general del proyecto



Según expertos en el tema como (Martínez, 2013), el método de cultivo aeropónico puede reducir el uso de agua en un 98%, el uso de fertilizantes en un 60% y el uso de pesticidas en un 100%, todo mientras se maximiza el rendimiento de sus cultivos en un 45 a 75% y se protege el medioambiente. El tiempo de cultivo también es un factor decisivo al apostar por estas técnicas, ya que mientras se pueden obtener 5 cosechas de lechuga al año con el cultivo tradicional, con el cultivo hidropónico y aeropónico se pueden obtener 8 y 12 cosechas anuales respectivamente. Además, el período de duración del producto en refrigeración después de su cosecha puede alcanzar hasta 3 semanas, según la experiencia compartida por la empresa Aeroponía del Valle.

Actualmente, en Ecuador, el tema de la hidroponía va en crecimiento, sin embargo, existe muy escasa o ninguna aplicación de la aeroponía. Si bien el costo de inversión inicial es alto, los beneficios que aportan estas tecnologías al proceso de cultivo presentan resultados favorables a largo plazo, por lo que se puede obtener un mayor rendimiento del cultivo y mejor calidad de los productos.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

- Automatizar de manera eficiente el sistema de riego y climatización para la granja hidropónica de la empresa “Aeroponía del Valle”

### ***Objetivos Específicos***

- Realizar los cálculos correspondientes del circuito hidráulico para determinar el caudal circulante y los diámetros de los tubos
- Seleccionar e implementar los componentes que permitan un correcto funcionamiento del sistema hidráulico
- Diseñar e implementar el circuito de control y potencia del sistema de riego y climatización de la granja hidropónica

- Diseñar e implementar los algoritmos de monitoreo y supervisión del sistema de riego y climatización con el PLC Controllino
- Realizar una aplicación de IoT para lectura de datos, control de forma remota y notificación de alarmas o fallas en el sistema
- Crear una base de datos para establecer cartas de control de calidad de la producción de la granja hidropónica
- Establecer un protocolo de pruebas para evaluar el desempeño del sistema basados en el tiempo de ciclo de cultivo
- Establecer un plan de mantenimiento preventivo del sistema para garantizar la continuidad de producción

### **Alcance**

El proyecto se centra en la automatización de un sistema de riego y climatización para una granja hidropónica de mediana escala de la empresa “Aeroponía del Valle”, que cuenta con una capacidad de producción de 1500 lechugas desde su etapa de siembra hasta su cosecha. El alcance del presente proyecto se puede describir en cuatro etapas.

En la primera etapa se realizará el dimensionamiento del sistema hidráulico para determinar las pérdidas de presión en el sistema, y seleccionar correctamente los elementos en base al deseo de la empresa de producir con capacidad completa del invernadero.

La segunda etapa abarcará el diseño del circuito eléctrico de control y potencia utilizando el PLC Controllino y los diferentes elementos de control necesarios, y la distribución del tablero eléctrico de acuerdo a la norma NEMA.

En la tercera etapa se diseña el algoritmo de control que permita monitorear el nivel de los tanques, preparar las soluciones nutritivas para cada cultivo, programar los ciclos de riego y fumigación, y climatizar el entorno del invernadero de acuerdo a los niveles requeridos para el cultivo (ver **Tabla 1**).

Para la cuarta etapa se realizará una aplicación de IoT con la aplicación móvil Blynk para el control de forma remota del sistema y la notificación de advertencias o fallas en el sistema, además de la conexión MySQL para recolectar los datos necesarios en una hoja de cálculo de Excel y establecer cartas de control de calidad de la producción de la granja hidropónica.

La documentación entregada será el diagrama P&ID, el diagrama eléctrico de potencia y control, el diagrama de flujo del proceso, los horarios de riego y el manual de mantenimiento del sistema.

## Capítulo 2

### Fundamentación Teórica

#### Agricultura Hidropónica

Se puede definir la hidroponía como un sistema de regadío, en el cual las raíces de los cultivos reciben una solución nutritiva equilibrada disuelta en agua con todos los elementos químicos necesarios para el desarrollo de las plantas, las cuales pueden crecer directamente sobre la solución mineral, o bien en un sustrato o medio inerte (Escuderos, et al., 2017). En lugar de tierra se emplea algún material denominado sustrato, el cual no contiene nutrientes y se utiliza como un medio de sostén para las plantas, permitiendo que estas tengan suficiente humedad, y también la expansión del bulbo, tubérculo o raíz (Albuja, et al, 2021).

#### *Componentes de un Sistema de Riego*

De acuerdo con Gavilánez (2019), los sistemas de riego presurizados pueden estar conformados de los siguientes elementos:

- **Cabezal:** Su función es controlar todo el sistema de riego. Se sitúa al inicio de la instalación, e incluye todos los equipos y materiales empleados para controlar el sistema de riego, medir el volumen de agua que entra procedente del embalse, filtrarla, regular su presión, dosificar los fertilizantes y programar el riego.
- **Equipo de bombeo:** Pueden utilizarse equipos eléctricos o de combustión interna, con impulsores centrífugos por las necesidades relativamente altas de presión.
- **Equipos de filtrado y de inyección de fertilizantes:** Debido a la abertura de los emisores de agua, los filtros sólo se utilizan en los sistemas de riego localizados, constituyéndose en un elemento muy importante para poder ampliar la vida útil de dicho sistema de riego. En los sistemas de aspersión, el uso de inyectores de fertilizantes no es común debido a la poca eficiencia que se consigue, además de la presencia de efectos fitotóxicos que se pueden generar con ciertas sustancias agroquímicas.

- **Tuberías:** En cuanto al uso de las tuberías, estas generalmente son de plástico, tales como el PVC y el polietileno (PE). En riego por aspersión, el sistema está compuesto exclusivamente de tuberías de PVC, con longitudes de 6 m y pegados con cemento solvente a base de butanona y comúnmente con conexión espiga – campana. En las instalaciones de riego presurizado, las tuberías se clasifican en tuberías de conducción o llamadas también como principales (primarias y secundarias), y son las que conducen un mismo caudal en todo su trayecto; y las tuberías de distribución, comprendidas entre las tuberías porta – laterales (manifold) y las tuberías laterales que son las que abastecen a los emisores.
- **Los accesorios:** Dentro de los accesorios están todos los elementos que sirve para unir y desviar tuberías, reducir o ampliar diámetros, conectar válvulas y emisores, entre otros. Ejemplos de estos son las uniones, los codos, las tees, uniones reductoras y adaptadores.
- **Elementos de control:** Los elementos de control, básicamente lo constituyen las válvulas. Existen válvulas para el control del caudal, como las válvulas de compuerta, instaladas a la salida de la bomba; como también existen las válvulas para controlar presión. Las válvulas de retención que pueden proteger contra el golpe de ariete, las válvulas de aire o ventosas que permiten expulsar las bolsas de aire, que en un momento dado pueden cortar el flujo; a su vez estas últimas, también pueden ayudar a la protección del golpe de ariete.
- **Emisores:** Se definen como emisores a los elementos finales del sistema de riego, a través de los cuales se aplica el agua a los cultivos. En forma general, estos pueden clasificarse como goteros, micro aspersores y aspersores. Tanto a los sistemas que utilizan goteros como a los que utilizan micro aspersores, se los define como sistema de riego localizado, ya que no mojan el área total de cultivo; situación que es diferente en

el caso de los sistemas que utilizan aspersores, en donde se moja toda la superficie. Los micro aspersores son emisores que requieren cargas entre 10 a 30 m y pueden emitir caudales entre 20 a 200 L/h. También pueden ser auto-compensados. Los aspersores son los emisores que requieren, relativamente, la mayor carga. Este requerimiento de carga puede dar lugar a una clasificación de la siguiente forma: 1) los de baja presión, que pueden estar entre los 18 a 25 m de carga; 2) los de media presión, con requerimientos de carga entre los 25 a los 40 m; y 3) los de alta presión, con cargas mayores a los 40 m. En el primer caso se encuentra los aspersores que se ubican para regar debajo del follaje (subfoliar); mientras que los de media y alta presión se utilizan para regar sobre el follaje (suprafoliar). A los de media y alta carga se los conoce como mini-cañón y cañón, respectivamente. Los aspersores de baja presión pueden emitir caudales entre los 0.2 a 1.0 m<sup>3</sup>/h; los de media presión arrojan caudales entre 1.0 a 6.0 m<sup>3</sup>/h; y los de alta presión, comúnmente emiten caudales entre los 6.0 y 40.0 m<sup>3</sup>/h.

### ***Técnicas de Hidroponía***

La principal característica de las diferentes técnicas de hidroponía es que son sistemas cerrados, es decir que se intenta reutilizar la mayor cantidad de solución nutritiva reduciendo considerablemente el consumo de agua. Las técnicas hidropónicas presentadas en el trabajo de Albuja, et al. (2021), se pueden dividir en 3 grandes grupos: recirculantes, estacionarias y aéreas.

- **Técnica recirculante:** Las raíces están sumergidas en una solución nutritiva, en la cual se regulan constantemente su pH, aireación y concentración de sales. La variante más conocida es la Técnica de Película Nutriente (NFT), basada en la recirculación constante de la solución nutritiva en contacto con la parte baja de la raíz, lo cual representa una ventaja debido a la posibilidad de extender el cultivo de forma vertical,



como se muestra en la **Figura 9** (Albuja, et al, 2021). Otra técnica conocida como flujo y refluj, o Ebb & Flow, consiste en inundar las raíces de las plantas en el recipiente que las contenga, posteriormente la solución regresa al depósito por efecto de la gravedad, como se observa en la **Figura 10**. Es necesario tener un estricto control de los parámetros de la solución, siendo esta la principal desventaja del sistema.

### Figura 9

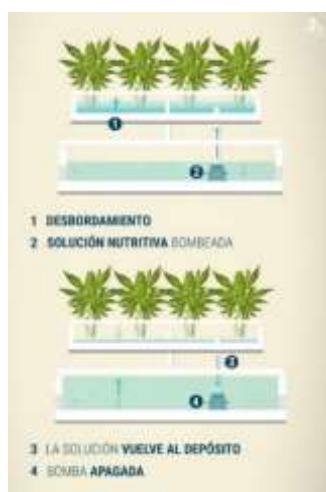
*Sistema NFT*



*Nota.* Tomado de *Comparison of the advantages of hydroponic systems as agricultural alternatives in urban areas* (p. 45-54), por V. Albuja et al., 2021, *Minerva*, 2 (4).

### Figura 10

*Sistema de flujo y refluj*



*Nota.* Tomado de *Comparison of the advantages of hydroponic systems as agricultural alternatives in urban areas* (p. 45-54), por V. Albuja et al., 2021, *Minerva*, 2 (4).

- **Técnicas estacionarias:** Consiste en utilizar contenedores de cualquier tipo de material, el cual no debe permitir el paso de luz protegido por una tapa con orificios encargada de sostener al cultivo permitiendo que las raíces estén en contacto con la solución nutritiva (Albuja, et al., 2021). Para esta técnica es importante mantener aireada la solución ya que esta permanece estática, esto se lo puede realizar moviendo manualmente la solución o por medio de bombas aireadoras. El principal inconveniente en este sistema es que las plantas reciben menos nutrientes que en otro tipo de sistemas y se debe tener un mayor control de la limpieza del sistema debido al estancamiento del agua.

### Figura 11

#### *Técnica de raíz flotante*



*Nota.* Tomado de *Comparison of the advantages of hydroponic systems as agricultural alternatives in urban areas* (p. 45-54), por V. Albuja et al., 2021, *Minerva*, 2 (4).

- **Técnicas aéreas:** Esta consiste en mantener las raíces libres de cualquier otro medio quedando en contacto con el aire y dentro de un medio oscuro. La solución nutritiva se aplica por medio de nebulizadores, controlados por temporizadores (Albuja, et al, 2021). Esta técnica tiene varias ventajas empezando por un consumo de agua enormemente reducido, una mejor absorción de nutrientes en comparación con las otras técnicas,

eliminación del uso herbicidas y es un sistema que puede instalarse en cualquier lugar.

Su coste elevado y necesidad de conocimiento técnico son la mayor desventaja.

## Figura 12

### *Técnica aeropónica*



*Nota.* Tomado de *Comparison of the advantages of hydroponic systems as agricultural alternatives in urban areas* (p. 45-54), por V. Albuja et al., 2021, *Minerva*, 2 (4).

### **Ventajas y Desventajas**

Tomando la tabla comparativa realizada en el trabajo de Albuja et al. (2021), que se presenta en la **Figura 13**, se determina que las principales ventajas que presentan los sistemas hidropónicos es la factibilidad de sembrar en lugares en los cuales normalmente es muy difícil o limitado por las condiciones ambientales, se tiene una mayor absorción de nutrientes por las plantas lo cual conlleva a un menor tiempo de desarrollo de las mismas, gasto de agua muy reducido y en algunos casos el consumo de herbicidas se reduce drásticamente.

Por otro lado, las desventajas de este tipo de sistemas es el conocimiento técnico que se debe tener para la automatización, además de un especial cuidado en la administración de sustancia nutritiva al ser la única fuente de nutrientes de la planta, el coste de instalación llega a ser muy alto, y dependiendo del tipo de planta que se desee utilizar se tiene limitaciones según el sistema escogido.

Figura 13

*Ventajas y desventajas entre sistemas hidropónicos*

	Técnicas Hidropónicas	Ventajas	Desventajas	Impacto Ambiental
1	Técnica estacionaria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La acumulación de sales insolubles en el sustrato es mínima.</li> <li>• Tiene un bajo costo e independiente del uso de energía extra.</li> <li>• Permite cultivar en lugares donde hay condiciones ambientales limitantes.</li> <li>• Elimina la necesidad de utilizar herbicida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La absorción de nutrientes por parte de la planta es más lenta.</li> <li>• Nunca consigue recuperarse el 100% de la solución nutritiva.</li> <li>• No está disponible para todas las especies de plantas.</li> <li>• Requiere muchos detalles y atenciones particulares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El consumo de agua es considerablemente menor, dependiendo claro del clima.</li> <li>• El impacto ambiental de la hidroponía es considerablemente mucho menor, porque evita el uso de herbicidas.</li> </ul>
2	Técnica Recirculante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilita el tiempo de cosecha</li> <li>• Aprovechamiento del espacio</li> <li>• Ahorro de fertilizantes</li> <li>• La instalación es más sencilla</li> <li>• El crecimiento es mucho más rápido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de un cuidado adecuado</li> <li>• Necesita de luz propia para el crecimiento de las plantas</li> <li>• Gastos de instalación altos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor gasto de agua</li> <li>• Ahorra del 50% al 35% del uso de fertilizantes</li> <li>• Evita el uso de los pesticidas y plaguicidas</li> </ul>
3	Técnica Aeropónica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor tipos de cultivos</li> <li>• Menor agua y mas rendimiento</li> <li>• Conveniente en lugares urbanos</li> <li>• Posible desarrollo en sótanos o almacenes</li> <li>• Fácil de armar</li> <li>• Absorbe gran cantidad de vitaminas y minerales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor cantidad de cultivos</li> <li>• Depende de la solución nutritiva, sin errores</li> <li>• Para automatización requiere de mucho conocimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posibilidad de usar aguas grises</li> <li>• Agua que puede recircular</li> <li>• 90% menos agua que en otro sistemas hidropónicos</li> <li>• 95% menos agua que en cultivos en suelo</li> </ul>
4	Técnica de Sustratos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilita el manejo del cultivo.</li> <li>• Ofrece un buen drenaje y ahorra fertilizantes.</li> <li>• Cultivo fácil de esterilizar.</li> <li>• El sistema de riego es de fácil automatización.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasto de instalación alto.</li> <li>• Infraestructura más elaborada.</li> <li>• El sustrato es susceptible a cambios bruscos de temperatura.</li> <li>• Las plantas son sensibles al nivel de PH y a la temperatura de la solución.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ahorro de fertilizante y evita el uso de pesticidas por la facilidad de desinfección y control.</li> <li>• Reciclaje del sistema de riego.</li> </ul>

*Nota.* Tomado de *Comparison of the advantages of hydroponic systems as agricultural alternatives in urban areas* (p. 45-54), por V. Albuja et al., 2021, *Minerva*, 2 (4).

**Requerimientos del Sistema de Cultivo Hidropónico**

El cultivo hidropónico se realiza en recipientes donde se colocan nutrientes y demás sustancias específicas que se adquieren en comercios especializados, capaces de portar los alimentos que cada plante necesita. El elemento principal en este sistema de cultivo es el agua, por eso lo más importante es procurar un sistema de riego adecuado. Estos sistemas son fácilmente escalables ya que su construcción contiene implementos básicos de agricultura. En el trabajo de Escuderos et al. (2017), se listan los elementos necesarios para empezar un cultivo hidropónico simple, los cuales se describen a continuación:

- Recipiente: es donde la planta se desarrollará, depende del sistema que se utilice y el tamaño promedio de la planta a cultivar. Es indispensable que sea de un color oscuro de modo que las raíces no estén expuestas a la luz.

- Bomba aireadora: este elemento depende mucho del tipo de hidroponía a aplicar, pero su función es mantener oxigenada la solución nutritiva.
- Solución nutritiva: es una mezcla de minerales disueltos en agua que se esparce en las raíces de las plantas. Los nutrientes adecuados para la hidroponía son el calcio, el cobre, el azufre, el fósforo, el potasio, el zinc, el nitrógeno, el hierro, el oxígeno, entre otros.
- Sustrato: este sirve de soporte para las plantas y en algunos sistemas retiene los nutrientes que serán absorbidos por las raíces.
- Semillas: existe un tipo específico de semillas para hidroponía, pero es posible utilizar de cualquier tipo, siempre teniendo en cuenta el sistema hidropónico a utilizar.
- Bomba: esta se utiliza en todos los sistemas excepto en la de raíz flotante, ya que en este no es necesario la recirculación constante del agua.

### **Cultivo de Lechugas**

La lechuga es uno de los vegetales más fáciles de cultivar que cuenta con diversas variedades, se consume durante todas las épocas del año, por lo que siempre existe en el mercado gran demanda de este producto. Es una planta rica en principios vitamínicos que contiene 94.8% de agua, 1.2% de proteína, 0.2% de grasas, y 2.9% de hidratos de carbono. En crudo tiene elevadas dosis de vitaminas A, B, C y E, así como de minerales (Vizcarra, 2018).

### ***Requerimientos de Desarrollo***

La temperatura óptima de germinación oscila entre 18-20 °C, sin embargo, soporta temperaturas de hasta 30 °C máximo y -6 °C mínimo. Durante la fase de crecimiento del cultivo se requieren temperaturas entre 14-18 °C por el día y 5-8 °C por la noche. Esta planta es muy sensible a la falta de humedad y no admite la sequía, la humedad relativa conveniente es del 60 al 80% (Vizcarra, 2018).

### ***Etapas Fenológicas de la Planta de Lechuga***

Las etapas fenológicas son la relación entre los factores climáticos y los ciclos de vida de una planta, en este caso de las plantas de lechuga. En el trabajo de Vizcarra (2018) se definen cuatro etapas, las cuales son:

- Fase de plántula: esta fase dura de 3 a 4 semanas donde la temperatura idónea es de 12-21 °C, se da el crecimiento radicular y aparecen de 3 a 4 hojas reales.
- Fase de roseta: la planta empieza a desarrollarse creciéndole mayor cantidad de hojas y más grandes.
- Formación de cabeza: las hojas son más anchas que largas, comienzan a curvarse.
- Floración: la cabeza pierde calidad, el tallo se hace más largo y empieza el crecimiento de flores.

Mientras las etapas fenológicas avanzan la planta necesita de mayor cantidad de nutrientes, pero la temperatura idónea es la misma para un desarrollo óptimo.

### ***Plagas, Enfermedades y Fisiopatías***

Al igual que cualquier ser vivo, las plantas de lechuga pueden adquirir diferentes enfermedades y plagas como las siguientes: (AGRI NOVA Science, 2020):

- TRIPS (*Frankliniella occidentalis*): una plaga en la cual su principal peligro es la transmisión del virus TSWV que termina por matar la planta.
- MINADORES (*Liriomyza trifolii* y *Liriomyza huidobrensis*): plaga que se alimentan de las hojas de la planta, si el ataque es muy fuerte la planta se debilita y muere.
- MOSCA BLANCA (*Trialeurodes vaporariorum*): plaga que produce una melaza en las hojas dando lugar a un debilitamiento de la planta.
- PULGONES (*Myzus persicae*, *Macrosiphum solani* y *Narsonovia ribisnigri*): esta plaga aparece en las etapas finales de la planta casi llegando al cultivo, pueden generar virosis que imposibilite su cosecha.

- ANTRACNOSIS (*Marssonina panattoniana*): es una enfermedad que produce lesiones angulosas-circulares de color rojo oscuro en las hojas, esta se puede dar por enfermedad en la semilla o en el suelo donde se siembre.
- BOTRITIS (*Botrytis cinerea*): enfermedad en la cual se genera envejecimiento y putrefacción de las hojas, se da por un exceso de humedad.
- MILDIU VELLOSO (*Bremia lactucae*): enfermedad que da lugar al crecimiento de hongos en las hojas de la planta donde por un lado de la hoja se presenta una mancha amarilla y por el otro crecimiento de micelio vellosos, se genera por exceso de humedad.
- SEPTORIOSIS (*Septoria lactucae*): es una enfermedad producida por un hongo que genera manchas en las hojas inferiores de la lechuga.
- VIRUS DEL MOSAICO DE LA LECHUGA (LMV): virus transmitido por pulgones que hace que se presenten manchas verdes en forma de mosaico en las hojas de la lechuga.
- Latencia: fisiopatía en donde las semillas demoran más de lo esperado en germinar o algunas no lo hacen, por lo cual se recomienda realizar un procedimiento previo a la siembra.
- Tip Burn: fisiopatía en la cual se genera quemaduras en las puntas de las hojas, se da generalmente por falta de calcio, pero puede generarse también por desequilibrio de los riegos, demasiado calor, salinidad, exceso de nitrógeno y defecto de potasio.
- Espigado: se da un adelanto en la fase de floración causado por fotoperiodos muy largos, temperaturas elevadas, sequía en el suelo y exceso de nitrógeno.
- Antocianos: fisiopatía que presenta enrojecimiento en las hojas, se da cuando la planta es expuesta a bajas temperaturas durante largos periodos de tiempo.
- Punteado pardo: fisiopatía que se da por la exposición a etileno, hace que se presenten manchas color pardo en las hojas.

- Mancha parda: fisiopatía que produce manchas de color amarillo rojizo en las hojas, esto se debe al exceso de CO<sub>2</sub> especialmente a temperaturas bajas.
- Costilla rosada: esta fisiopatía se da generalmente en el almacenaje a grandes temperaturas haciendo que las nervaduras de las hojas tomen un color rojizo.

### **Nutrientes Necesarios**

Un adecuado manejo de la nutrición puede mejorar la calidad de la lechuga en términos de sabor, textura, tamaño y apariencia. Sin embargo, los requerimientos y fórmulas nutricionales pueden variar debido a las diferencias climatológicas y varietales, por tanto, no existe una solución nutritiva ideal. La **Figura 14** elaborada por Soto (2018) presenta un rango de valores óptimos de nutrientes para lechuga hidropónica en base a estudios realizados por diversos autores en diferentes países.

### **Figura 14**

*Nivel de nutrientes recomendados para lechuga hidropónica*

Nivel	Cationes			Aniones			Menores					
	Ca	K	Mg	N	S	P	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Mo
<b>Máximo</b>	300	497	126	235	228	77	5,57	0,15	7,00	1,15	3,00	0,15
<b>Mínimo</b>	20	45	15	90	22	20	0,20	0,02	0,3	0,04	0,07	0,01

*Nota.* Tomado de *Producción de lechuga con la técnica de lámina de nutrientes modificada (NFT)*, por F. Soto, 2018, *Universidad de Costa Rica*.

Para que estos nutrientes sean absorbidos por las raíces de las plantas, es necesario contar con un nivel de pH adecuado. Un pH muy ácido o muy alcalino limita la absorción de nutrimentos, lo que provoca deficiencia de éstos, aunque estén presentes en la solución nutritiva. Para el crecimiento de lechuga, se considera como un pH óptimo de 5.8, aunque también es aceptable rangos entre 5.6 y 6.0, ya que dentro de este rango se pueden obtener todos los nutrientes necesarios para la planta, como se observa en la **Figura 15** (AGRI NOVA Science, 2020).



En cuanto a la conductividad eléctrica de la solución, la cual mide la concentración de nutrientes disueltos en la solución nutritiva, se requiere un valor entre 1.5 a 2.2 mS/cm para climas con temperaturas elevadas, que es el caso que se tiene en el área del Valle de los Chillos donde se ubica el invernadero.

### Figura 15

*Rango aceptable de pH para el crecimiento de lechugas*



*Nota.* Tomado de *El cultivo de la lechuga*, por AGRI NOVA Science, 2020.

### Dispositivos de Control

Los controladores son equipos o sistemas que permiten automatizar procesos productivos para mejorar tiempos de ejecución, reducir las tasas de fallo y operar en ambientes peligrosos, sin la necesidad de la intervención humana. Miden las variables de un proceso a través de sensores, procesan esta información por medio de algoritmos de control, y generan acciones que modifican alguna variable del proceso. Su selección se rige por el tamaño de la aplicación y la complejidad del proceso a controlar (Revista Electroindustria, 2016).

### **PLC Controllino**

CONTROLLINO es un Controlador Lógico Programable (PLC) de grado industrial con software de código abierto, totalmente compatible con Arduino. Su principal característica es la completa compatibilidad con Arduino y su entorno de programación de software libre, lo que representa simplicidad y flexibilidad sin sacrificar la confiabilidad y rendimiento para la industria, ya que cumple con estándares de seguridad e industria como CE, UL e IEC 61131 (Controllino, 2022). Los PLC Controllino comerciales tienen las siguientes características:

- Hasta 21 canales de entrada y 24 canales de salida de 5V – 24V
- Hasta 16 Relés que soportan hasta 250V y 16A
- Comunicación Serial (UART), RS485, I<sup>2</sup>C o SPI
- Ethernet y USB
- Reloj en tiempo real integrado

### **Figura 16**

*Controllino MEGA*



*Nota.* Tomado de Controllino, 2022.

## **Shield CNC**

La CNC Shield para Arduino es una placa que permite controlar hasta 4 motores paso a paso de forma independiente. Dispone de todas las conexiones necesarias para interruptores de final de carrera, salidas de relé y varios sensores, además de comunicación I<sup>2</sup>C.

- Voltaje de alimentación (potencia): 12V-36V DC
- Shield compatible con Arduino Uno R3 y Arduino Leonardo
- Compatible con firmware GRBL
- Soporta hasta 4 ejes independientes (X, Y, Z y duplicar uno de los anteriores o crear un eje a medida con los pines D12 y D13)
- Conexión para 2 finales de carrera por cada eje (6 en total)
- Habilitador y dirección de Spindle
- Habilitador de refrigerante (coolant)
- Diseñado para drivers Pololu A4988 o DRV8825
- Jumpers para configurar el micro-stepping de los drivers
- Los motores se pueden conectar usando header o Molex hembra de 4 pines

### **Figura 17**

*Arduino SHIELD CNC*



*Nota.* Tomado de Naylamp Mechatronics, 2021.

### **ESP8266 NodeMCU**

El ESP8266 NodeMCU es una plataforma de desarrollo similar a Arduino especialmente orientada al Internet de las cosas (IoT). Este modelo está basado en el chip ESP8266, está diseñado especialmente para trabajar montado en protoboard o soldado sobre una placa, posee un regulador de voltaje de 3.3 V para alimentar la placa directamente del puerto micro-USB, y permite el desarrollo de aplicaciones en lenguaje Arduino (Naylamp Mechatronics, 2021). Las principales características del chip ESP8266 son:

- Voltaje de Alimentación: 5 V DC
- Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3 V DC
- Stack de Protocolo TCP/IP integrado
- Gestión completa del WIFI con amplificador incluido.
- 802.11 protocol y Wifi Direct (P2P) Soft-AP.
- Regulador y unidad de alimentación incluidos.
- Consumo en reposo <10 mW.
- Soporta antena externa para mayor alcance.
- Soporta el bus SPI.
- Procesador interno de 32 bits a 80 MHz y se le puede subir hasta 160 Mhz.
- 80 KB de DRAM, 35 KB de IRAM, memoria rápida para el procesador.
- 1 Mb de memoria Flash para nuestros programas.
- 30 Metros de alcance teórico.
- 16 pines GPIO programables.
- 1 pin analógico ADC

**Figura 18**

*ESP8266 NodeMCU*



*Nota.* Tomado de Naylamp Mechatronics, 2021.

**Internet de las Cosas (IoT)**

No existe una definición aceptada a nivel mundial, pero se puede definir el internet de las cosas como: “Una red abierta y completa de objetos inteligentes, físicos o virtuales, que tienen la capacidad de auto organizarse, compartir información, datos y recursos, reaccionar y actuar ante situaciones y cambios en el entorno” (Madakam et al., 2015). Principalmente constan de tres elementos: los dispositivos inteligentes que recolectan datos, la nube en la que se recopilan, analizan y almacenan los datos en tiempo real, y los algoritmos mediante los cuales se realizan análisis históricos para obtener información (González et al., 2020).

En general, las arquitecturas más conocidas obedecen a modelos organizados en capas, y de acuerdo a Madakam et al. (2015), se pueden resumir en cinco arquitecturas:

- Proyecto de investigación europeo FP7, el cual se basa en un esquema de árbol donde la raíz son las tecnologías a usarse, el tronco conjunto de habilitadores y por ultimo las hojas están las aplicaciones.
- Arquitectura de la UIT, toma como base el modelo OSI teniendo capas de detección, acceso, red, software intermedio y aplicación.
- Arquitectura del foro IoT, el cual se clasifica en 3 partes: procesadores, transporte, aplicaciones.

- Arquitectura de Zhang Jidong y Qian Xiaocong, proponen una arquitectura de 3 capas: la inferior de percepción donde se recopila la información, la capa media es la de transporte aquí se tiene todos los sistemas de comunicación y por último la capa de aplicación.
- Arquitectura de Kun Han, Shurong Liu, Dacheng Zhang y Ying Han, del año 2012.

### ***Protocolo IoT***

- MQTT: Es un protocolo de la capa de aplicación, que permite la comunicación de mensajes basado en el método publish/subscribe para recolectar datos de sensores remotos y transmitirlos hacia un servidor, funciona en redes con un ancho de banda pequeño. Esta comunicación máquina-máquina se da mediante interacciones asíncronas enrutadas a través de un bróker, que se encarga de redirigir los mensajes llamados “tópicos” de tipo string UTF-8 (González et al., 2020). Cuando un cliente publica un tópico, el bróker es el encargado de enviar el mensaje a todos los clientes suscritos a ese tópico. También se implementa calidades de servicio, que son:
  - QoS 0, en la cual solo se manda el mensaje una vez
  - QoS 1, se verifica que el mensaje llego, pero no si se repitió
  - QoS 2, se comprueba que el mensaje llegue solo una vez

### ***Entornos de Desarrollo***

- Node-RED: Es una herramienta de programación de código abierto, desarrollado por ingenieros de IBM, para conectar dispositivos de hardware, API y servicios en línea de formas nuevas e interesantes. Su entorno de ejecución se basa en Node.js que permite conectar el hardware y software del sistema, es decir desde el sensor hasta la nube, y proporciona un editor de flujo basado en navegador que facilita la interconexión de flujos de procesos mediante nodos que permiten varias funciones como Broker MQTT, control de pines GPIO, comunicación TPC, entre otros (Node-RED, 2022).

- MySQL: Es un tipo de lenguaje de programación de código abierto, desarrollado para trabajar con base a datos relacionales, ofrece una gran estabilidad, seguridad y gran soporte. MySQL sigue el estándar SQL-92 definido por el American National Standards Institute (ANSI) en ISO/IEC 9075:1922 (). Sus características más destacables son: bajo consumo de recursos (capacidad de procesamiento), permite el uso de tablas de gran tamaño (depende de la capacidad del host), gran estabilidad (MySQL, 2022).

### ***Plataformas IoT***

- Blynk: Es una plataforma IoT la cual ofrece aprovisionamiento de dispositivos, visualización de sensores, control remoto de aplicaciones móviles y web, servicio de nube, análisis de datos, entre otras opciones. Sus principales características son: aplicaciones móviles y web sin código, servicios de API, gran gama de hardware compatible, nube incluida, actualizaciones por aire, aprovisionamiento de WiFi (Blynk, 2022)
- PlanetScale: Es una plataforma de base de datos compatible con MySQL, con tecnología Vitess que ofrece servicio 24/7 sin interrupciones. Cuenta con una interfaz de línea de comandos para controlar casi todo en la instancia de PlanetScale y presenta grandes ventajas como la escalabilidad, la capacidad para implementar cambios de esquema en línea sin bloquear las cargas de trabajo de producción, y gran estabilidad entre peticiones y conexiones (PlanetScale, 2022).

## Capítulo 3

### Metodología

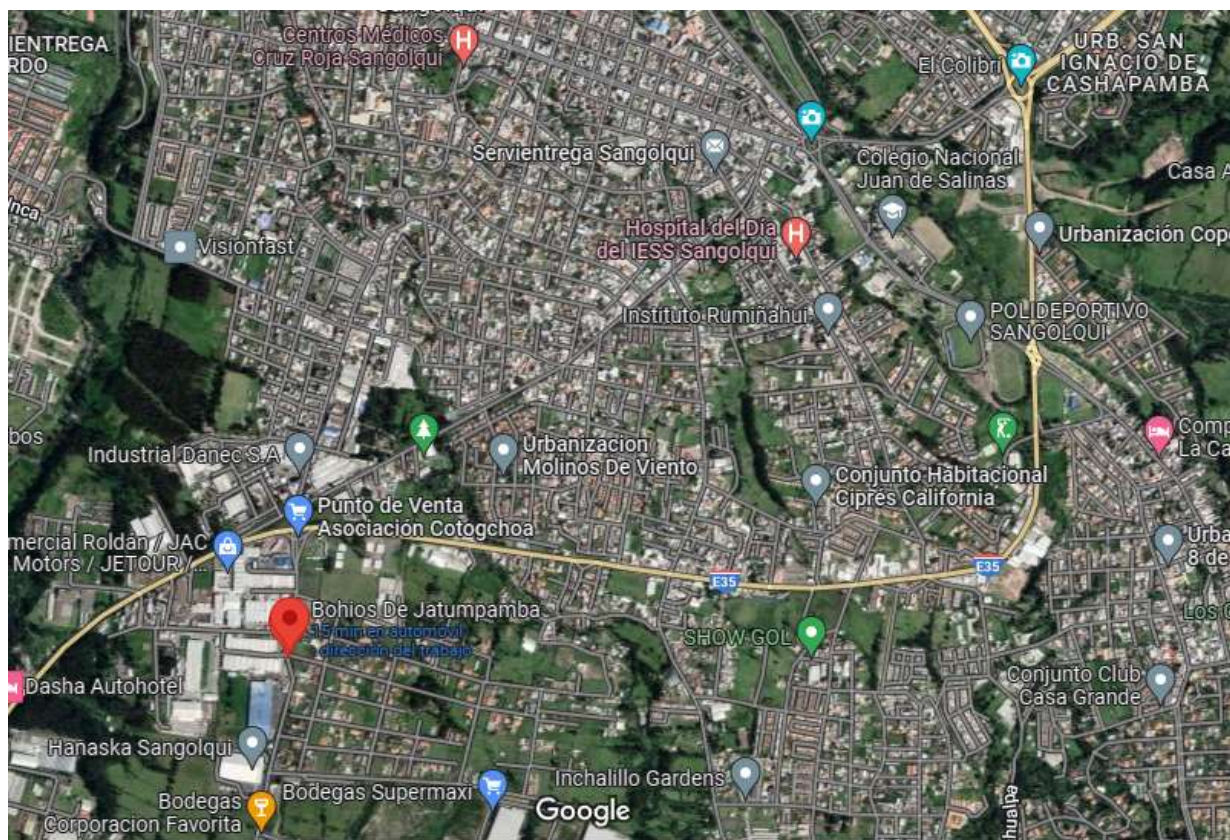
#### Características del Invernadero Hidropónico

##### *Localización del Invernadero*

El proyecto será desarrollado para la empresa “Aeroponía del Valle”, ubicada en la provincia de Pichincha, cantón Rumiñahui, ciudad Sangolquí, en la Avenida General Enríquez y calle A, propiedad del Ingeniero Jonathan Larenas.

#### Figura 19

*Ubicación geográfica del invernadero de la empresa “Aeroponía del Valle”*



Nota. Tomado de Google Maps, 2022.



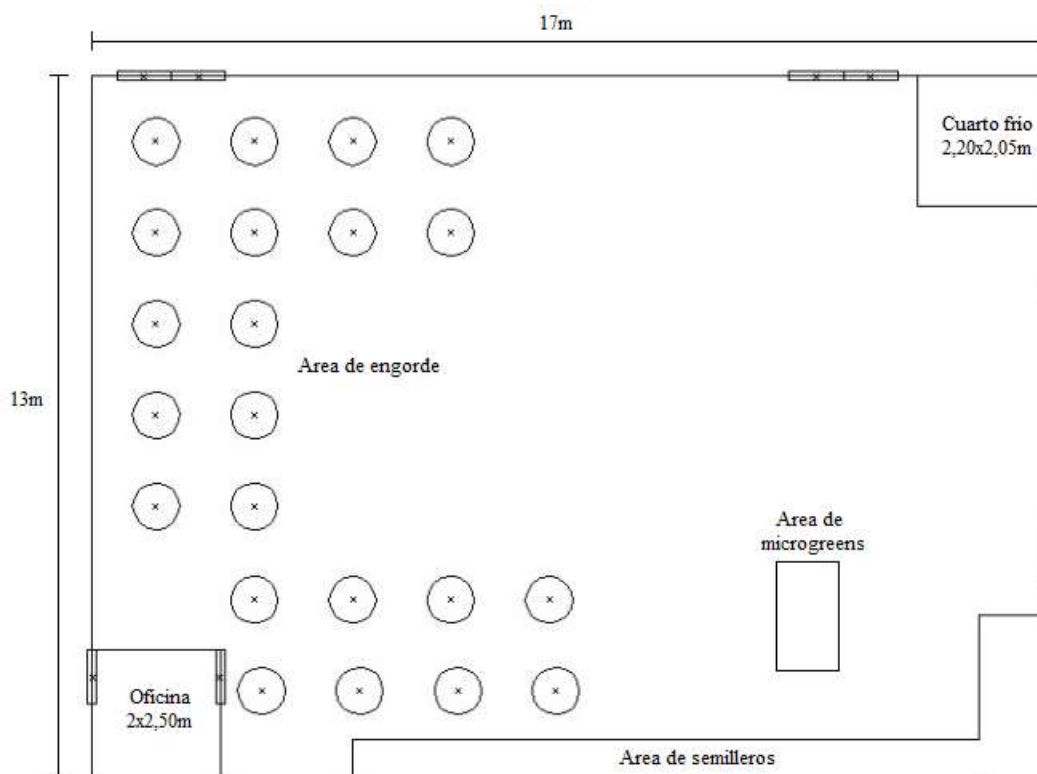
### Características del Invernadero

El invernadero de la empresa “Aeroponía del Valle” es de tipo capilla con un techo de forma ojival, tiene dos puertas de ingreso y 8 ventanas. Sus dimensiones son de 17 m de largo, 13 m de ancho y 3 m de altura al punto más alto.

Cuenta con una oficina donde está ubicado el tablero de control, un cuarto frío donde se almacenan los productos una vez cosechados, y tres áreas de producción: semilleros, engorde y microgreens. La disposición actual del invernadero con la que se trabajó en este proyecto se muestra en la **Figura 20**.

### Figura 20

*Esquema del invernadero de la empresa “Aeroponía del Valle”*



**Figura 21**

*Invernadero de la empresa “Aeroponía del Valle”*

***Tipo de Cultivo a Realizarse***

El cultivo que se va a realizar para este proyecto es de lechuga del tipo mantecosa o Buttercrunch, como se observa en la **Figura 22**, cuyas dimensiones son 12-15 cm de ancho y 5-12 cm de alto aproximadamente. Las plántulas se obtendrán a partir de semillas que serán germinadas en el área de semilleros hasta que empiecen a crecer 2-3 hojas, y posteriormente se las ubicará en el área de engorde, donde se desarrollarán hasta su maduración y posterior cosecha. En el área de microgreens también se germinarán otras semillas que se desarrollarán hasta alcanzar su etapa final.

El tipo de riego será por hidroponía de flujo y reflujo para el área de semilleros, y por aeroponía de alta presión para el área de engorde y de microgreens. Las variables óptimas de temperatura, humedad, pH, conductividad eléctrica, tiempo y frecuencia de riego, se describen en la **Tabla 1**.

**Figura 22**

*Lechuga tipo mantecosa o Buttercrunch*



*Nota.* Tomado de Honest Seed Co, 2023.

**Requerimientos del Sistema**

Los requerimientos o métricas son dispuestos por la empresa de acuerdo a sus necesidades para el cultivo hidropónico y aeropónico.

- Para el control de riego y fertilización, se necesita medir en los tanques de solución los niveles de llenado (alto-medio-bajo), los niveles de pH (5.5- 6.5) y la conductividad eléctrica (500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en microgreens, 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en semilleros y 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en engorde).
- Se debe configurar la frecuencia y duración del riego de acuerdo a cada unidad de cultivo, así para los microgreens se realiza el riego cada hora durante 20 segundos, para los semilleros se tienen riegos programados cada 3 horas, y para las torres de engorde se realiza el riego cada 20 minutos durante 20 segundos
- Para el control de climatización, se necesita mantener la temperatura ambiente entre 24 y 27 °C y la humedad relativa entre 60-80%

- Para el control de plagas, se debe realizar un riego programado de solución fumigante a las 6AM y 6PM durante 30 segundos los días lunes, miércoles y viernes
- El sistema se debe conectar con WiFi para poder realizar un monitoreo y control del sistema de forma remota que permita la lectura de sensores, el accionamiento de los actuadores y la notificación de alertas emergentes

### **Diseño e Implementación del Sistema**

El objetivo del presente proyecto es automatizar de manera eficiente el sistema de riego y climatización para la granja hidropónica de la empresa “Aeroponía del Valle”, para lo cual se clasificará en tres subsistemas: hidráulico, eléctrico y de control. Se realizará el dimensionamiento y selección de los componentes necesarios para la automatización, y el diseño del sistema de control y monitoreo de variables críticas para el sistema.

#### ***Subsistema Hidráulico***

El sistema de riego y climatización de la empresa “Aeroponía del Valle”, previo a la automatización, estaba formado por los siguientes componentes:

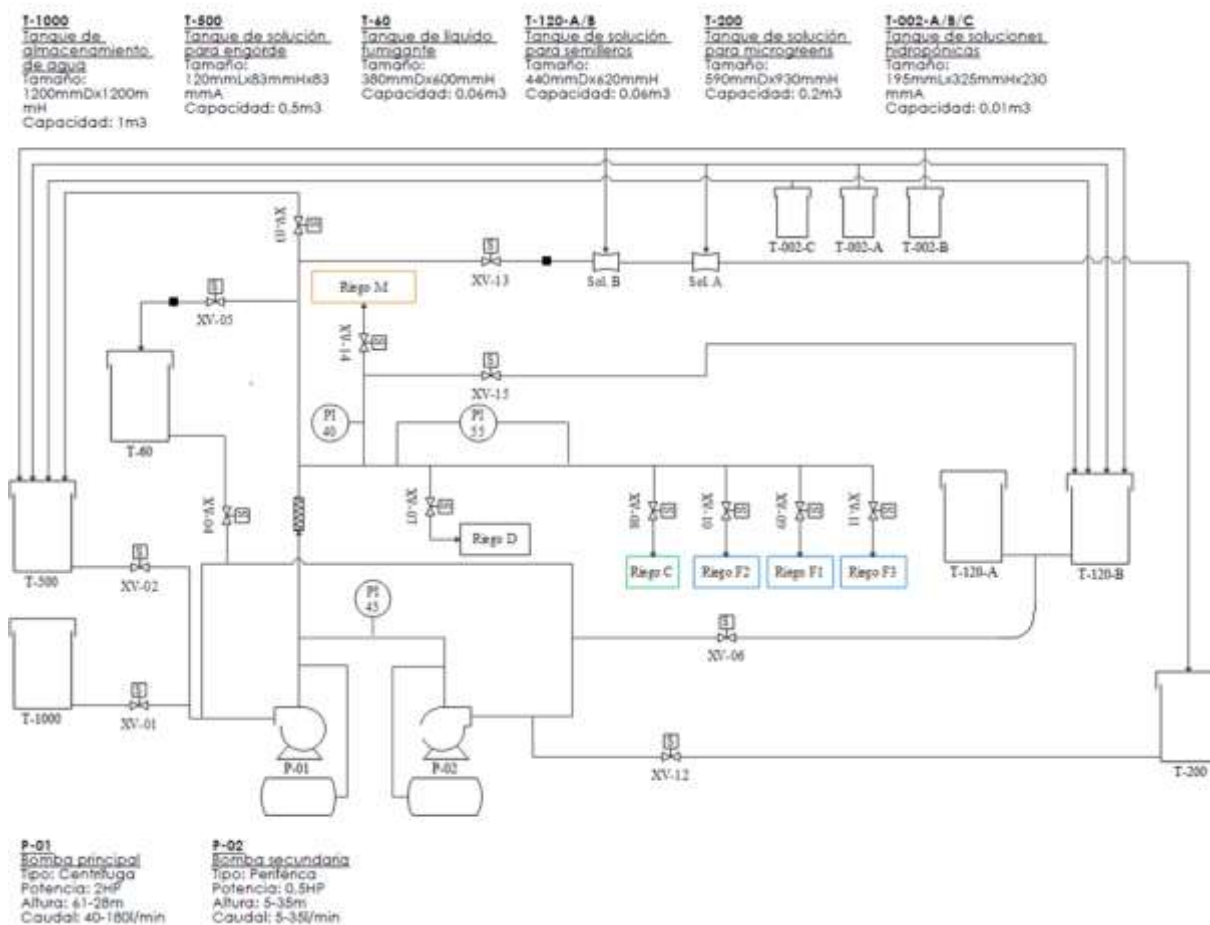
- Cabezal de riego: Incluye todos los elementos que intervienen en el control del sistema, como los recipientes, el equipo de bombeo, el equipo de filtrado, el equipo de regulación y el equipo de inyección de fertilizantes.
- Sistema de distribución: Se refiere a las tuberías de alimentación y de distribución para el riego. Estas se conectan por medio de accesorios que permiten unir, desviar, cambiar diámetros, conectar válvulas y emisores.
- Elementos de control: Son las válvulas que permiten el paso del líquido de riego.
- Emisores: Son los microaspersores ubicados en cada línea de riego.

El sistema de riego suplirá agua para riego y nutriente o fertilizante, que serán controladas por electroválvulas. Las líneas de alimentación de todos los riegos se encuentran acoplados a una línea principal a la salida de la bomba. Existen 4 riegos distintos: el riego C

tiene 5 líneas con 30 aspersores en total, el riego B tiene 7 líneas con 22 aspersores en total, el riego M tiene 4 líneas con 1 aspersor cada una, y el riego D tiene 8 salidas de agua libre con 8 retornos correspondientes. La **Figura 23** y la **Figura 24** muestra el diagrama P&ID del sistema inicial, previo a la automatización. Los equipos principales del sistema de riego se detallan a continuación.

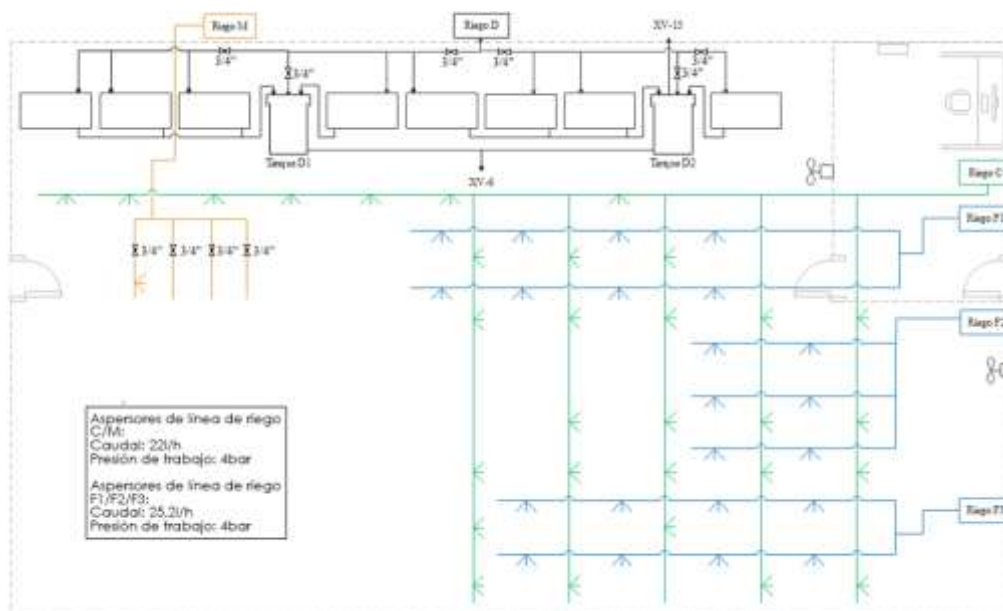
### Figura 23

*Diagrama P&ID de la línea de alimentación del sistema previo a la automatización*



**Figura 24**

*Diagrama P&ID de la línea de riego del sistema previo a la automatización*



### **Bombas**

- Bomba Multietapa ESPA Prisma 35N

Electrobomba centrífuga multietapa monobloc en ejecución horizontal diseñadas para la presurización de viviendas domésticas, pequeños sistemas de riego y aplicaciones de bombeo de agua limpia donde se requiera una bomba robusta y compacta.

**Figura 25**

*Bomba ESPA Prisma 35N*



*Nota.* Tomado de ESPA, 2022.

- Bomba LEO APM37

Bomba periférica recomendada para el bombeo de agua limpia, apta para uso doméstico e industrial, especialmente en sistemas automáticos de riego y pequeños equipos de presión.

### **Figura 26**

*Bomba LEO APm37*



*Nota.* Tomado de LEO GROUP PUMP CO. LTD., 2022.

### **Válvulas**

- Válvula Aquanet PLUS AC/DC

Válvulas reguladoras de presión operadas eléctricamente, que permiten el cierre y la regulación en forma manual (por medio de una perilla que hace el cierre mecánico). Están especialmente diseñadas para invernaderos (en riego en pulsos en hidroponía y pulsos en nebulización) y aplicaciones en jardinería.

### **Figura 27**

*Válvula Aquanet PLUS*



*Nota.* Tomado de NETAFIM, 2022.

- Válvula K-Rain 7001

Este tipo de electroválvulas de riego disponen de una membrana inclinada que permite un mejor paso a las impurezas, e incluyen un filtro de 50 mesh para auto limpieza, por lo que es ideal para usar con agua potable o reciclada. Gracias a su diseño minimiza el estrangulamiento del caudal reduciendo al mínimo la pérdida de carga, y permite controlar el flujo de agua, la apertura manual interna y el núcleo del solenoide cautivo.

### **Figura 28**

*Válvula K-Rain 7001*



*Nota.* Tomado de Euro-Rain, S.L., 2022.

- Válvula Cepex CPV

Válvula solenoide de irrigación para aplicaciones residencial, comercial y agrícola.

### **Figura 29**

*Válvula Cepex CPV*



*Nota.* Tomado de Cepex, 2022.



## **Aspersores**

- Aspersor TEFEN de spray cónico sin goteo

Boquillas de riego de spray cónico sin goteo, adecuado tanto para aplicaciones residenciales como comerciales. Produce una fina niebla y cuenta con diseño anti obstrucciones.

### **Figura 30**

*Aspersor TEFEN de spray cónico sin goteo*



*Nota.* Tomado de Tefen, 2022.

- Aspersor Netafim CoolNet Pro

Nebulizador estático superfino, especialmente diseñado para enfriar y humedecer invernaderos y ganado, y para regar sobre mesas de enraizamiento.

### **Figura 31**

*Aspersor Netafim CoolNet Pro*



*Nota.* Tomado de NETAFIM, 2022.

### **Problemática del sistema**

La bomba funcionaba con un presostato y un tanque hidroneumático que acumulaba la presión para de esta manera reducir los arranques de la bomba, sin embargo, al tener una sola bomba para todos los riegos, las soluciones de cada tanque llegaban al tanque hidroneumático y se estancaban, es decir que se mezclaban las soluciones de cada riego con la solución fumigante, lo cual no es conveniente para el buen desarrollo de las plantas. Por esta razón se decidió retirar los tanques hidroneumáticos y reemplazarlo con un presurizador que cumpla con la misma función, pero de una manera más óptima.

La bomba se reguló con una presión de trabajo de 6 bares para abastecer a los aspersores del riego de engorde, sin embargo, la presión nominal de los aspersores del riego de fumigación y microgreens es de 4 bares, por lo que se debe regular la presión de las líneas de riego, de modo que los aspersores trabajen bajo condiciones normales.

Otro inconveniente fue que la purga de todos los tanques se derivaba a la entrada del tanque B, y para realizar la purga el operario debía desconectar la tubería para que el líquido caiga libremente fuera del sistema, ya que no se contaba con una válvula exclusiva para la purga. Entonces se propuso ubicar una válvula de purga en un espacio de la línea de impulsión que sea común para todos los riegos, y poder ser accionada por el operario cuando se requiera.

Finalmente, en los semilleros existía una falta de uniformidad al inundar las bandejas ya que, debido a la distancia de cada cama de cultivo, las camas más cercanas a la entrada de agua se llenaban más rápido que las camas de los extremos, de modo que el nivel de agua de estas últimas no llegaba a ser suficiente para inundar las semillas situadas en las bandejas de cultivo. Para solucionar este problema, se propone ubicar válvulas reguladoras en todas las entradas de agua para regular el caudal y lograr que el nivel de agua sea el mismo en todas las camas de cultivo.

### Dimensionamiento del sistema

La empresa desea, en lo posible, trabajar con la bomba que disponen, por lo que se realizarán los cálculos de caudales y pérdidas para determinar si el sistema puede funcionar correctamente con las bombas y el sistema de tuberías que posee actualmente. Los cálculos se realizarán para cada riego y así poder establecer cuál es el más crítico.

En una tubería, las pérdidas se dan por la fricción del fluido en movimiento o por elementos que intervengan en la tubería como tee, codos, válvulas, etc., y dan como resultado una disminución en la presión entre dos puntos en el sistema de flujo o tubería. Los cálculos se realizarán a partir de la ecuación de Hazen-Williams para sistemas de riego presurizados, con un coeficiente de rugosidad de 145 para tuberías de PVC.

$$h_f = 1.1316 \times 10^9 \left( \frac{Q}{C} \right)^{1.852} \cdot \frac{L}{d^{4.87}} \quad (1)$$

### Riego C: Fumigación

El riego C trabaja con un total de 30 aspersores distribuidos en el área de cultivo, su función es dispersar líquido fumigante en todo el invernadero para combatir las plagas que pueden afectar el cultivo. Los aspersores utilizados son Netafim Coolnet Pro, que trabajan a una presión de 4 bares y un caudal de 0.02016 m<sup>3</sup>/h para las 4 boquillas que posee.

Se considerarán dos puntos críticos en la línea de riego, que corresponden a los aspersores más lejanos respecto a la bomba. En la **Figura 32** se pueden observar estos puntos denominados A y A'.

Figura 32

Línea de riego C

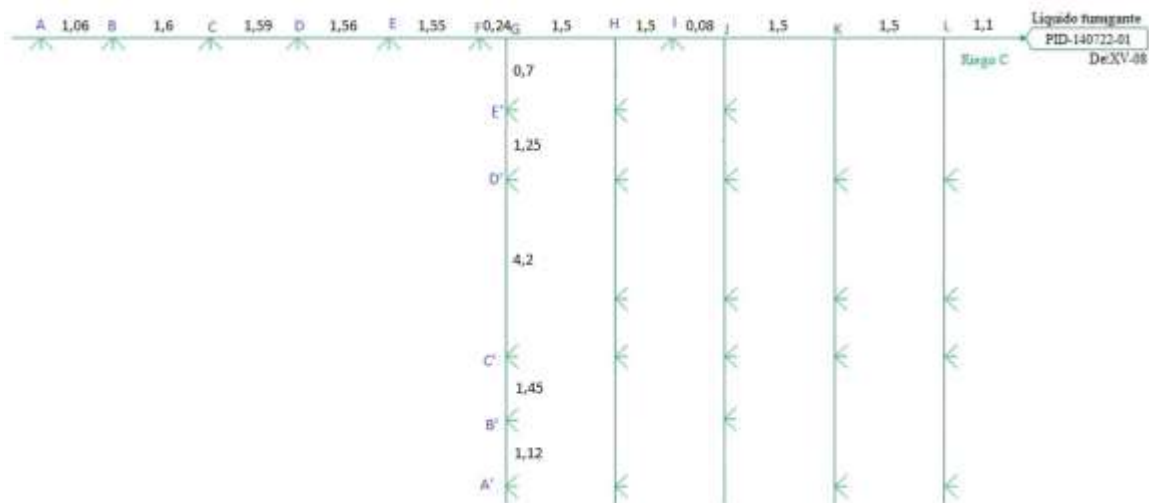


Figura 33

Calculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de riego - C)

1	A-B	B-C	C-D	D-E	E-F	F-G	G-H	H-I	I-J	J-K	K-L	L-M	M-N	hf total [m]
# aspersores	1	2	3	4	5	6	11	16	17	22	26	30	0	
Q [m <sup>3</sup> /h]	0,0202	0,0403	0,0605	0,0806	0,1008	0,1210	0,2218	0,3226	0,3427	0,4435	0,5242	0,6048	0,6048	
C	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	
L [m]	1,06	1,6	1,59	1,56	1,55	0,24	2,5	2,5	0,08	2,5	2,5	2,1	2,23	
d [mm]	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
hf [m]	0,0001	0,0005	0,0010	0,0017	0,0025	0,0005	0,0176	0,0352	0,0013	0,0635	0,0865	0,0947	0,1006	0,4056

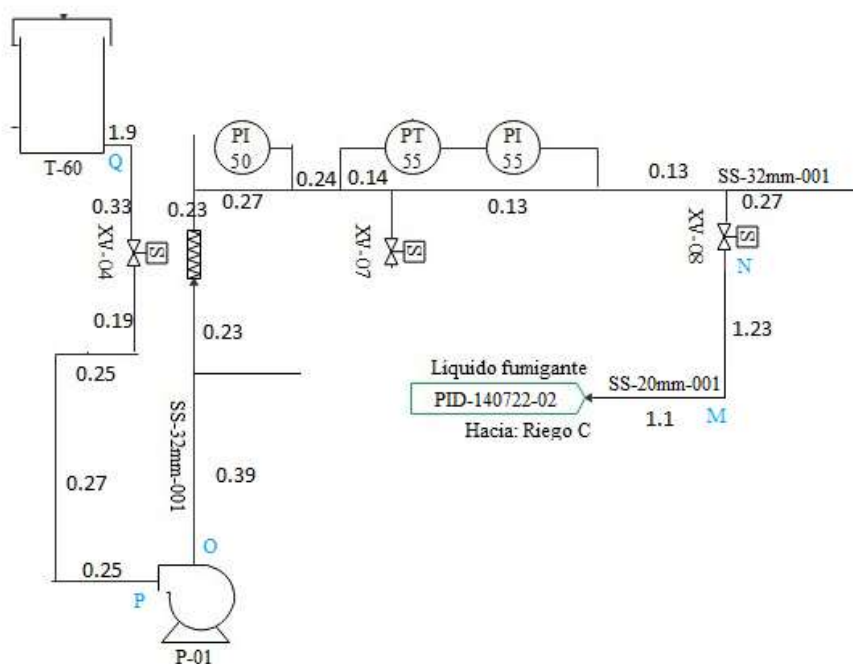
2	A'-B'	B'-C'	C'-D'	D'-E'	E'-G	G-H	H-I	I-J	J-K	K-L	L-M	M-N	hf total [m]
# aspersores	1	2	3	4	5	11	16	17	22	26	30	0	
Q [m <sup>3</sup> /h]	0,0202	0,0403	0,0605	0,0806	0,1008	0,2218	0,3226	0,3427	0,4435	0,5242	0,6048	0,6048	
C	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	
L [m]	1,12	1,45	4,2	1,25	0,7	2,5	2,5	0,08	2,5	2,5	2,1	2,23	
d [mm]	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
hf [m]	0,0001	0,0004	0,0027	0,0014	0,0011	0,0176	0,0352	0,0013	0,0635	0,0865	0,0947	0,1006	0,4049

Para asegurar que el último aspersor cumpla con el caudal y presión requeridos, se analizan las pérdidas obtenidas al final de la línea de riego, justo antes de la válvula de riego, de acuerdo con los dos puntos críticos donde se ubican los aspersores. Se observa que la mayor pérdida se presenta con el aspersor del punto A, por lo que se considera este valor para el cálculo total de pérdidas.

A partir de la electroválvula de riego, el cálculo se realiza de acuerdo a las longitudes de tubería y las longitudes equivalentes de los accesorios existentes en el camino que recorre la solución nutritiva, desde el tanque a la bomba (línea de succión) y de la bomba hasta la válvula de riego (línea de impulsión). La **Figura 34** muestra las líneas mencionadas correspondientes al riego C.

**Figura 34**

*Línea de impulsión y succión de la bomba para riego C*



**Figura 35**

*Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de impulsión de bomba - C)*

N-O	Válvula	Tee	Codo 90°	Electrov.	Filtro			Q [m <sup>3</sup> /h]	0,6048
Leq [m]	0,15	2	2	1	0,5			C	145
#elementos	1	7	0	1	1			L [m]	2,03
Leq total	0,15	14	0	1	0,5	15,65		L+Leq [m]	17,68
								d [mm]	28,8
hf altura [m]	2,35							hf [m]	0,061182

Al determinar la longitud total de la tubería, es decir la longitud real más la longitud equivalente de los accesorios, se calcula la pérdida total en la línea de impulsión. Además, se considera como pérdida la distancia vertical entre la línea central de la bomba y el punto más alto de la línea de riego.

### Figura 36

*Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de succión de bomba - C)*

P-Q	Tee	Codo 90°	Electrov.					Q [m <sup>3</sup> /h]	0,6048
Leq [m]	2	2	0,025					C	145
#elementos	2	2	1					L [m]	3,19
Leq total	4	4	0,025	8,025				L+Leq [m]	11,215
								d [mm]	28,8
hf altura [m]	0,08							hf [m]	0,03881

De igual manera se obtiene la pérdida en la línea de succión, y la pérdida por altura que se considera es la distancia vertical entre la línea central de la bomba y el nivel de agua del tanque.

### Riego B: Engorde

El riego B se divide en tres secciones F1, F2 y F3, las cuales trabajan con 8, 6 y 8 aspersores respectivamente. Su función es dispersar solución nutritiva en las torres de engorde donde se desarrollarán las plantas hasta estar listas para su cosecha. Los aspersores utilizados son Tefen de spray cónico sin goteo, que trabajan a una presión de 6 bares y un caudal de 0.0318 m<sup>3</sup>/h para las 5 boquillas que posee.

Figura 37

Línea de riego B

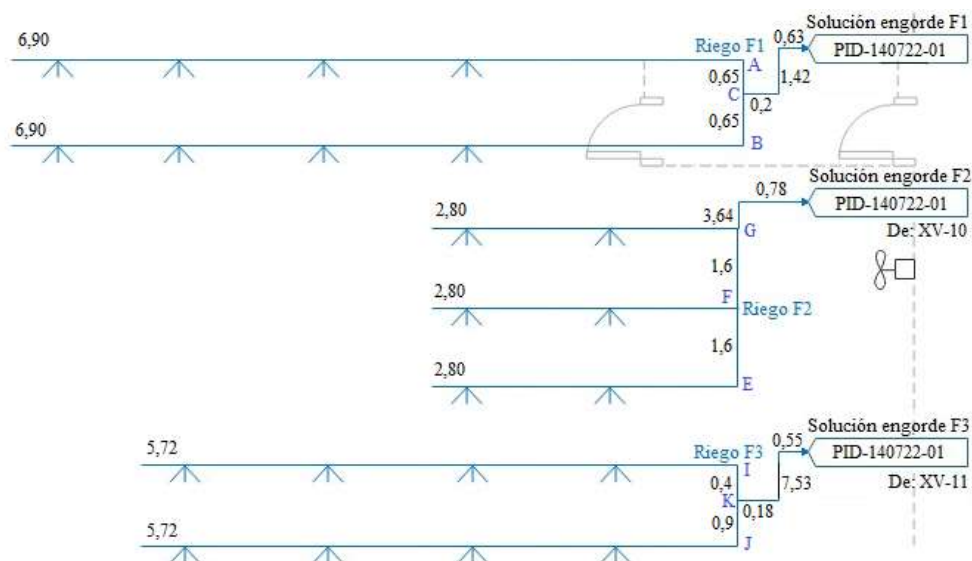


Figura 38

Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de riego - B)

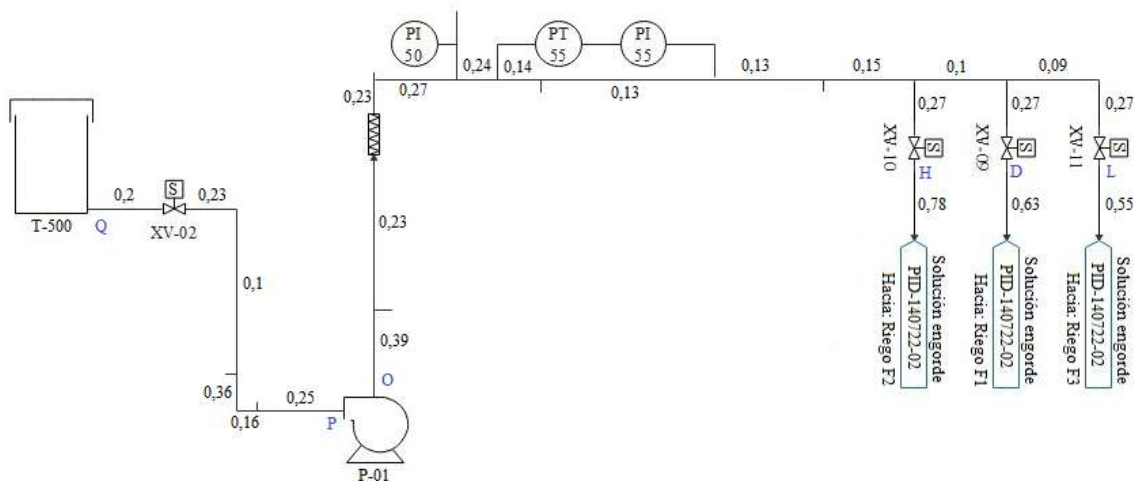
F1	A-C	B-C	C-D	hf total [m]	F3	I-K	J-K	K-L	hf total [m]	
# aspersores	4	4	0			# aspersores	4	4		0
Q [m <sup>3</sup> /h]	0,1272	0,1272	0,2544			Q [m <sup>3</sup> /h]	0,1272	0,1272		0,2544
C	145	145	145			C	145	145		145
L [m]	1,65	1,65	5,25			L [m]	1,4	1,9		11,26
d [mm]	17	17	17			d [mm]	17	17		17
hf [m]	0,0041	0,0041	0,0476	0,0559	hf [m]	0,0035	0,0048	0,1021	0,1104	
F2	E-F	F-G	G-H	hf total [m]						
# aspersores	2	4	6							
Q [m <sup>3</sup> /h]	0,0636	0,1272	0,1908							
C	145	145	145							
L [m]	2,6	2,6	6,42							
d [mm]	17	17	17							
hf [m]	0,0018	0,0065	0,0342	0,0425						

A partir de la electroválvula de riego, el cálculo se realiza de acuerdo a las longitudes de tubería y las longitudes equivalentes de los accesorios existentes en el camino que recorre la solución nutritiva, desde el tanque a la bomba (línea de succión) y de la bomba hasta la

válvula de riego (línea de impulsión). La **Figura 39** muestra las líneas mencionadas correspondientes al riego B.

**Figura 39**

*Línea de impulsión y succión de la bomba para riego B*



**Figura 40**

*Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de impulsión de bomba - B)*

D-O	Válvula	Tee	Codo 90°	Electrov.	Filtro		<b>F1</b>	Q [m3/h]	0,2544
Leq [m]	0,15	2	2	1	0,5			C	145
#elementos	1	9	0	1	1			L [m]	2,28
Leq total	0,15	18	0	1	0,5	19,65		L+Leq [m]	21,93
hf altura [m]	1,75							d [mm]	28,8
								hf [m]	0,015264
H-O	Válvula	Tee	Codo 90°	Electrov.	Filtro		<b>F2</b>	Q [m3/h]	0,1908
Leq [m]	0,15	2	2	1	0,5			C	145
#elementos	1	8	0	1	1			L [m]	2,18
Leq total	0,15	16	0	1	0,5	17,65		L+Leq [m]	19,83
hf altura [m]	2,7							d [mm]	28,8
								hf [m]	0,008101
L-O	Válvula	Tee	Codo 90°	Electrov.	Filtro		<b>F3</b>	Q [m3/h]	0,2544
Leq [m]	0,15	2	2	1	0,5			C	145
#elementos	1	9	1	1	1			L [m]	2,37
Leq total	0,15	18	2	1	0,5	21,65		L+Leq [m]	24,02
hf altura [m]	1,67							d [mm]	28,8
								hf [m]	0,016718



Al determinar la longitud total de la tubería, es decir la longitud real más la longitud equivalente de los accesorios, se calcula la pérdida total en la línea de impulsión. Además, se considera como pérdida la distancia vertical entre la línea central de la bomba y el punto más alto de la línea de riego.

### Figura 41

*Cálculos de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de succión de bomba - B)*

P-Q	Tee	Codo 90°	Electrov.		F1	Q [m3/h]	0,2544		F3	Q [m3/h]	0,2544
Leq [m]	2	2	0,025			C	145			C	145
#elementos	2	2	1			L [m]	1,3			L [m]	1,3
Leq total	4	4	0,025	8,025		L+Leq [m]	9,325			L+Leq [m]	9,325
						d [mm]	28,8			d [mm]	28,8
hf altura [m]	-0,32					hf [m]	0,00649			hf [m]	0,00649
					F2	Q [m3/h]	0,1908				
						C	145				
						L [m]	1,3				
						L+Leq [m]	9,325				
						d [mm]	28,8				
						hf [m]	0,00381				

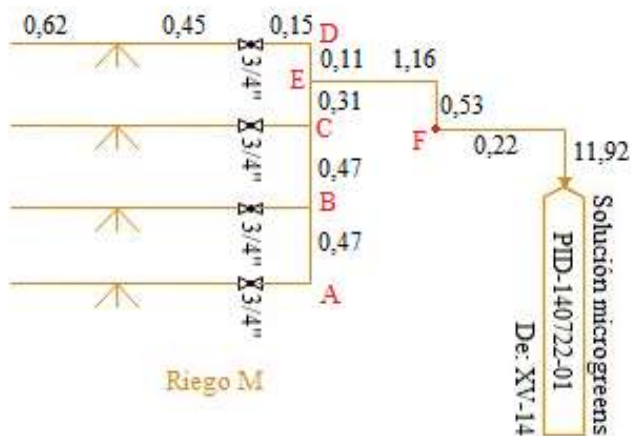
Se realiza el mismo proceso para obtener la pérdida en la línea de succión, y la pérdida por altura que se considera es la distancia vertical entre la línea central de la bomba y el nivel de agua del tanque. En este caso las 3 líneas de riego comparten el mismo tanque de solución.

### Riego M: Microgreens

El riego M cuenta con 4 aspersores, cada uno está ubicado a diferente altura en la estantería donde se ubica las bandejas. Su función es dispersar solución nutritiva en las bandejas que contienen las semillas de microgreens. Los aspersores utilizados son Netafim Coolnet Pro, que trabajan a una presión de 4 bares y un caudal de 0.02016 m<sup>3</sup>/h para las 4 boquillas que posee.

**Figura 42**

Línea de riego M

**Figura 43**

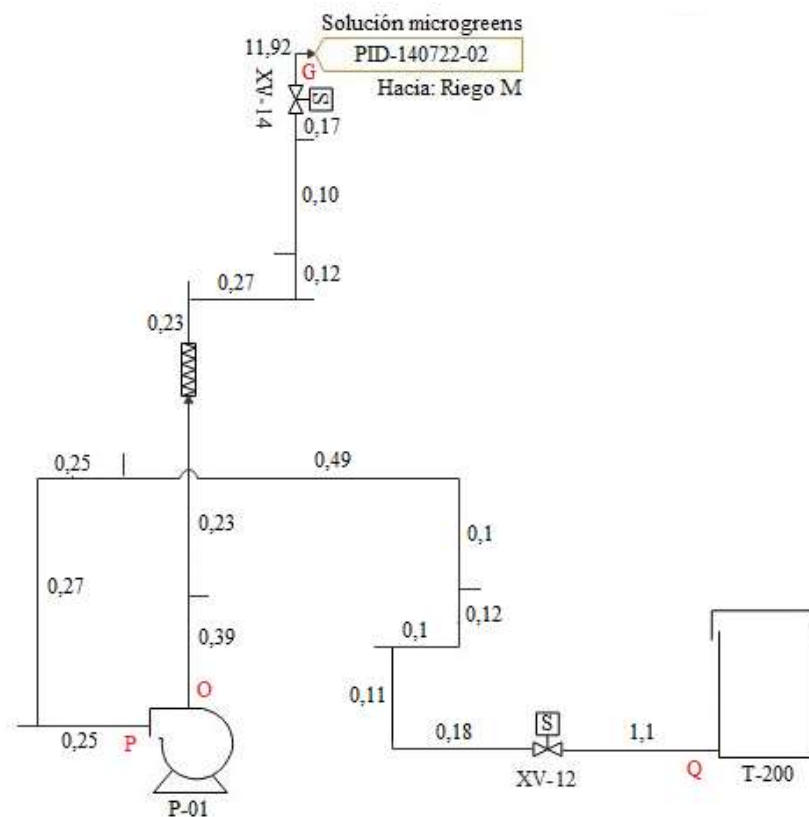
Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de riego - M)

	A-B	B-C	C-E	D-E	E-F	F-G	hf total [m]
# aspersores	1	2	3	1	0	0	
Q [m <sup>3</sup> /h]	0,0202	0,0403	0,0605	0,0202	0,0806	0,0806	
C	145	145	145	145	145	145	
L [m]	1,62	1,62	1,46	1,26	3,69	16,49	
d [mm]	17	17	17	17	17	28,8	
hf [m]	0,0001	0,0005	0,0009	0,0001	0,0040	0,0014	0,0070

A partir de la electroválvula de riego, el cálculo se realiza de acuerdo a las longitudes de tubería y las longitudes equivalentes de los accesorios existentes en el camino que recorre la solución nutritiva, desde el tanque a la bomba (línea de succión) y de la bomba hasta la válvula de riego (línea de impulsión). La **Figura 44** muestra las líneas mencionadas correspondientes al riego M.

**Figura 44**

Línea de impulsión y succión de la bomba para riego M

**Figura 45**

Cálculos de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de impulsión de bomba - M)

G-O	Tee	Codo 90°	Electrov.	Filtro				Q [m <sup>3</sup> /h]	0,0806
Leq [m]	2	2	1	0,5				C	145
#elementos	6	0	1	1				L [m]	1,51
Leq total	12	0	1	0,5	13,5			L+Leq [m]	15,01
								d [mm]	28,8
hf altura [m]	0,785	0,595						hf [m]	0,001244257

Al determinar la longitud total de la tubería, es decir la longitud real más la longitud equivalente de los accesorios, se calcula la pérdida total en la línea de impulsión. Además, se considera como pérdida la distancia vertical entre la línea central de la bomba y el punto más alto de la línea de riego.

Se realiza el mismo proceso para obtener la pérdida en la línea de succión, y la pérdida por altura que se considera es la distancia vertical entre la línea central de la bomba y el nivel de agua del tanque.

**Figura 46**

*Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de succión de bomba - M)*

P-Q	Tee	Codo 90°	Electrov.					Q [m <sup>3</sup> /h]	0,0806
Leq [m]	2	2	0,025					C	145
#elementos	4	4	1					L [m]	2,97
Leq total	8	8	0,025	16,025				L+Leq [m]	18,995
								d [mm]	28,8
hf altura [m]	-0,085							hf [m]	0,001574595

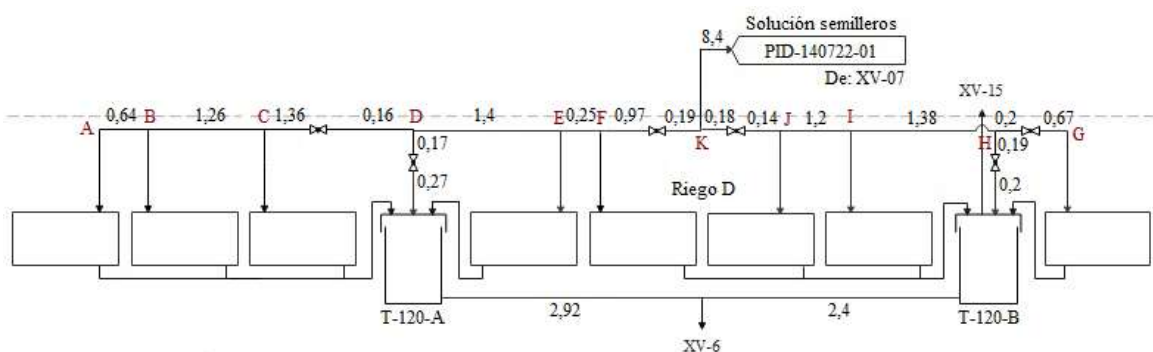
### Riego D: Semilleros

El riego D no tiene aspersores ya que es un riego de flujo y reflujó, entonces la mezcla de solución nutritiva fluye libremente por las mangueras para inundar los semilleros, y después de un tiempo determinado las válvulas se cierran y la mezcla se drena de vuelta al tanque de solución nutritiva. Su función es suministrar solución nutritiva a las semillas ubicadas dentro de las bandejas de cultivo para obtener las plántulas que pasarán a la etapa de engorde.

Para resolver el problema de la falta de uniformidad en el llenado de los semilleros, se ubicaron válvulas reguladoras de caudal en cada manguera de entrada, de modo que el valor de caudal sea de 0.27 m<sup>3</sup>/h para todas las entradas.

**Figura 47**

*Línea de riego D*



**Figura 48**

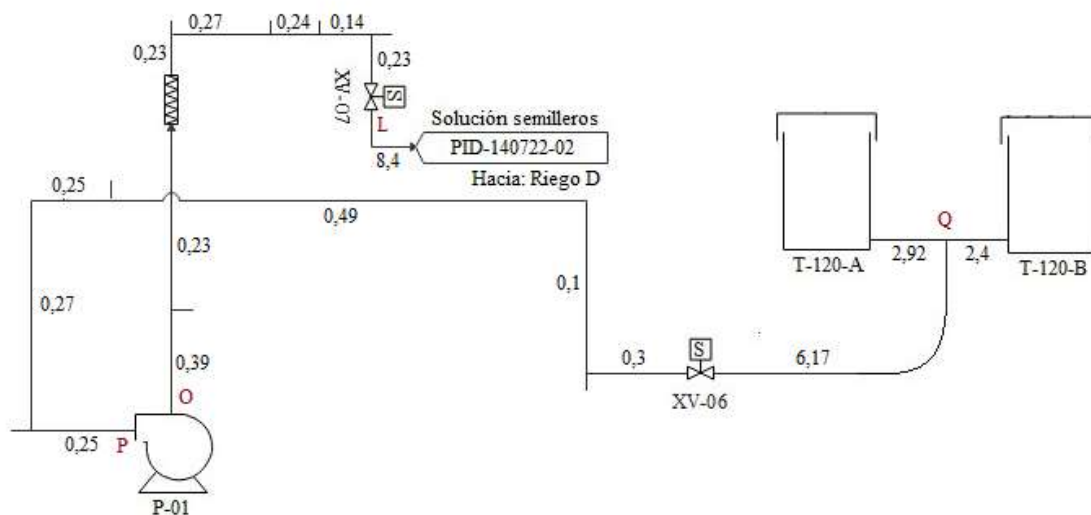
*Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de riego - D)*

A-K-G	Válvula12	Válvula	Tee	Codo 90°	Ampliacion			Q [m3/h]	0,2712
Leq [m]	0,09	0,15	1	1	0,28			C	145
#elementos	8	6	8	0	2			L [m]	10
Leq total	0,72	0,9	8	0	0,56	10,18		L+Leq [m]	20,18
								d [mm]	17
								hf [m]	0,206028
K-L	Válvula12	Válvula	Tee	Codo 90°	Ampliacion			Q [m3/h]	0,5424
Leq [m]	0,09	0,15	1	1	0,28			C	145
#elementos	0	0	2	0	0			L [m]	8,6
Leq total	0	0	2	0	0	2		L+Leq [m]	10,6
								d [mm]	17
hf [m]	0,5967							hf [m]	0,390678

A partir de la electroválvula de riego, el cálculo se realiza de acuerdo a las longitudes de tubería y las longitudes equivalentes de los accesorios existentes en el camino que recorre la solución nutritiva, desde el tanque a la bomba (línea de succión) y de la bomba hasta la válvula de riego (línea de impulsión). La **Figura 49** muestra las líneas mencionadas correspondientes al riego D.

**Figura 49**

*Línea de impulsión y succión de la bomba para riego D*



**Figura 50**

*Cálculo de pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de impulsión de bomba - D)*

L-O	Tee	Codo 90°	Electrov.	Filtro				Q [m3/h]	0,5424
Leq [m]	2	2	1	0,5				C	145
#elementos	5	0	1	1				L [m]	1,73
Leq total	10	0	1	0,5	11,5			L+Leq [m]	13,23
								d [mm]	28,8
hf altura [m]	0,42							hf [m]	0,037421

Al determinar la longitud total de la tubería, es decir la longitud real más la longitud equivalente de los accesorios, se calcula la pérdida total en la línea de impulsión. Además, se considera como pérdida la distancia vertical entre la línea central de la bomba y el punto más alto de la línea de riego.

**Figura 51**

*Pérdidas por longitud de tubería y accesorios (línea de succión de bomba - D)*

P-Q	Tee	Codo 90°	Electrov.					Q [m3/h]	0,5424
Leq [m]	2	2	1					C	145
#elementos	3	2	1					L [m]	13,15
Leq total	6	4	1	11				L+Leq [m]	24,15
								d [mm]	28,8
hf altura [m]	0,07							hf [m]	0,068309

Se realiza el mismo proceso para obtener la pérdida en la línea de succión, y la pérdida por altura que se considera es la distancia vertical entre la línea central de la bomba y el nivel de agua del tanque.

Finalmente se hace una suma de las pérdidas de cada riego para determinar la mayor pérdida y dimensionar el sistema de acuerdo a esta. Se observa que la mayor pérdida del sistema se da en el riego C con un total de 2.9356 metros.

**Figura 52**

*Resumen de pérdidas de presión obtenidas*

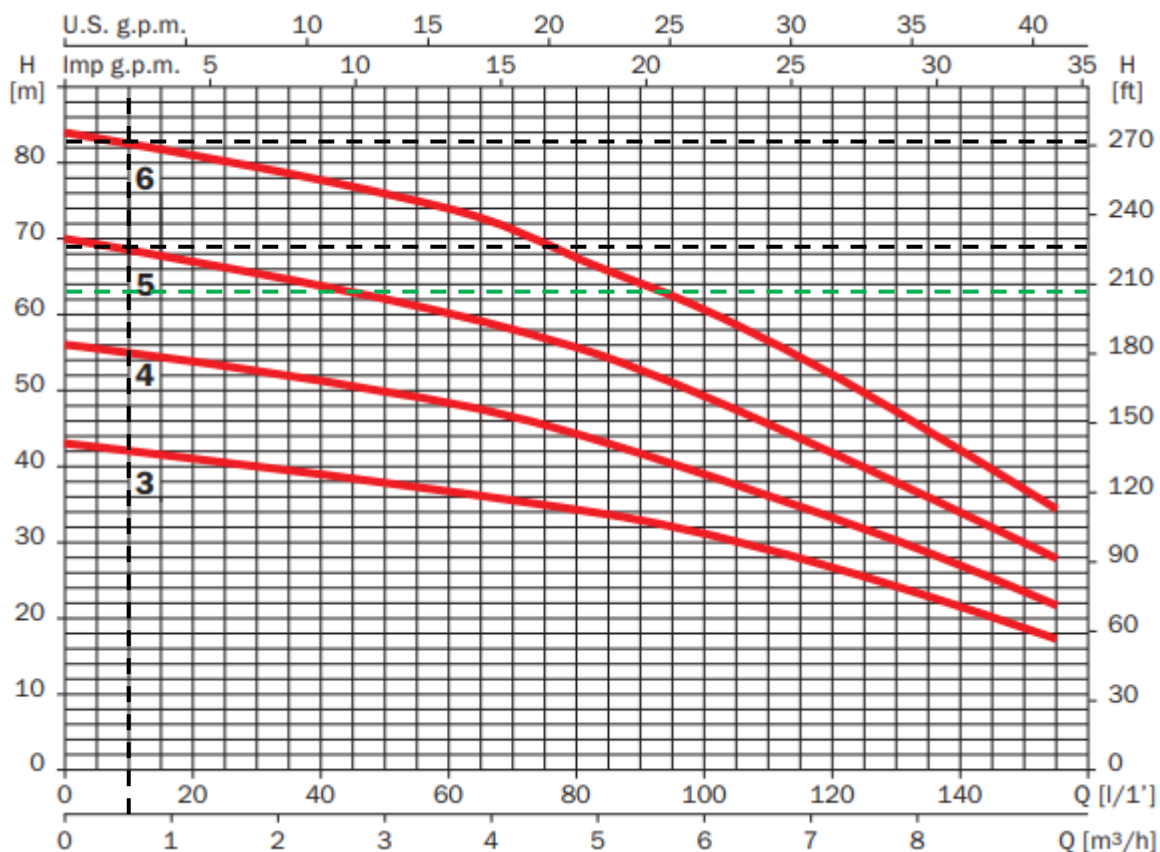
	Riego C	Riego F1	Riego F2	Riego F3	Riego M	Riego D
Línea de riego	0,4056	0,0559	0,0425	0,1104	0,0070	0,5967
Línea de impulsión	0,0612	0,0153	0,0081	0,0167	0,0012	0,0374
Altura al punto más alto	2,3500	1,7500	2,7000	1,6700	0,7850	0,4200
Línea de succión	0,0388	0,0065	0,0038	0,0065	0,0017	0,0683
Altura al nivel del agua	0,0800	-0,3200	-0,3200	-0,3200	-0,0850	0,0700
<b>Total de pérdidas [m]</b>	<b>2,9356</b>	<b>1,5077</b>	<b>2,4344</b>	<b>1,4836</b>	<b>0,7099</b>	<b>1,1924</b>
Presión del aspersor	40,80	61,20	61,20	61,20	40,80	61,20
<b>Altura requerida [m]</b>	<b>43,7356</b>	<b>62,7077</b>	<b>63,6344</b>	<b>62,6836</b>	<b>41,5099</b>	<b>62,3924</b>
Caudal de trabajo [m <sup>3</sup> /h]	0,6048	0,2544	0,1908	0,2544	0,08064	0,5424

Ya que el sistema hace un solo riego a la vez, la bomba se debe dimensionar de acuerdo al mayor caudal de trabajo y la máxima altura requerida de entre todos los riegos. Al calcular el requerimiento de altura que necesita entregar la bomba al sistema, se determina que la mayor altura requerida es de 63.63 metros para el riego F2. Además, analizando el caudal de trabajo que debe entregar la bomba, se observa que el mayor caudal es de 0.6048 m<sup>3</sup>/h correspondiente al riego C. Con estos datos se analiza la curva de la bomba y posteriormente se calcula la potencia requerida para el sistema.

La bomba que cumple con una altura mayor a 63.6344 metros para un caudal de 0.6048 m<sup>3</sup>/h es del modelo 5 con una altura máxima de 69 metros o el modelo 6 con una altura máxima de 83 metros. La bomba principal con la que se está trabajando es del modelo 5 que tiene una potencia de 2 HP, según se observa en las características de la bomba en la **Figura 54**, por lo que se comprueba que la bomba principal es la adecuada para el proyecto.

Figura 53

Curva de rendimiento de la bomba ESPA Prisma 35N



Nota. Tomado de ESPA, 2022.

Figura 54

Características de la bomba ESPA Prisma 35N

#### Datos eléctricos

Modelos monofásicos	Modelos trifásicos	Intensidad [A]		Potencia absorbida P1 [kW]		Potencia motor P2		Capacidad condensador [μF]
		1~ 230V	3~ 230/400V	1~	3~	[kW]	[HP]	
50 Hz	50 Hz	10,00	6,9/4	2,20	2,30	1.5	2.0	30μF-450V

#### Tabla de funcionamiento hidráulico

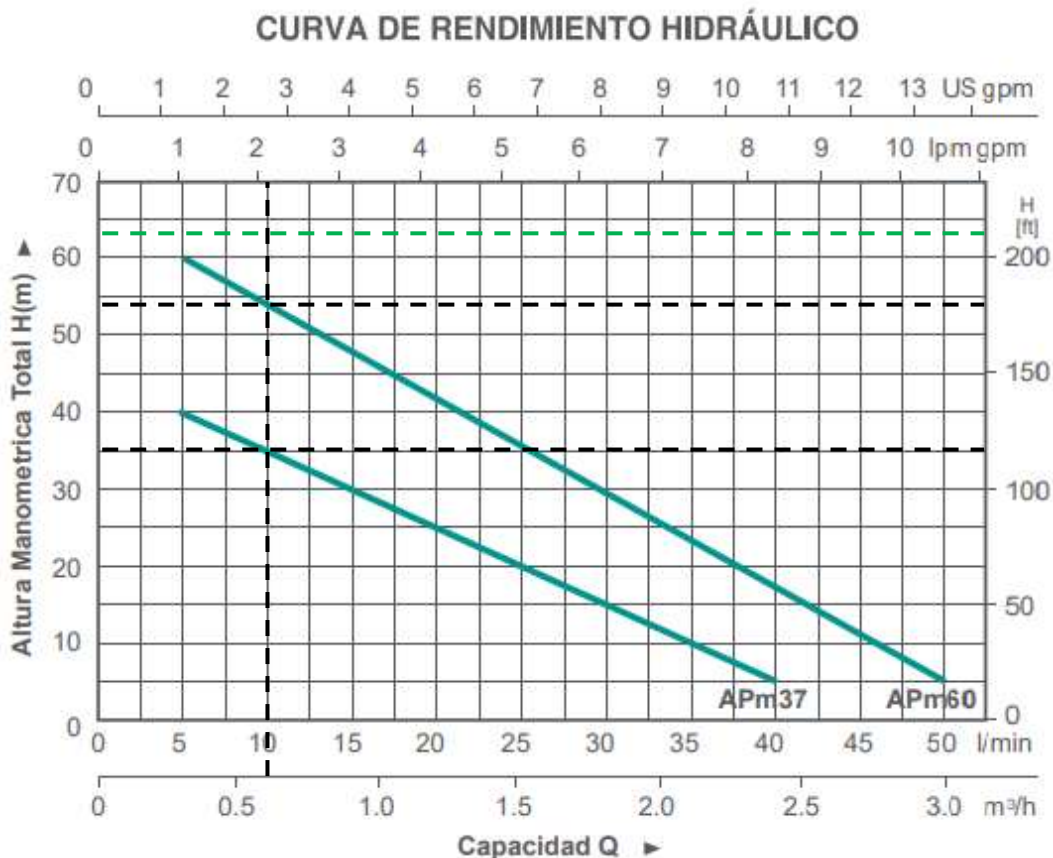
230 V 50 Hz	230/400 V 50 Hz	A			P1 (kW)		kW	HP	η	L/1' m³/h	20	40	60	80	100	120	140	150
		1~ 230 V	3~ 230 V	3~ 400 V	1~	3~												
Prisma35 5M N	Prisma35 5 N	10.2	6.9	4	2.3	2.2	1.5	2	30		68	64	60	55	49	41	34	30

Nota. Tomado de ESPA, 2022.



Figura 55

Curva de rendimiento de la bomba LEO APm



Nota. Tomado de LEO GROUP PUMP CO. LTD., 2022.

Por otro lado, se analizan los mismos valores en la curva de la bomba secundaria, y se observa que para un caudal de  $0.6048 \text{ m}^3/\text{h}$  las alturas máximas que se obtienen son de 54 metros para el modelo APm60 y de 35 metros para el modelo APm37. Ya que ninguno de los dos modelos llega a cumplir con el requerimiento mínimo obtenido a través de los cálculos de 63.6344 metros se tomó la decisión de reemplazar la bomba.

### **Selección de equipos e instrumentos**

Se comprobó mediante los cálculos de las pérdidas que la bomba con la que se está trabajando es capaz de abastecer la presión necesaria para realizar los riegos, sin embargo, al haber retirado el tanque hidroneumático para evitar que las soluciones de cada riego se

mezclen y el presostato que mantenía la presión a 80 psi, es necesario incluir un dispositivo que mantenga la presión de trabajo constante.

Se optó por adquirir el Hidrotank 01 de la marca Pentax que se muestra en la **Figura 56**. Este equipo permite automatizar el arranque y la parada de la bomba, evita que la bomba funcione sin agua, reduce los golpes de ariete y los arranques reiterados causados por pequeñas pérdidas en la instalación, controla la presión de accionamiento y comprueba la presencia de posibles pérdidas en la misma instalación.

La bomba se reguló a 6 bares de presión para abastecer los aspersores del riego de engorde, sin embargo, para los aspersores del riego de fumigación y de microgreens que trabajan a una presión nominal de 4 bares, se debió ajustar la presión entregada por la bomba mediante reguladores de presión. La válvula Netafim Aquanet correspondiente al riego C tiene integrado un regulador de presión, por lo que solo se ajustó la perilla para que la presión entregada a la línea de riego sea de 4 bares.

### **Figura 56**

*Hidrotank 01 Pentax*



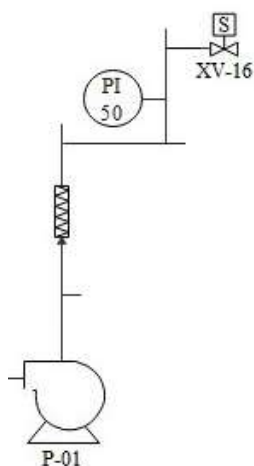
*Nota.* Tomado de Pentax Water Pumps, 2022.

Para la línea de riego M, se optó por reemplazar los aspersores Netafim Coolnet por los aspersores Tefen, ya que estos permiten una distribución más uniforme del riego y poseen un menor caudal, con lo cual se evita el estancamiento de la solución en las bandejas de los microgreens. Además, estos soportan los 6 bares de presión que ofrece la línea de riego.

La válvula de purga del sistema se ubicó en la línea de impulsión de la bomba, como se observa en la **Figura 57**, de modo que sea común para todos los riegos y pueda ser accionada por el operario cuando se requiera. La válvula que se utilizó fue una válvula Cepex, de las mismas características que se encuentran ubicadas en el sistema, como la que se muestra en la **Figura 29**.

### Figura 57

*Ubicación de la válvula de purga*



Para regular el caudal de entrada de agua en los semilleros, de modo que sea el mismo en todas las entradas, se utilizaron válvulas de compuerta de 12 mm, ubicadas en cada manguera de entrada.

**Figura 58***Válvula de compuerta*

*Nota.* Tomado de Pentax Water Pumps, 2022.

Finalmente, la bomba secundaria, la cual se comprobó que no podía abastecer al sistema, se reemplazó por una bomba centrífuga Foras JA-100-M, autocebante para el suministro de agua en pequeñas instalaciones domésticas, acoplada a tanques de autoclave para la transferencia de líquidos y el vaciado de tanques; utilizada también para jardinería.

**Figura 59***Características de bomba Foras JA 100 M*

Jet type self-priming electric pumps suggested for suctions up to 7/8 metres deep, especially in the presence of water mixed with gas.  
 Pump body and motor bracket in cast iron - shaft in stainless steel - impeller, diffuser, nozzle and venturi tube in noryl - mechanical seal.  
 Motor closed autoventilated - Protection IP 44.  
 Single-phase feeding with incorporated motor protected permanently connected.  
 Max. pressure : 6 bar  
 Water temperature : max. 40° C.  
 These pumps are ready for installation by a qualified electrician.

<b>JA 60-100</b>							<b>Q (m3/h - l/min)</b>					
							<b>0,6</b>	<b>1,2</b>	<b>1,8</b>	<b>2,4</b>	<b>3,0</b>	<b>3,6</b>
<b>Art No</b>	<b>Type</b>		<b>Voltage</b>	<b>P2</b>		<b>I</b>	<b>H (m)</b>					
			<b>50Hz</b>	<b>(HP)</b>	<b>(kW)</b>	<b>(A)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>
0920456	JA 100	M	230v	1	0,74	4,7	47	42	37	32	27	10

*Nota.* Tomado de Foras Water Pumps, 2022.

## ***Subsistema Eléctrico***

El sistema eléctrico del invernadero se divide en dos partes: los elementos de control y los elementos de potencia. Los elementos de control se ubican en el tablero de control y constituyen los sensores y actuadores del sistema, mientras que los elementos de potencia constituyen todo lo relacionado con el accionamiento de las bombas de agua y los elementos de protección. Los actuadores y sensores utilizados en el sistema anterior se presentan a continuación.

### **Actuadores**

- **Bombas peristálticas**

Las bombas peristálticas utilizadas son de la marca Jihpump MN1, las cuales permitirán llevar las soluciones nutritivas A y B y el ácido desde los tanques de reserva hasta los tanques de engorde (B) y de semilleros (D). Para controlar las bombas peristálticas, se utilizará dos placas Shield CNC Arduino que controlarán tres bombas cada una.

### **Figura 60**

*Bomba peristáltica Jihpump MN1*



*Nota.* Tomado de Jihpump, 2022.

- **Ventilador**

Para la climatización, se utilizan 3 ventiladores de la marca Montero Deton FE-50, con 150 W de potencia, 1600 RPM, 110 V, 60 Hz y una tasa de evacuación de aire de 96 m<sup>3</sup>/min.

**Figura 61***Ventilador Montero Deton FE-50*

*Nota.* Tomado de Novicompu, 2022.

**Sensores**

- **Sensor de temperatura y humedad AM2301**

AM2301A es un sensor de temperatura y humedad relativa, de bajo costo, excelente rendimiento y robusto, con salida de señal digital calibrada. Es utilizado en aplicaciones de control automático de temperatura, aire acondicionado, estaciones meteorológicas, aplicaciones en el hogar, regulador de humedad y temperatura.

**Figura 62***Sensor AM2301*

*Nota.* Tomado de Naylamp Mechatronics, 2021.

- **Sensor de boya**

Se lo conoce como interruptor de flotador o boya de nivel, es utilizado para detectar el nivel de líquido dentro de un tanque. Se integra fácilmente con sistemas digitales como Arduino, PIC o PLCs. El montaje de este sensor es horizontal, de preferencia en un agujero en la pared del tanque.

**Figura 63**

*Sensor de boya*



*Nota.* Tomado de Naylamp Mechatronics, 2021.

- **Sensor óptico de nivel**

Es un interruptor infrarrojo óptico para líquidos. Son adecuados para detección de nivel alto, bajo o intermedio en prácticamente cualquier tanque, grande o pequeño.

**Figura 64**

*Sensor óptico de nivel*



*Nota.* Tomado de Naylamp Mechatronics, 2021.

## **Problemática del sistema**

Previo al proyecto, se disponía de un Canadino PLC que controlaban las electroválvulas por medio de los módulos relé y tomaba información del sensor de temperatura y humedad para accionar los aspersores y ventiladores. Sin embargo, este sistema fue muy ineficiente y no dio los resultados esperados, ya que las señales proporcionadas por los sensores fluctuaban mucho debido al ruido.

El principal requerimiento del sistema era el control de las electroválvulas para los riegos y la conexión de los sensores para adquirir información de las variables críticas del sistema, por lo que se buscó un controlador capaz de realizar estas tareas. Una demanda de la empresa fue trabajar con software libre y equipos de bajo costo, por esta razón no se consideró un PLC comúnmente usado en la industria, ya que estos necesitan un software de pago. Se optó por un PLC Controllino, ya que presenta varias ventajas debido a su bajo costo, altas prestaciones y su compatibilidad con el software libre de Arduino, además de contar con estándares de nivel industrial. Se realizó una tabla comparativa del Controllino MEGA con Canadino, mostrada en la **Tabla 2**.

### **Tabla 2**

*Comparación entre un PLC Canadino y PLC Controllino MEGA*

<b>Características</b>	<b>PLC Controllino</b>	<b>PLC</b>
	<b>MEGA</b>	<b>Canadino</b>
N° de entradas digitales/analógicas	21	16
N° de salidas digitales/analógicas	24	16
N° de salidas de relé	16	14
Protocolos de comunicación disponibles (I2C, SPI, DALI, LoRA, Serial TTL, ...)	I2C, SPI, Serial TTL, RS485, Ethernet, USB	I2C, SPI, RS232



Características	PLC Controllino	PLC
	MEGA	Canduino
RTC (Reloj en tiempo real)	Si	No
Memoria	256 KB	256 KB
Licencia de software	Gratis	Gratis
Standard	EN61010, EN61131	Ninguno
Dimensiones	10x9x6cm	20x15x4cm
Precio	\$299	\$120

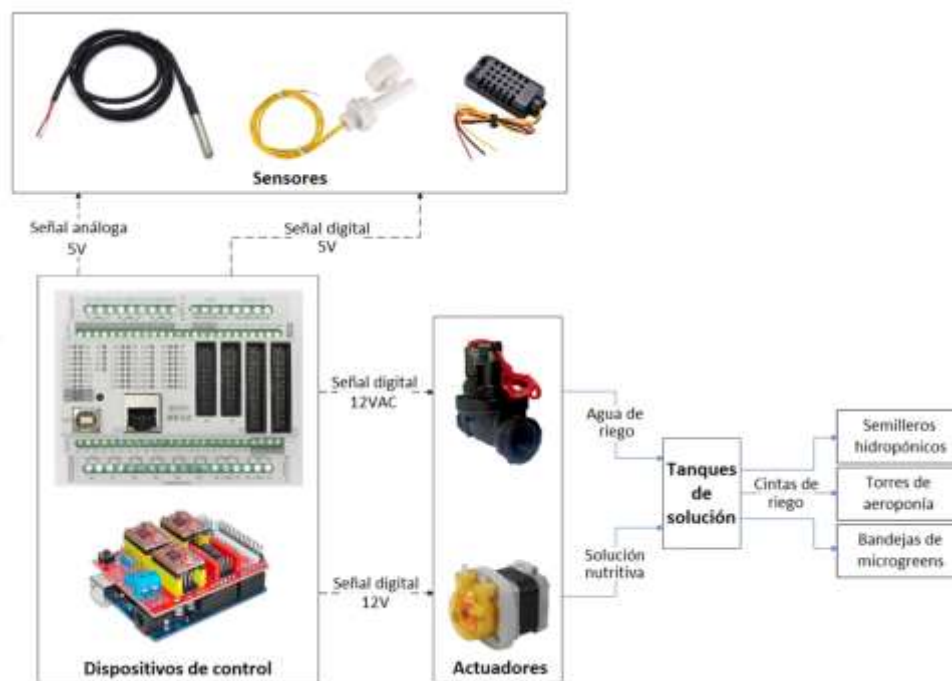
La principal razón por la que se escogió Controllino frente a Canduino es su confiabilidad, ya que Controllino tiene estándares IEC que aseguran un correcto funcionamiento y robustez del dispositivo. Además, Controllino posee conexión a internet y el módulo RTC, mientras que en Canduino posee módulos que se venden por separado lo que implica un gasto extra. Finalmente, Controllino ofrece soporte técnico mientras que Canduino es un kit DIY.

En cuanto a los sensores y actuadores necesarios para el control, de acuerdo al estudio de varios trabajos sobre hidroponía, se determinaron como variables críticas del sistema de riego: temperatura y humedad ambiente, nivel de pH, nivel de conductividad eléctrica y temperatura de la solución. Estas variables deberán ser medidas por medio de sensores que, de acuerdo a los parámetros de funcionamiento para cada variable, enviarán una señal a los actuadores para modificar esta variable.

Los actuadores requeridos para el funcionamiento del sistema son: bombas eléctricas, bombas peristálticas, válvulas, ventiladores, y calefactor para líquidos. Un esquema de conexión se muestra en la **Figura 65**.

Figura 65

Esquema de conexión del sistema

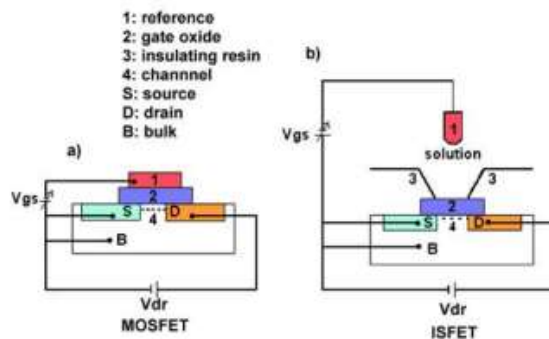


Los sensores para medición de pH y conductividad eléctrica (EC) deben tener buenas características técnicas como resolución, sensibilidad, error, precisión y repetitividad, las cuales son necesarias para una correcta medición. Sin embargo, uno de los requerimientos para este proyecto es que tengan un bajo costo y permitan automatizar el proceso al que están ligados. En el trabajo de Valderrama (2017) se mencionan 3 tipos de sondas para medición de pH, las cuales se detallan a continuación:

- Electrodo de vidrio: miden el pH por medio de una diferencia de potencial entre un bulbo de vidrio y un electrodo interno, son los más usados comúnmente ya que poseen una buena precisión y sensibilidad además de un error bajo, el inconveniente en este tipo de sensores es su repetitividad, ya que si la sonda se mantiene en la sustancia a medir esta tiende a degradarse y acortar su vida útil, además presenta sensibilidad hacia la temperatura.

## Figura 66

### Diferencia y similitudes entre MOSFET e ISFET



*Nota.* Tomado de *Métodos de medida del pH para estudios invasivos prolongados: ISFET y fibra óptica* (p. 1-5), por J. Oreggioni, 2006, Universidad de la República Oriental del Uruguay.

- Electrodo ISFET: Su funcionamiento es similar al de un MOSFET como se muestra en la Figura 66. Son mucho más pequeños que otros electrodos, pero son sensibles a la luz, presentan una inestabilidad térmica que se transmite a las medidas y una deriva temporal de la señal de respuesta.
- Sensor de fibra óptica: consiste en un indicador inmovilizado, cuyas propiedades ópticas se modifican en función de la cantidad de analito en la solución. Estos sensores son mucho más estables y sensibles, además de ser más robustos ante ruido electromagnético y tienen tiempos de respuesta altos. Su principal inconveniente es la necesidad de tenerlos impermeables a cualquier fuente de luz externa.

En el trabajo de Oreggioni (2006), se realiza una comparación de los 3 tipos de sensores, como se muestra en la **Figura 67**. Se observa que, en los tres tipos de sensores, existe una deriva del valor de medición entregado, lo cual se traduce en una calibración periódica de los sensores.

El sensor más económico, que podría ser de interés para este trabajo, es de vidrio, el cual no tiene una repetitividad adecuada y varía de acuerdo a la temperatura a la cual se mide

la sustancia, por esta razón el sensor debe ser calibrado mientras el tanque cambie de temperatura durante el día (Rodríguez et al., 2012). En los tanques de semilleros y engorde, la temperatura fluctúa a lo largo del día, lo que se traduciría en una constante calibración de los sensores por parte del operario, incluso en espacios fuera del horario de trabajo. Por estas razones se determinó que el uso de un sensor de pH y EC, ubicado en la sustancia nutritiva para una medición continua, sería un desperdicio de recursos, ya que, al estar en contacto prolongado con la sustancia a medir, sería necesario una calibración y adquisición frecuente debido al desgaste de su vida útil.

### Figura 67

#### Comparación entre sensores de pH

	Omega PHE-7353	Fraunhofer	Ocean Optics
Tipo de sensor	Vidrio	ISFET	Fibra óptica
Rango pH	0 a 14	1 a 12	6.5 a 12
Rango temperatura (°C)	0 a 80	-10 a 75	0 a 220
Rango presión (psi)	0 a 100	7 a 145	0 a 100
Precisión	0, 1% sobre fondo de escala	0.02	s/d
Impedancia de salida	150M	s/d	s/d
Tiempo de respuesta (s)	10	60	s/d
Deriva (uV/hora)	12	80	s/d
Dimensiones (mm)	152(L) x 22(D)	3.5 x 3.5	108(L) x 3(D)
Compensación de temperatura	Pt100 incluida	Pt1000	NC
Mantenimiento	Húmedo	Seco	Seco
Costo (USD)	150	s/d	990

*Nota.* Tomado de *Métodos de medida del pH para estudios invasivos prolongados: ISFET y fibra óptica* (p. 1-5), por J. Oreggioni, 2006, Universidad de la República Oriental del Uruguay.

Al ser el nivel de pH y CE parámetros de vital importancia para el desarrollo de las plantas, la solución implementada fue una interfaz IoT para el ingreso manual de las mediciones, las cuales se realizarán por el operario mediante un medidor de pH y EC

electrónico. Esta propuesta se detallará en las siguientes secciones.

Para el circuito de conexión de control, se consideran las entradas y salidas del PLC Controllino, las cuales se distribuyen de la siguiente manera:

- 16 entradas analógicas/digitales (A0...A15)
- 3 entradas digitales (I16...I18)
- 2 entradas de interrupción (IN0, IN1)
- 24 salidas digitales (D0...D23)
- 16 salidas de relé (R0...R15)

Todas las entradas y salidas tienen conexión de 12V en las borneras correspondientes, sin embargo, el Controllino también ofrece pines de conexión a 5V para conectar módulos adicionales y elementos electrónicos que funcionen con este voltaje. Las salidas de relé del Controllino se conectan a cada una de las válvulas de entrada y salida del tanque, las válvulas de cada riego, y el ventilador para la climatización. Sin embargo, hacen falta relés para la válvula de purga y el calefactor del tanque, los cuales serán cubiertos con un módulo de 4 relés que se conectarán a las salidas digitales del Controllino.

Las 6 bombas peristálticas trabajan con motores paso a paso que requieren 4 salidas digitales para cada bomba, lo que da un requerimiento total de 24 salidas digitales. Si bien se pudo conectar directamente a las salidas digitales del Controllino, se optó por un Arduino Shield CNC que permite un control simple y descentralizado de los motores, lo cual reduce el código de programación del Controllino.

Los sensores de temperatura y humedad ambiental, temperatura y nivel de los tanques se conectan directamente a las entradas análogas/digitales del Controllino. No obstante, se requieren entradas también para los pulsadores del tablero eléctrico que permitirán controlar el sistema en modo manual, para lo cual se ocupan módulos de expansión que se conectan al Controllino mediante protocolo de comunicación I2C.

Tomando en cuenta las observaciones mencionadas anteriormente, se realizó la tabla de asignación de recursos, como se muestra en la **Tabla 3**, que muestra los actuadores, indicadores, sensores y elementos de mando requeridos para el manejo del sistema desde el tablero eléctrico, con su respectivo voltaje de operación y pin de conexión.

**Tabla 3**

*Tabla de asignación de recursos*

N°	Elemento	Descripción	Pin de conexión	Etiqueta	Tipo
<b>Actuadores</b>					
1	Válvula 1	Salida del tanque A	CONTROLLINO _R1	KV1	Relé
2	Válvula 2	Salida del tanque B	CONTROLLINO _R2	KV2	Relé
3	Válvula 3	Entrada del tanque B	CONTROLLINO _R3	KV3	Relé
4	Válvula 4	Salida del tanque C	CONTROLLINO _R4	KV4	Relé
5	Válvula 5	Entrada del tanque C	CONTROLLINO _R5	KV5	Relé
6	Válvula 6	Salida del tanque D	CONTROLLINO _R6	KV6	Relé
7	Válvula 7	Riego de semilleros	CONTROLLINO _R7	KV7	Relé
8	Válvula 8	Aspersores aéreos	CONTROLLINO _R8	KV8	Relé

<b>N°</b>	<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pin de conexión</b>	<b>Etiqueta</b>	<b>Tipo</b>
9	Válvula 9	Riego de torres F1	CONTROLLINO _R9	KV9	Relé
10	Válvula 10	Riego de torres F2	CONTROLLINO _R10	KV10	Relé
11	Válvula 11	Riego de torres F3	CONTROLLINO _R11	KV11	Relé
12	Válvula 12	Salida del tanque M	CONTROLLINO _R12	KV12	Relé
13	Válvula 13	Entrada del tanque M	CONTROLLINO _R13	KV13	Relé
14	Válvula 14	Riego de microgreens	CONTROLLINO _R14	KV14	Relé
15	Válvula 15	Entrada del tanque D	CONTROLLINO _R15	KV15	Relé
16	Válvula 16	Ventiladores	CONTROLLINO _D20	Vent	Relé
17	Válvula 17	Purga	CONTROLLINO _R0	KV0	Relé
18	Calefactor B	Calefactor tanque B	CONTROLLINO _D17	Cal_B	Relé
19	Bomba peristáltica 1	Ingreso de solución A - Tanque B	SHIELD_1	M_SolA_ B	Digital

<b>N°</b>	<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pin de conexión</b>	<b>Etiqueta</b>	<b>Tipo</b>
20	Bomba peristáltica 2	Ingreso de solución B - Tanque B	SHIELD_2	M_SolB_ B	Digital
21	Bomba peristáltica 3	Ingreso de ácido - Tanque B	SHIELD_3	M_Acido _B	Digital
22	Bomba peristáltica 4	Ingreso de solución A - Tanque D	SHIELD_4	M_SolA_ D	Digital
23	Bomba peristáltica 5	Ingreso de solución B - Tanque D	SHIELD_5	M_SolB_ D	Digital
24	Bomba peristáltica 6	Ingreso de ácido - Tanque D	SHIELD_6	M_Acido _D	Digital

---

**Indicadores**

1	Modo manual	Luz amarilla	CONTROLLINO _D22	H_Man	Digital
2	Modo automático	Luz verde	CONTROLLINO _D23	H_Auto	Digital
3	Emergencia	Luz roja	CONTROLLINO _D21	H_E	Digital
4	Bomba principal	Luz verde		H_BP	Digital
5	Bomba de respaldo	Luz amarilla		H_BS	Digital

---

**Sensores**



<b>N°</b>	<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pin de conexión</b>	<b>Etiqueta</b>	<b>Tipo</b>
1	Temperatura ambiente Humedad relativa	Temperatura ambiente (°C) Humedad relativa (%)	CONTROLLINO _A0	Temp_H um_Amb	Análogo a
2	Temperatura D	Temperatura - Tanque D	CONTROLLINO _A10	Temp_D	Análogo a
3	Temperatura B	Temperatura - Tanque B	CONTROLLINO _A11	Temp_B	Análogo a
4	Nivel bajo B	Nivel bajo - Tanque B	CONTROLLINO _A12	NB_B	Digital
5	Nivel bajo C	Nivel bajo - Tanque C	CONTROLLINO _A13	NB_C	Digital
6	Nivel bajo D	Nivel bajo - Tanque D	CONTROLLINO _A14	NB_D	Digital
7	Nivel bajo M	Nivel bajo - Tanque M	CONTROLLINO _A15	NB_M	Digital
8	Nivel bajo ácido	Nivel bajo - Ácido	CONTROLLINO _I16	NB_Ac	Digital
9	Nivel bajo solución A	Nivel bajo - Solución A	CONTROLLINO _I17	NB_Sa	Digital
10	Nivel medio B	Nivel medio - Tanque B	CONTROLLINO _I18	NM_B	Digital

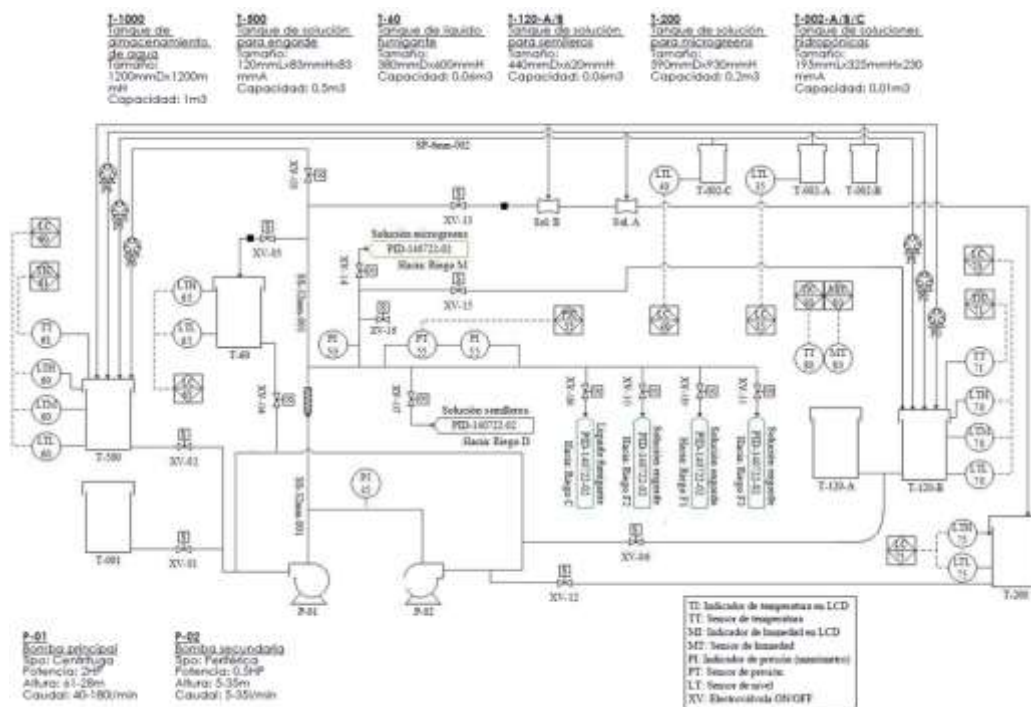
<b>N°</b>	<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pin de conexión</b>	<b>Etiqueta</b>	<b>Tipo</b>
11	Nivel medio D	Nivel medio - Tanque D	CONTROLLINO _A9	NM_D	Digital
12	Nivel alto B	Nivel alto - Tanque B	Modulo3_P7	NA_B	Digital
13	Nivel alto C	Nivel alto - Tanque C	Modulo3_P6	NA_C	Digital
14	Nivel alto D	Nivel alto - Tanque D	Modulo3_P5	NA_D	Digital
15	Nivel alto M	Nivel alto - Tanque M	Modulo3_P4	NA_M	Digital
<b>Mando</b>					
1	Ingreso solución A	Pulsador	Modulo1_P7	SW_Sa	Digital
2	Ingreso solución B	Pulsador	Modulo1_P6	SW_Sb	Digital
3	Ingreso ácido	Pulsador	Modulo1_P5	SW_Ac	Digital
4	Ingreso agua	Pulsador	Modulo1_P4	SW_Agu a	Digital
5	Mezcla	Pulsador	Modulo1_P3	SW_Mez cla	Digital
6	Aspersor/Riego F1/Aspersor M	Pulsador	Modulo1_P2	SW_F1	Digital
7	Ventilador/Rieg o F2	Pulsador	Modulo1_P1	SW_F2	Digital
8	Riego D/Riego F3	Pulsador	Modulo1_P0	SW_F3	Digital

N°	Elemento	Descripción	Pin de conexión	Etiqueta	Tipo
9	Purga	Pulsador	Modulo2_P7	SW_Purga	Digital
10	Menú de opciones	Encoder	CONTROLLINO_A6	Encoder_DT	Digital
			CONTROLLINO_A7	Encoder_CLK	Digital
			Modulo2_P4	Encoder_SW	Digital
11	Manual	Selector	Modulo2_P2	S_Manual	Digital
	Automático		Modulo2_P3	S_Auto	Digital
12	Confirmación IoT	Pulsador	Modulo2_P1	SW_ConfIoT	Digital
13	Paro de emergencia	Interruptor	-		Manual

El diagrama P&ID de la **Figura 68** muestra el sistema propuesto con todos los sensores y actuadores ubicados en el invernadero.

Figura 68

Diagrama P&ID de la línea de alimentación del sistema propuesto



## Dimensionamiento del sistema

### Sistema de control

El sistema es alimentado por una unidad UPS, suministrada por la empresa Aeroponía del Valle, que permite que el PLC continúe trabajando en caso de haber una interrupción del suministro eléctrico, por lo cual todas las consideraciones eléctricas se realizarán a partir de este elemento. El UPS alimenta una fuente que transforma la corriente alterna en corriente continua, que es lo que alimenta al PLC y a los módulos que mantienen el correcto funcionamiento del sistema.

Ya que no todos los elementos funcionan a un mismo voltaje, se implementaron reguladores de voltaje para 5 V y 12 V y se dimensionó la fuente de acuerdo a la corriente máxima correspondiente al mayor voltaje, es decir, 12 V. Por otro lado, se utilizó un transformador para alimentar las electroválvulas, las cuales trabajan a 24 V AC y presentan un

funcionamiento simultáneo de máximo 2 válvulas a la vez, por lo que se dimensionó de acuerdo a estos requerimientos. La **Tabla 4** presenta los voltajes y corrientes correspondientes a los elementos existentes en el sistema.

**Tabla 4**

*Voltajes y corrientes de los elementos del sistema*

<b>CANT.</b>	<b>ELEMENTO</b>	<b>MODELO</b>	<b>VOLTAJE</b>	<b>CORRIENTE</b>
8	Válvula	Cepex	24 V AC	Arranque:430 mA Mantenimiento: 250 mA
5	Válvula	Netafim Aquanet	24 V AC	Arranque:90 mA Mantenimiento:75 mA
4	Válvula	Rain 7001	24 V AC	Arranque:430 mA Mantenimiento: 250 mA
2	Ventilador	Vasser HB-FS-1803	120 V AC	0.5 A
1	Calefactor	HX-906	120 V AC	0.2 A
1	PLC	Controllino MEGA	12 V DC	30 A
6	Bomba peristáltica	Motor paso a paso KS42STH48-1684A	12 V DC	1.5 A
2	Shield CNC	V3	12 V DC	4.5 A
3	Luz indicadora		12 V DC	
1	Sensor temperatura ambiente y humedad relativa	AM2301	5 V DC	1.5 mA



CANT.	ELEMENTO	MODELO	VOLTAJE	CORRIENTE
2	Sensor temperatura		5 V DC	
9	Sensor de nivel	35ED tipo boya	5 V DC	3 mA <sup>a</sup>
3	Sensor de nivel	FS-IR1901D óptico	5 V DC	15 mA
10	Pulsador		5 V DC	3 mA <sup>a</sup>
1	Encoder rotativo	KY-040	5 V DC	10 mA
1	Pantalla LCD	Sunfounder LCD2004	5 V DC	0.25 mA
1	Selector		5 V DC	3 mA <sup>a</sup>
3	Módulo de expansión I2C	PCF8574	5 V DC	25 mA

*Nota.* <sup>a</sup>Los valores son tomados de la corriente máxima de entrada a los pines de entrada del PLC Controllino.

Los reguladores de voltaje implementados y sus características se presentan en la **Figura 69**. Se utilizó un regulador de voltaje XL4015 para los dos Shield CNC, los cuales alimentan los seis motores paso a paso de cada una de las bombas peristálticas, y también se utilizaron dos reguladores de voltaje LM2596 para alimentar los sensores de 5 V y 12 V correspondientes.

**Figura 69**

*Características de los reguladores de voltaje*

	<b>MODELO</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>
	Lm2596	Vin: 4.5-40 V DC Vout: 1.5-35 V DC Imax: 3 A
	XL4015	Vin: 5-32 V DC Vout: 0.8-30 V DC Imax: 5 A

Para el dimensionamiento de la fuente DC, se considera el voltaje y la corriente de trabajo, por lo cual se realiza una suma de todas las corrientes de las cargas. Para los Shield CNC, se considera una corriente de 5 A que corresponde al regulador, mientras que para los botones y sensores de nivel que se conectan a módulos de expansión I2C y a las entradas digitales del Controllino, se considera la corriente máxima de 25 mA y 200 mA respectivamente.

$$I_{fuente} = \sum I_{cargas}$$

$$I_{fuente} = (I_{Controllino}) + (I_{R\_shield}) + (I_{luces} * 3) + (I_{AM2301}) + (I_{Stemp}) + (I_{FTVougue}) + (I_{SE068}) \\ + (I_{KY040}) + (I_{LCD}) + (I_{PCF8574} * 3) + (I_{in-controllino})$$

$$I_{fuente} = (30 A) + (9 A) + (20 mA * 3) + (1.5 mA) + (15 mA) + (10 mA) + (45 mA) + (10 mA) \\ + (75 mA) + (0.25 mA * 3) + (200 mA)$$

$$I_{fuente} = 39.38 A$$

De acuerdo con el valor obtenido, la fuente DC seleccionada que cumple con una corriente máxima mayor a 39.38 A se presenta en la **Figura 70**. La misma soporta hasta 50 A y suministra un voltaje de 12 V CC.

## Figura 70

Fuente de voltaje de corriente continua



Nota. Tomado de Naylamp Mechatronics, 2021.

Para el dimensionamiento del transformador de 120V/24 V AC, se suman las corrientes nominales de las válvulas con las que trabaja el sistema.

$$I_{max} = I_{cepex} + I_{netafim} + I_{rain}$$

$$I_{max} = (8 * 430) + (5 * 90) + (4 * 430)$$

$$I_{max} = 5610 \text{ mA} = 5.61 \text{ A}$$

El valor se obtuvo asumiendo que las 17 válvulas se accionan simultáneamente, sin embargo, el automatismo implementado no permite que se accionen más de dos válvulas a la vez, por lo cual se toma en cuenta las corrientes de mantenimiento de 15 válvulas más la corriente de arranque de 2 válvulas Cepex, lo cual representa un caso de consumo máximo.

$$I_{max} = I_{cepex_a} + I_{cepex_m} + I_{netafim_m} + I_{rain_m}$$

$$I_{max} = (2 * 430) + (6 * 250) + (5 * 75) + (4 * 250)$$

$$I_{max} = 3735 \text{ mA} = 3.74 \text{ A}$$

De acuerdo con el valor obtenido, el transformador seleccionado se presenta en la **Figura 71**, el cual soporta hasta 5 A y suministra un voltaje de 24 V AC para las válvulas.



**Figura 71***Transformador 120/24V AC*

Vin: 120 V AC

Vout: 12-24 V AC

Imax: 5 A

*Nota.* Tomado de Naylamp Mechatronics, 2021.

Para el dimensionamiento de las protecciones, primero se considera la carga completa incluyendo el transformador de las válvulas, ventilador, calefactor y fuente de voltaje. El total de las corrientes máximas son:

$$I_{max} = I_{transformador} + I_{ventilador} + I_{calefactor} + I_{fuente}$$

$$I_{max} = 5 A + (0.5 A * 2) + 0.2 A + 40 A$$

$$I_{max} = 46.2 A$$

Según la norma NEC70, (2020) a esta corriente se le considera un 10% más para valores de factor de potencia de 90%. Este valor se considera debido a la Resolución Nro. ARCONEL-074/17, en la cual se indica que el menor factor de potencia permitido es de 0.92. Entonces, se dimensiona la protección termomagnética de manera que soporte al menos 50.82 A, que equivale a un valor comercial de 60 A.

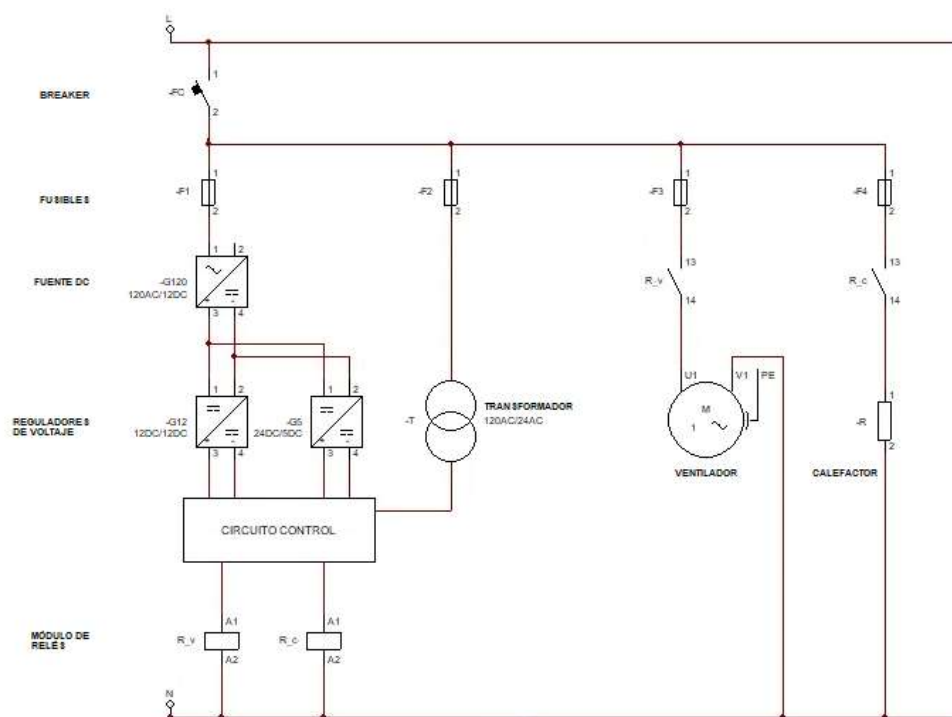
Otra consideración de la norma es el color de identificación de los cables, los cuales serán negro y blanco para las líneas de fase y neutro respectivamente, y cuya corriente nominal es de 50.82 A. La tabla 310.16 sobre Capacidad de corriente de conductores eléctricos de la norma NEC70, muestra los calibres de los cables y su capacidad de amperaje de acuerdo a la norma, en donde se recomienda el uso de cable AWG6 para esta conexión.

De la misma manera, se realizó el dimensionamiento de las protecciones de los demás elementos de carga. A continuación, se describe el amperaje del fusible y el calibre del cable correspondiente a cada elemento.

- Transformador 120/24V: el fusible debe soportar al menos 5.5 A, el valor comercial más próximo es de 6.3 A. El cable recomendado es el AWG17.
- Ventiladores: el fusible debe soportar al menos 1.1 A, el valor comercial más próximo es de 1.25 A. El cable recomendado es el AWG17.
- Calefactor: el fusible debe soportar al menos 0.22 A, el valor comercial más próximo es de 0.25 A. El cable recomendado es el AWG17.
- Fuente: el fusible debe soportar al menos 44 A, el valor comercial más próximo es de 50 A. El cable recomendado es el AWG6.

**Figura 72**

*Circuito de alimentación*



Para los circuitos ubicados después de la fuente, no es necesario implementar protecciones, ya que el PLC Controllino cuenta con su propia protección al igual que los reguladores de voltaje. En cuanto a los cables, se recomienda el calibre AWG14 y los colores rojo y negro para identificar positivo y negativo respectivamente. Adicionalmente, es importante

etiquetar los cables de forma que se pueda reconocer fácilmente los diferentes niveles de voltaje y el tipo de corriente utilizada.

### Sistema de potencia

El sistema de fuerza incluye las bombas primaria y secundaria que se muestran en la **Figura 73**. Ambas bombas se conectan a un presostato que mantiene la presión entre 70 y 90 psi durante los riegos. Las protecciones necesarias se determinan por la corriente nominal de la bomba, y se analizan tres aspectos:

- Cálculo de conductores
- Protección contra sobrecarga
- Protección contra cortocircuito

#### *Bomba principal ESPA PRISMA 35-3M*

Para el cálculo del conductor, se utiliza la tabla 430.251(B) sobre Corrientes en carga máxima de la norma NEC70. Para esta bomba, con una potencia de 2 HP a 230 V, se toma el valor de 50 A con un factor de corrección de 1.1, que equivale a una corriente de 55 A y un cable de calibre AWG6.

Para la protección contra sobrecarga, se utiliza la corriente nominal de la bomba de 11.2 A con un factor de corrección de 1.1, que equivale a una corriente de 12.32 A.

Finalmente, para la protección contra cortocircuito, se utiliza la tabla 430.52 que indica la Calificación de cortocircuito según el tipo de motor de la norma NEC70. En este caso, se escogió un valor de 250% con el cual se opera la corriente nominal, obteniendo un valor de 28 A. El fusible escogido deberá ser de al menos 30 A, como se indica en la tabla 240.6(A) correspondiente a Valores estándar de amperaje para fusible y breakers de la norma NEC70.

### Bomba secundaria Foras JA 100M

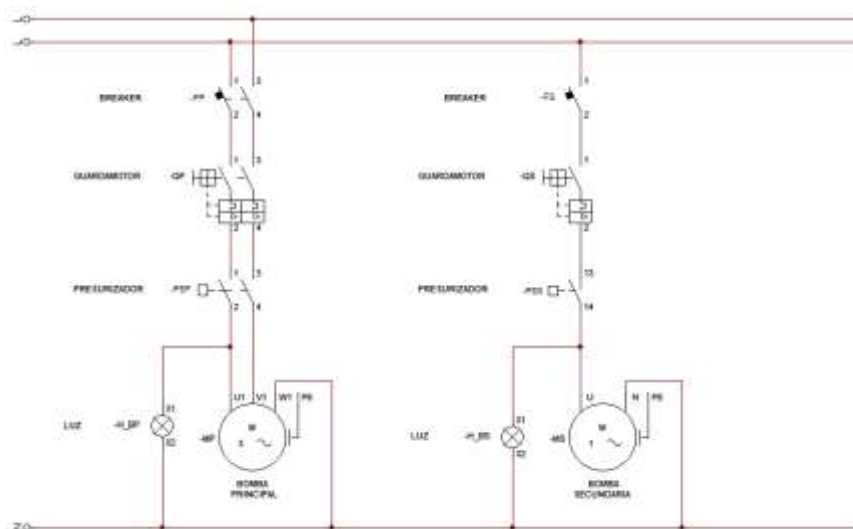
Para el cálculo del conductor, se consideran las características de la bomba de 1 HP a 110 V, se toma el valor de 60 A con un factor de corrección de 1.1, que equivale a una corriente de 66 A y un cable de calibre AWG4.

Para la protección contra sobrecarga, siendo la corriente nominal de la bomba de 12 A con el factor de corrección de 1.1, se determina que la protección contra sobrecarga debe ser mínimo 13.2 A.

Por último, para la protección contra cortocircuito, se escogió un valor de 250% con el cual se opera la corriente nominal, obteniendo un valor de 30 A. El fusible escogido deberá ser de al menos 30 A.

### Figura 73

*Circuito de potencia*



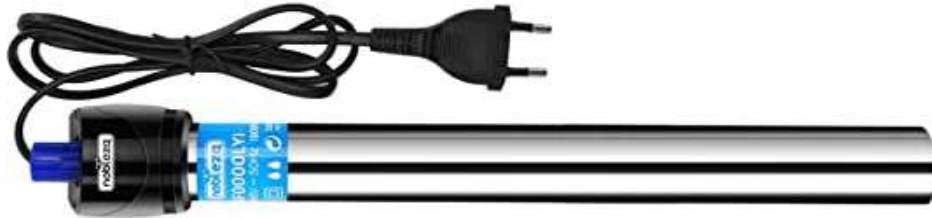
### Selección de equipos e instrumentos

- Calefactor para líquidos

El tanque de engorde se encuentra en el exterior del invernadero, y en climas muy fríos la temperatura de la solución dentro del tanque disminuye, por lo que se utiliza un calentador de agua Caredy HX-906.

## Figura 74

*Calefactor para líquidos Caready HX-906*



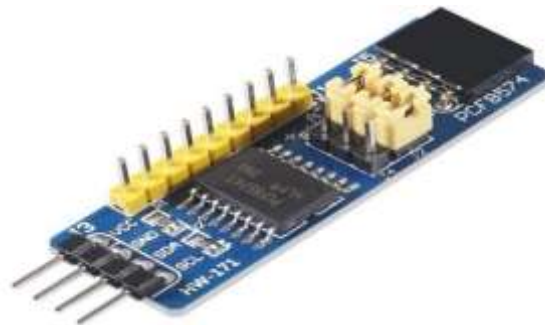
*Nota.* Tomado de STYLO, 2022.

- Módulos de expansión I2C PCF8574

El PCF8574 es un módulo de expansión de E/S compatible con la mayoría de microcontroladores, permite una comunicación bidireccional a través del bus I2C, es ideal para el manejo de dispositivos como: pantallas, teclados matriciales, leds, relés, etc.

## Figura 75

*Módulo de expansión PCF8574*



*Nota.* Tomado de Naylamp Mechatronics, 2021.

- Arduino Shield CNC

El shield CNC permite manejar 3 motores paso a paso (pap/stepper) de forma independiente (X, Y, Z) y 1 motor adicional (A) como duplicado de alguno de los anteriores.

## Figura 76

### Características de Arduino Shield CNC

- Voltaje de alimentación (potencia): 12V-36V DC
- Shield compatible con Arduino Uno R3 y Arduino Leonardo
- Compatible con firmware [GRBL](#)
- Soporta hasta 4 ejes independientes (X, Y, Z y duplicar uno de los anteriores o crear un eje a medida con los pines D12 y D13)
- Conexión para 2 finales de carrera por cada eje (6 en total)
- Habilitador y dirección de Spindle
- Habilitador de refrigerante (coolant)
- Diseñado para drivers Pololu A4988 o DRV8825
- Jumpers para configurar el micro-stepping de los drivers
- Los motores se pueden conectar usando header o Molex hembra de 4 pines
- Fusible en placa

*Nota.* Tomado de Naylamp Mechatronics, 2021.

- Módulos relé Songle

El módulo posee 4 relés de alta calidad, capaces de manejar cargas de hasta 250 V/10

A. Cada canal posee aislamiento eléctrico por medio de un opto acoplador y un led indicador de estado. Su diseño facilita el trabajo con Arduino, al igual que con muchos otros sistemas como Raspberry Pi, ESP8266 (NodeMCU y Wemos), Teensy y Pic.

## Figura 77

### Módulo de relés Songle



*Nota.* Tomado de Naylamp Mechatronics, 2021.

### Construcción del tablero eléctrico

El tablero eléctrico se encuentra ubicado en la oficina adjunta al invernadero. Se consultó el código eléctrico NEC 2020 para cumplir con requisitos para cableado eléctrico, protecciones contra sobrecorriente, conexión a tierra e instalación de equipos.

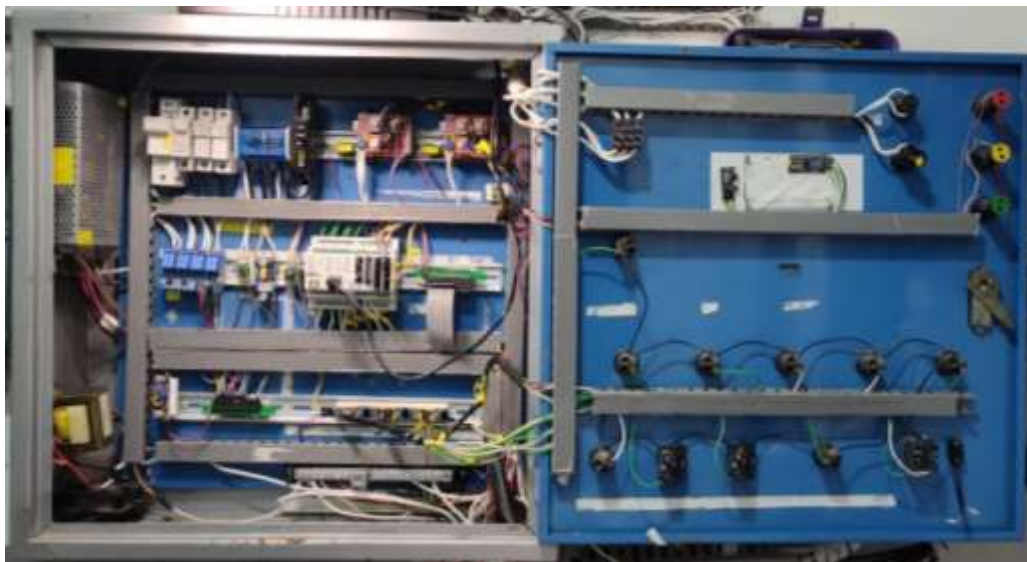
#### Figura 78

*Tablero eléctrico – vista exterior*



#### Figura 79

*Tablero eléctrico – vista interior*



## ***Subsistema de Control***

### **Problemática del sistema**

De todos los recursos que una planta necesita para crecer, el agua es el más importante. En especial en un sistema hidropónico, el exceso o escasez de agua afecta en el crecimiento y rendimiento de la planta, por lo cual este es un parámetro importante a tener en cuenta en la automatización. El problema que busca resolver la automatización es cubrir la demanda de agua de la planta a lo largo del día, ya que la falta de riego afecta el desarrollo de la planta e incluso se podría perder el cultivo entero. Además, se requieren acciones de monitoreo y supervisión en las distintas áreas dentro del invernadero donde se realiza el cultivo de plantas, para asegurar que los parámetros de cultivo sean óptimos.

### **Diseño del sistema**

#### **Diseño de la arquitectura de control**

Las consideraciones que se tuvieron para el algoritmo de control se indican según cada modo de operación.

- El estado hídrico de la planta varía a lo largo del día y cada día, dependiendo de las características morfológicas y fisiológicas de la especie vegetal, y las condiciones ambientales. Para esto se realizará un control de variables ambientales dentro del invernadero que propicien un ambiente adecuado para el crecimiento de la planta
- La planta transpira activamente en el día y en la noche descansa, por lo que la absorción del agua será mayor en el día. Eso requiere que la frecuencia y el tiempo de riego sea mayor en las horas del día, y disminuyan en la noche.
- El éxito del cultivo hidropónico está determinado por la constitución de la solución nutritiva, la relación existente entre los iones minerales, la conductividad eléctrica y el pH. Por esto, es necesario ingresar las cantidades adecuadas de solución nutritiva en el agua, y llevar un control del pH y EC acorde con los requerimientos de la planta.

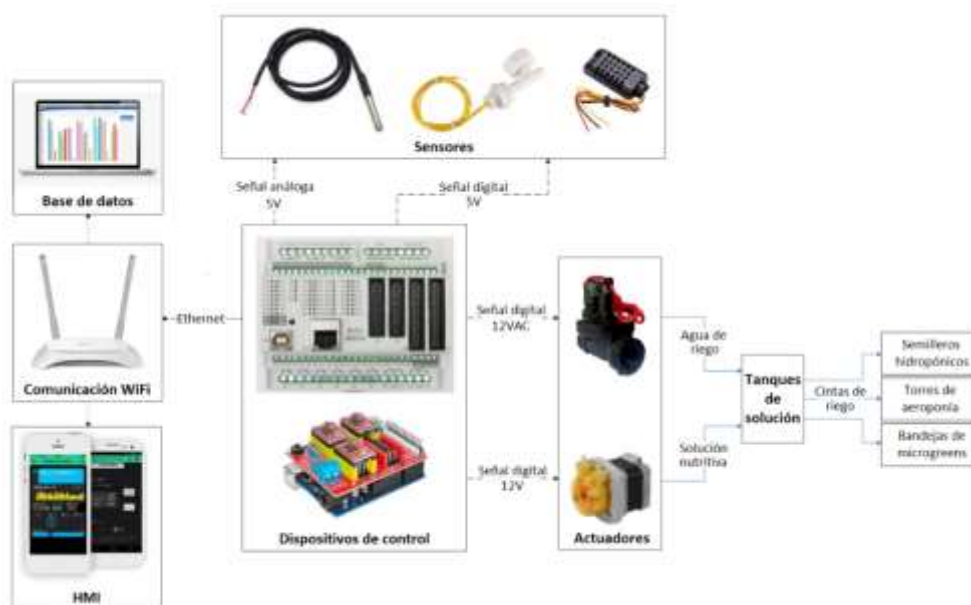


- La temperatura también es un factor crítico de la solución, ya que influye en la absorción de minerales y disponibilidad de oxígeno. Debido a esto se requiere llevar un control de temperatura de los tanques y generar una acción que regule esta variable.
- El sistema debe funcionar automáticamente de acuerdo a los parámetros medidos por los sensores, sin embargo, también se debe manipular el sistema desde el panel de control ubicado en el invernadero. Además, para simplificar el mantenimiento y las comprobaciones del sistema en cualquier parte del invernadero, es necesario un control de forma remota que sea intuitivo y de fácil manejo para el usuario.
- Para poder llevar un registro del funcionamiento del sistema y la variación de los parámetros de cultivo, es necesario almacenar los datos recopilados de los sensores en una base de datos que permita visualizar los históricos del invernadero para analizar el comportamiento del sistema.

En base a estos requerimientos, se diseñó el algoritmo de funcionamiento del sistema, el cual se divide en tres modos de operación: manual, IoT y automático, además de incluir una conexión con una plataforma de base de datos en internet. El diagrama de conexión del sistema se presenta en la **Figura 80**, y la explicación de cada modo de funcionamiento se describe a continuación.

**Figura 80**

*Diagrama de comunicaciones del sistema*



### Modos de operación

- Modo manual

Este modo permite controlar el sistema desde los elementos de mando del panel de control, los cuales se muestran en la **Figura 78**. El panel frontal del tablero eléctrico, está compuesto por luces piloto que indican el funcionamiento de las bombas primaria y secundaria, estado de emergencia y los modos de funcionamiento. También cuenta con un selector de 3 posiciones para los modos de funcionamiento del sistema, y 10 pulsadores que cumplen las siguientes funciones:

- Confirmación IoT: permite inicializar el Modo IoT
- Solución A: activa la bomba peristáltica de la solución A del tanque seleccionado
- Solución B: activa la bomba peristáltica de la solución B del tanque seleccionado
- Ácido: activa la bomba peristáltica del ácido del tanque seleccionado
- Llenado de agua: activa la secuencia de válvulas necesarias para llenar el tanque seleccionado

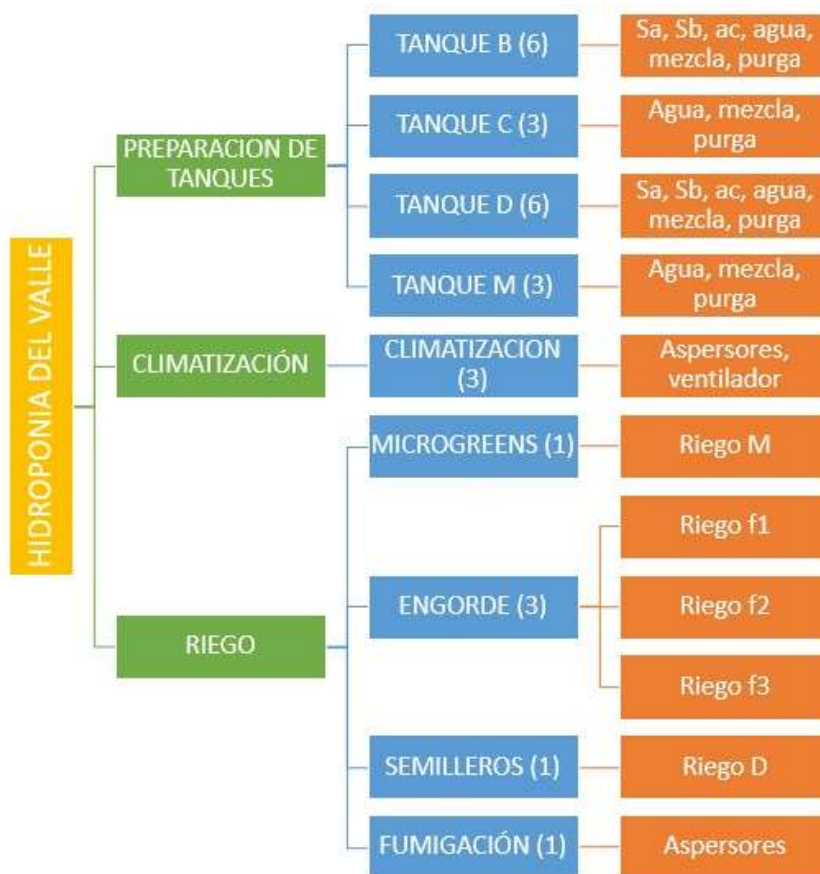
- Purga: permite activar la secuencia de válvulas necesarias para realizar un drenaje del tanque seleccionado
- F1: botón de función múltiple que activa la secuencia de válvulas necesarias para el riego de la fila 1 de engorde, el riego de microgreens o el accionamiento de los aspersores aéreos, según la función seleccionada
- F2: botón de función múltiple que activa la secuencia de válvulas necesarias para el riego de la fila 2 de engorde o el accionamiento de los ventiladores, según la función seleccionada
- F3: botón de función múltiple que activa la secuencia de válvulas necesarias para el riego de la fila 3 de engorde o el riego de semilleros, según la función seleccionada

Por último, se tiene una pantalla LCD y un encoder, juntos permiten generar un menú para seleccionar las diferentes funciones del modo manual. Este menú se realizó de acuerdo al diagrama de flujo mostrado en la **Figura 81**, con el objetivo de reducir los botones necesarios y utilizar únicamente los que ya se encontraban instalados en el tablero.

El menú se distribuye en 3 niveles que corresponden a las pantallas presentadas en la pantalla LCD. En el primer nivel se escoge la función a realizarse, en el segundo nivel se selecciona el tanque o riego en el que se desea realizar la función, y en el tercer nivel se presentan los botones habilitados para dicha selección. Además, se tiene una pantalla de espera que se activa al no haber interacción en 30 segundos. Un ejemplo se ilustra en la **Figura 82**, para la función de preparación del tanque B.

Figura 81

Diagrama de flujo del menú del encoder



Los botones que se muestran en el tercer nivel, según la función seleccionada, se habilitan directamente desde el programa, es decir, que se asigna la acción de acuerdo a la selección de la función del primer nivel y el tanque o riego del segundo nivel. Los botones que no se muestran en pantalla no realizan ninguna acción. Esto es importante, especialmente para los botones de función múltiple.

## Figura 82

Pantalla de modo manual: a) Pantalla de espera, b) Primer nivel, c) Segundo nivel, d) Tercer nivel



Las principales consideraciones del programa realizado para el modo manual fueron:

- Cada botón debe permitir accionar y detener la función asignada.
- Si una acción se encuentra en funcionamiento, ninguna otra puede ser activada al mismo tiempo.
- Cuando se presione un botón que active una función que necesite trabajo de la bomba, es necesario esperar un tiempo para permitir que la bomba tome presión antes de poder accionar otro botón.
- Se debe mostrar la mayor cantidad de información que sea de utilidad para el usuario.

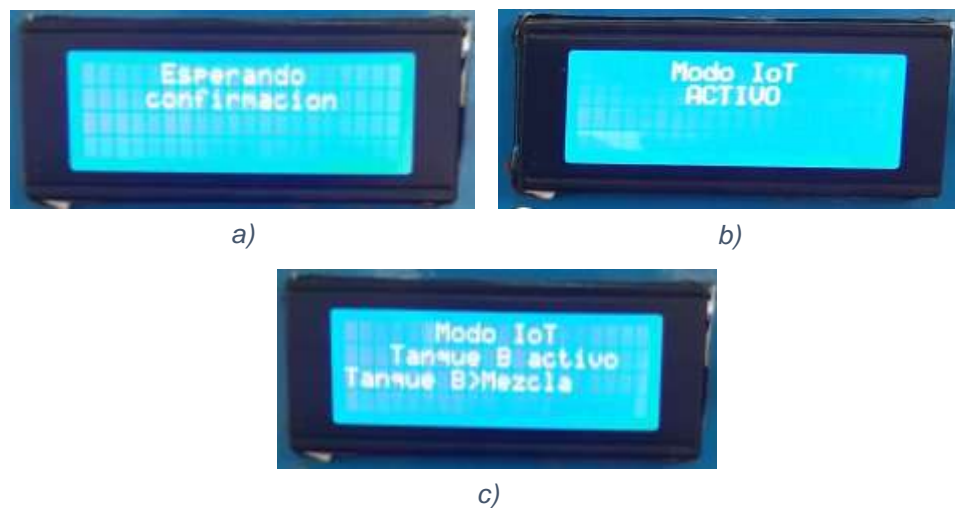
Tomando en cuenta estos puntos se realizó el algoritmo de control, el cual presenta en la pantalla LCD las funciones accionadas, el estado de espera de la bomba después de cada función, y avisos como “tanque vacío” o “tanque lleno”.

- Modo IoT

Este modo le da la posibilidad al usuario de controlar el huerto de forma remota y registrar los datos de pH y EC, además de manipular variables críticas como tiempos de riego, así como la cantidad de solución en los tanques. Esta última función se la puede realizar tanto en el modo IoT como en modo automático. Para cambiar a este modo, es necesario mover el selector y confirmar con el botón de confirmación ubicado en el tablero.

### Figura 83

*Pantalla de modo IoT: a) Espera de confirmación, b) Modo confirmado, c) Selección de función*



Se utilizó el software Blynk para crear una interfaz que será manipulada desde un Smartphone. Esta interfaz se divide en 3 pestañas:

- CONTROL IOT: en esta pestaña se encuentra los botones e indicadores que permiten controlar y monitorizar el huerto, se la toma como la pantalla principal.
- SET RIEGOS: esta pestaña permite realizar cambios en los tiempos de riegos del modo automático.
- ENVIO DATOS: es la pestaña que permite enviar hacia la base de datos los valores de pH Y EC adquiridos manualmente por el usuario.

La distribución de la pantalla principal correspondiente a “CONTROL IOT” se muestra en la **Figura 84**. De esta manera se facilita al usuario la inspección del estado del huerto y el uso de las diferentes funciones.

La primera sección, muestra la temperatura y humedad relativa en tiempo real del invernadero, además de un led que se enciende cuando hay una emergencia activada, lo cual indica que el proceso automático está detenido y el usuario debe acercarse a la planta y verificar el problema.

La segunda sección, permite seleccionar el tanque con el que se va a trabajar y habilitar los botones correspondientes en la sección de funciones. Los botones se encuentran sobre los indicadores de nivel del tanque correspondiente para un fácil reconocimiento.

La tercera sección, contiene los indicadores de nivel y temperatura de tanques, y luces que alertan cuando la solución nutritiva y el ácido se encuentran en nivel bajo. Estos indicadores funcionan tanto en el modo IoT como en el modo automático. Además, contiene una pantalla LCD virtual en la cual se presentan avisos de estado del riego, climatización y emergencias. También existe una luz de “espera” que se enciende cuando el sistema está finalizando una función que requiera trabajo de la bomba, ya que es necesario permitir que la bomba tome presión.

La cuarta sección, contiene los botones que permiten controlar el huerto y activar las diferentes funciones. Estos botones se habilitan de acuerdo al tanque escogido, a excepción de los botones de “ASPERSORES” y “VENTILADORES” que corresponden a la climatización. Por medio de la casilla de entrada numérica y los botones de “CALIBRAR SOL.” Y “ENVIAR DATO” se puede modificar la cantidad de solución que se ingresara al rellenar los tanques B o D, además cuenta con una luz indicadora de confirmación de envío.

Figura 84

Pantalla "CONTROL IOT"





La distribución de la pantalla “SET RIEGOS” se muestra en la **Figura 85**. Esta funciona únicamente en el modo IoT, y permite calibrar el setpoint de temperatura, los tiempos del riego y de aspersores de climatización. Las casillas de entrada numérica permiten ingresar el nuevo valor de la variable, mientras que los indicadores muestran el valor enviado a modificar el programa del Controllino, a modo de confirmación del valor ingresado.

### Figura 85

*Pantalla “SET RIEGOS”*



La distribución de la pantalla “ENVIO DATOS” se muestra en la **Figura 86**. Esta funciona tanto en modo automático como en modo IoT, permite enviar los datos de pH y EC tomados por el usuario. Contiene una luz que se enciende cuando el sistema no se encuentra realizando ninguna función, por lo que es posible enviar datos. Los botones permiten elegir el tanque que se está midiendo para registrar el dato correctamente en la base de datos.

**Figura 86***Pantalla “ENVIO DATOS”*

- Modo automático

Este modo es el principal, ya que contiene la esencia del trabajo que se está realizando. Esta parte del algoritmo se maneja por medio de horarios, por lo cual se utiliza el RTC integrado en el Controllino. Debido a configuraciones propias del hardware, existe un desfase de la hora del Controllino de aproximadamente 10 segundos en 15 días, lo cual puede presentar una alteración en los horarios a largo plazo. Por esta razón se programó una función para configurar el RTC a la hora de la red cada día.

Los horarios diarios para cada función se presentan en el Apéndice 1. La única función que no se repite todos los días es la fumigación, la cual se realiza los días lunes, miércoles, viernes y sábado. El riego de engorde es el único que tiene horario diurno y nocturno, que se diferencia por la frecuencia de riego, ya que en el día se necesitan más riegos debido a las condiciones ambientales, además el riego nocturno trabaja al 70% del tiempo configurado para el horario diurno.

Para realizar los algoritmos de las funciones correspondientes a cada riego, se utilizaron diagramas de flujo, como se muestran en el Apéndice 2. Para esto, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Antes de cada función de riego se debe realizar una climatización, por lo cual climatización tiene un diagrama de flujo independiente.
- Cada diagrama de flujo se traduce en una función independiente en el programa, por lo cual los diagramas deben ser independientes unos de otros.
- En los riegos es necesario comprobar previamente el nivel del tanque correspondiente para evitar que la bomba trabaje con un tanque vacío.
- En caso de que un tanque se vacíe en medio de un riego, la función se interrumpe.
- Los tanques B y D poseen un sensor de nivel medio, el cual enviará la señal para llenar el tanque e ingresar la cantidad de solución determinada mediante experimentación.
- El tanque B se encuentra fuera del invernadero y se ve afectado por la temperatura exterior lo que disminuye la temperatura de la solución, por lo que tendrá un calefactor controlado por un sensor de temperatura de líquidos.
- El tanque D se encuentra dentro del invernadero y se ve afectado por la temperatura ambiente lo que aumenta la temperatura de la solución, por lo que requiere un enfriamiento de la solución que se realizará por recirculación, cuyo tiempo de accionamiento está controlado por un sensor de temperatura de líquidos.
- Los semilleros trabajan con el sistema de flujo y reflujos, lo cual afecta el equilibrio de la solución cada vez que se hace un riego, según se comprobó por experimentación. Por esta razón, se propuso integrar una función de compensación de ácido en el tanque D para mantener el nivel de pH dentro del rango óptimo.

El sistema está diseñado para trabajar con lechugas, por lo cual los valores de las variables críticas del riego se configuraron para este tipo de cultivo. Sin embargo, si se desea trabajar con otro tipo de planta el usuario necesita ajustar estos valores para asegurar un

desarrollo óptimo del cultivo. Por esta razón, se incluyeron funciones de ajuste para el tiempo de riego y la cantidad de solución que ingresa a los tanques, de modo que el usuario pueda recalibrar los parámetros desde la interfaz de Blynk.

### Diseño de base de datos

La base de datos propuesta pretende almacenar valores de los sensores con los que se está trabajando, para poder obtener históricos que permitan realizar un análisis del desempeño del sistema. Para la selección de la plataforma, se consideró 3 aspectos importantes: menor costo de suscripciones, disponibilidad 24/7, capacidad de lectura/escritura. La **Tabla 5** presenta una comparación entre 4 plataformas con las características que ofrece en la versión gratuita.

**Tabla 5**

*Comparación de plataformas para base de datos*

Características	Plataformas de base de datos			
	MongoDB	Thingspeak	PlanetScale	Cayenne
Almacenamiento	512MB	N/A	5GB	N/A
No. Conexiones	500/mes	250000/mes	10millones/mes	25920/mes
Conexiones simultaneas	Ilimitado	4	Ilimitado	50
Tiempo entre conexiones	Ilimitado	20seg	Ilimitado	600seg
Sistema de gestión de bases de datos	PostgreSQL	No	MySQL	No

*Nota.* Los valores N/A quieren decir que no es aplicable para esa característica.

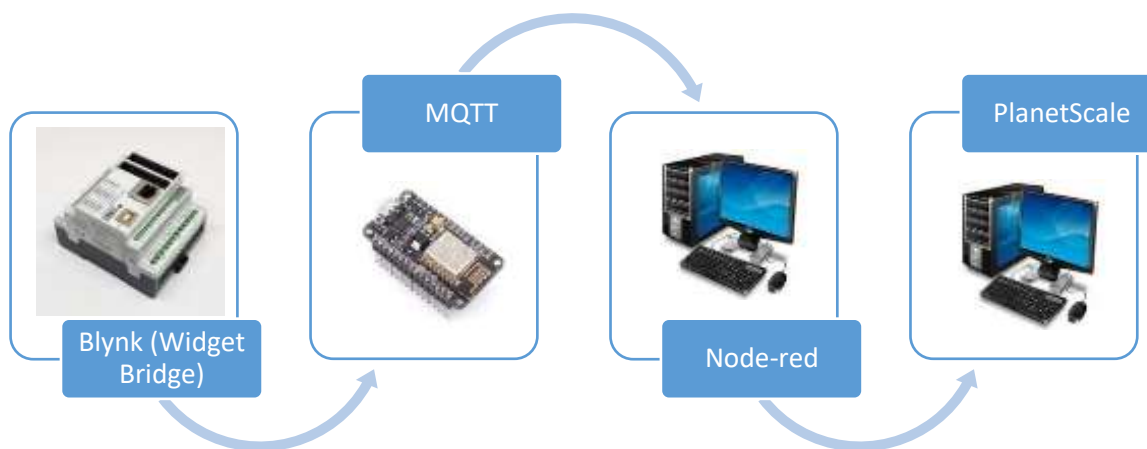
Los datos que se guardan en la base son 15 en total y corresponden a los sensores de temperatura y humedad, temperatura de los tanques, registro manual de pH y EC, temperatura de los tanques, niveles de los tanques y funciones. De acuerdo a la frecuencia con la que se

obtienen los datos, se calcula que se registran aproximadamente 1350 datos al día, es decir 40500 datos al mes. Se optó por utilizar PlanetScale ya que tiene el mayor almacenamiento disponible y número de conexiones mensuales.

La desventaja de esta plataforma es que no es una plataforma IoT, sin embargo, se hizo uso de un ESP8266 y el protocolo de comunicación MQTT para poder comunicar los datos desde los sensores conectados al Controllino hacia una hoja de cálculo de Excel donde se presentan los datos como gráficas. Este proceso se puede definir en cuatro etapas: adquisición, envío, recepción, y presentación de datos, como se muestra en la **Figura 87**.

### Figura 87

*Esquema de conexión de la base de datos*



- Adquisición de datos

En la primera etapa, el Controllino adquiere los datos y, por medio del widget de Blynk llamado "Bridge", se logra realizar una comunicación entre dispositivos con el ESP8266. Este widget permite enviar comandos de escritura digitales/analógicos/virtuales de un dispositivo a otro, conociendo el token de autenticación del dispositivo receptor, en este caso, del ESP8266. Se creó una función en el programa llamada *fn\_bridge*, donde se acondicionan los datos que serán enviados (por ejemplo, los sensores de nivel de cada tanque, que pasan a la base de

datos como un porcentaje de llenado del tanque) y posteriormente se escriben en pines virtuales que serán leídos por el ESP8266.

- Envío de datos

En la segunda etapa, el ESP8266 funciona como hardware que recibe los datos del Controllino, los acondiciona como tipo “string” y los publica, utilizando el protocolo MQTT, en el bróker Mosquitto instalado en el ordenador de la empresa “Aeroponía del Valle”. Se optó por tener al ESP8266 como “intermediario” de los datos ya que, si el bróker llegara a desconectarse, la comprobación de conexión periódica podría generar retrasos en el programa principal del Controllino.

- Recepción de datos

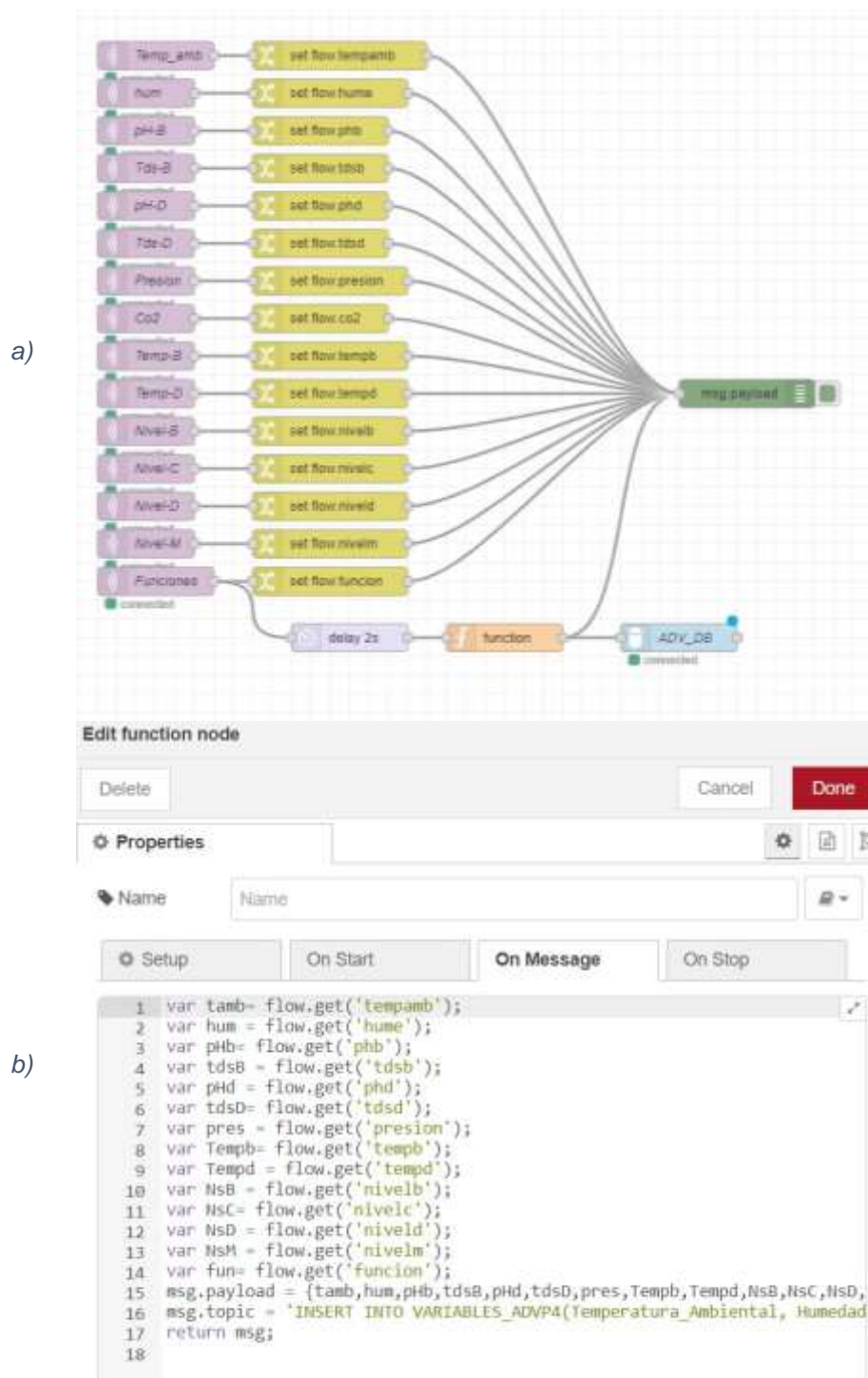
En la tercera etapa se tiene como hardware el ordenador, donde por medio de Node-Red se reciben los datos del bróker Mosquitto, los cuales serán acondicionados mediante un nodo de función que une las variables en una línea de comando en lenguaje MySQL, para ser enviada a la base de datos PlanetScale. El bróker Mosquitto y la plataforma Node-Red se instalan como servicios que actúan en segundo plano. El programa de Node-Red y el nodo de función se pueden observar en la **Figura 88**.

- Presentación de datos

Antes de que la base de datos en PlanetScale pueda recibir la información, se debe crear la tabla en la cual se ordenaran los datos. Esta tabla, llamada “Datos\_ADV”, se programa en lenguaje MySQL, como se muestra en la **Figura 89**, y presenta los datos adquiridos de Node-Red más el dato de tiempo que contiene la hora y fecha en la que se realizó la captura de datos.

Figura 88

Programa Node-Red, a) Conexión de nodos, b) Código de nodo de función



## Figura 89

Código de creación de tabla en PlanetScale

```

> CREATE TABLE `Datos_ADV` (
  `Temperatura_Ambiental` varchar(255),
  `Humedad_Relativa` varchar(255),
  `pH_B` varchar(255),
  `Tds_B` int,
  `pH_D` varchar(255),
  `Tds_D` int,
  `Presion` int,
  `Temperatura_B` varchar(255),
  `Temperatura_D` varchar(255),
  `Nivel_B` int,
  `Nivel_D` int,
  `Nivel_C` int,
  `Nivel_M` int,
  `Funciones` varchar(255),
  `Tiempo` timestamp NULL DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP()
)

```

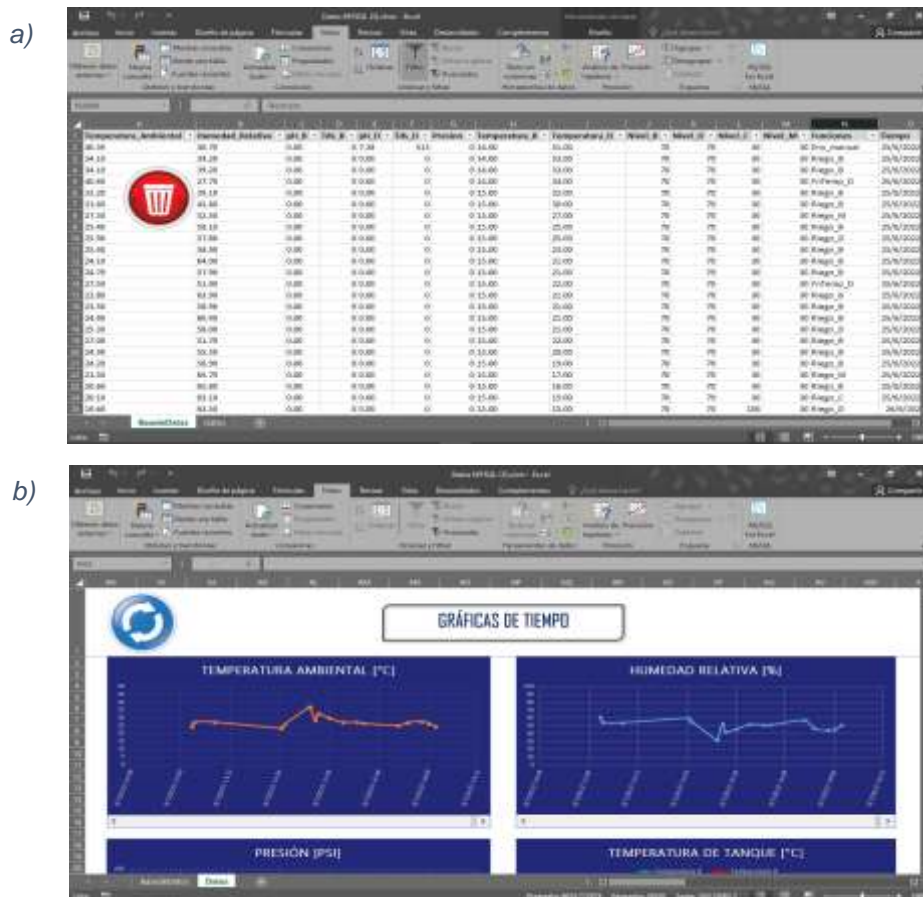
Posteriormente, mediante una hoja de cálculo de Excel se importan los datos desde PlanetScale, de manera que el usuario pueda visualizar los datos en tablas y gráficas. Se utiliza el complemento de MySQL para Excel y botones implementados con macros para cargar los datos y actualizar las gráficas a la fecha actual, como se observa en la **Figura 90**.

En conclusión, esta solución fue aplicada ya que permite una fácil conexión con Controllino evitando cualquier tipo de interferencia en el programa principal, ya que la función *fn\_bridge* únicamente realiza una corrida sin interrupción, sin importar el estado de conexión con internet o con el bróker Mosquitto. No fue necesario pagar una suscripción para PlanetScale, aunque de ser necesario se tiene la posibilidad de ampliar sus características mediante un pago mensual, mientras que el software Mosquitto y la plataforma NodeRed son de código abierto.



Figura 90

Hoja de cálculo de Excel, a) Tabla de datos, b) Gráficas de tiempo



En cuanto a la fiabilidad del sistema, depende mucho del ordenador que la empresa facilita y de la red de internet en la locación del invernadero. La plataforma PlanetScale brinda un respaldo de los datos y asegura un funcionamiento sin interrupciones de la base de datos, además actualiza 10 millones de escrituras y 1 billón de lecturas mensualmente, lo que sobrepasa el requerimiento del sistema.

## Capítulo 4

### Experimentación para Calibración del Sistema

Los siguientes experimentos se realizaron para determinar los valores adecuados para los parámetros de control, los cuales influyen en las variables principales de funcionamiento del invernadero y permitirán un crecimiento óptimo de las plantas. La relación de los parámetros y las variables de funcionamiento se muestran en la **Tabla 6**.

**Tabla 6**

*Parámetros y variables de funcionamiento del invernadero*

Parámetros	Variables de funcionamiento	Niveles requeridos
Tiempo de accionamiento de aspersores y ventiladores	Temperatura ambiente del invernadero	24-28 °C
Volumen de solución nutritiva añadida al tanque	Nivel de conductividad eléctrica (EC) del agua del tanque	600-800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el tanque D  1200-1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el tanque B
Volumen de ácido añadido al tanque	Nivel de pH del agua del tanque	5.5-6.5

Para realizar la medición de temperatura ambiente, se utilizó un sensor digital de temperatura y humedad AM2301 de la marca Aosong, cuyas características se presentan en la **Figura 91**. Este sensor es el utilizado en la automatización, por lo que las mediciones se toman desde los indicadores del sistema, es decir, desde el tablero de control o la interfaz de Blynk.

## Figura 91

### Características del sensor AM2301

#### 5、Sensor performance

##### 5.1 Relative humidity

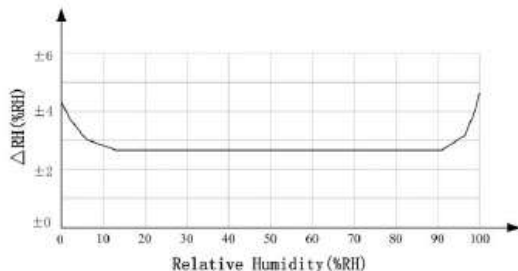
Table 2: AM2301 Relative humidity performance table

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		%RH
Range		0		99.9	%RH
Accuracy <sup>[1]</sup>	25°C		± 3		%RH
Repeatability			± 1		%RH
Exchange	Completely interchangeable				
Response <sup>[2]</sup>	1/e(63%)		<6		S
Sluggish			± 0.3		%RH
Drift <sup>[3]</sup>	Typical		<0.5		%RH/yr

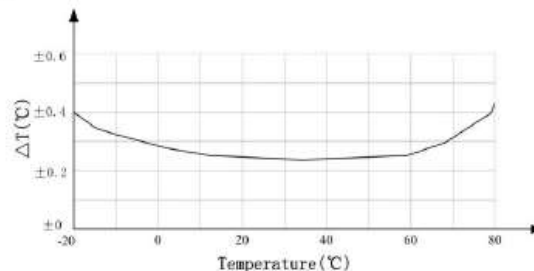
##### 5.2 Temperature

Table 3: AM2301 Relative temperature performance

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		°C
				16	
Accuracy			± 0.3	± 1	°C
Range		-40		80	°C
Repeat			± 0.2		°C
Exchange	Completely interchangeable				
Response	1/e(63%)		<10		S
Drift			± 0.3		°C/yr



Pic2: At25°C. The error of relative humidity



Pic3: The maximum temperature error

Nota. Tomado de *Temperature and humidity module AM2301 Product Manual*, por Aosong Electronics Co. Ltd.

Para realizar la medición del pH y EC, se empleó un medidor electrónico PC60 Premium Multiparameter de la marca APERA, cuyas características se presentan en la **Figura 92**. Este sensor posee una compensación de temperatura de 2%/°C como valor predeterminado, por lo cual es usado en todos los experimentos.

**Figura 92***Características del medidor electrónico APERA*

pH	Range	-2.00 to 16.00 pH
	Resolution	0.01 pH
	Accuracy	±0.01 pH
	Calibration Points	1 to 3 points
	Automatic Temperature Compensation	0 - 50°C
Cond.	Range	0 to 200.0 µS, 0 to 2000 µS, 0 to 20.00 mS
	Resolution	0.1/1 µS, 0.01 mS
	Accuracy	±1% F.S

*Nota.* Tomado de Apera Instruments.

El valor de pH depende de variables externas como la temperatura ambiente, el contacto con otras sustancias, la temperatura del líquido, la calibración del sensor, entre otras, por lo cual se debe seguir un protocolo para obtener mediciones lo más precisas posibles. Se tomó la decisión de realizar una calibración de 2 puntos para pH con las soluciones de 7.00 y 4.00, ya que todos los valores a medir son menores a 7, y en el caso de conductividad, se realiza la calibración con la solución de 1413 µS/cm, ya que con esta es posible trabajar los rangos deseados. Dichos valores se observan en la tabla de calibración de la **Figura 93**.

El protocolo a seguir para calibrar el sensor, se tomó del datasheet del sensor. Este permite mantener características similares en cada una de las iteraciones de los experimentos al igual que la solución preparada. Este proceso se divide en 4 partes:

Figura 93

Datos de calibración de pH y EC del medidor electrónico APERA

Calibración	USA Series	NIST Series	Calibration Indication Icon	Recommended Accuracy and Range
1-point	7.00 pH	6.86 pH	(M)	Accuracy $\geq$ 0.1 pH
2-point	7.00 pH, 4.00 pH or 1.68 pH	6.86 pH, 4.01 pH or 1.68 pH	(L) (M)	Measurement Range < 7.00 pH
	7.00 pH, 10.01 pH or 12.45 pH	6.86 pH, 9.18 pH or 12.45 pH	(M) (H)	Measurement Range > 7.00pH
3-point	7.00 pH, 4.00 or 1.68 pH, 10.01 or 12.45 pH	6.86pH, 4.01 or 1.68pH, 9.18 pH or 12.45 pH	(L) (M) (H)	Wide Measurement Range

Calibration Indication Icon	Calibration Standards	Measuring Range
(L)	84 $\mu$ S/cm	0 - 200 $\mu$ S/cm
(M)	1413 $\mu$ S/cm	200 - 2000 $\mu$ S/cm
(H)	12.88 mS/cm	2 - 20 mS/cm

Nota. Tomado de Apera Instruments.

1. **Calibración del sensor de pH:** Se realiza una calibración de 2 puntos para obtener un mejor resultado en las medidas, los pasos a seguir son:
  - Se debe lavar la sonda con agua destilada y secarla
  - En los recipientes de calibración, se vierte solución calibradora hasta la mitad del recipiente. Esto se realiza para la solución de pH 7.00 y pH 4.00.
  - En el instrumento, entrar en modo calibración y sumergir la sonda una por una en los recipientes, el sensor indicará cuando se encuentre calibrado, mostrando una alerta en la pantalla.

- Antes de sumergir la sonda en el siguiente recipiente, esta debe ser limpiada con agua destilada y secada adecuadamente.

- Una vez realizada la calibración de 2 puntos, limpiar la sonda y secarla.

**2. Toma de medidas de pH:** Para realizar la medida del pH en cada uno de los experimentos, se tomó un litro de solución, pero ya que las medidas se tomaron en diferentes días, se intentó tener condiciones iniciales similares en cada medida, por lo cual todas las medidas se tomaron a las 8:00am, de forma que la temperatura del invernadero no se encuentre alta. Posteriormente, los pasos a seguir para la toma de la muestra son:

- Limpiar el recipiente donde se tomará el litro de muestra con agua destilada y secarlo.
- Llenar el recipiente con 1 litro de solución.
- En el caso del experimento de “Compensación de ácido”, se procede a tomar la medida directamente después de calibrar el sensor.
- Para el experimento “Volumen de soluciones nutritivas”, se debe tomar medidas del agua del tanque A y posteriormente lavar la sonda con agua destilada, después de ingresar %Sol.A y %Ac en el agua, y tomar la medida. Es importante calibrar el sensor por cada iteración del experimento.

**3. Calibración del sensor de Conductividad:** El sensor de conductividad es menos sensible y el fabricante indica que el sensor viene listo para usar, pero aun así recomienda realizar una calibración, la cual se realiza de la siguiente forma:

- Se debe lavar la sonda con agua destilada y secarla.

- En los recipientes de calibración, se vierte solución calibradora hasta la mitad del recipiente. Esto se realiza para la solución de 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 12.88  $\text{mS}/\text{cm}$ .
- En el instrumento, entrar en modo calibración y sumergir la sonda una por una en los recipientes, el sensor indicara cuando se encuentre calibrado mostrando una alerta en la pantalla.
- Una vez realizada la primera calibración, se toma una medida de la solución de 12.88  $\text{mS}/\text{cm}$ . Si esta es correcta, no es necesario recalibrar el sensor. Por el contrario, si es necesario calibrarla se procede con esta solución.
- Una vez realizada la calibración de 2 puntos, limpiar la sonda y secarla.

**4. Toma de medidas de Conductividad:** Para realizar la medida de conductividad, en cada uno de los experimentos se tomó un litro de solución. Cada medida se tomó a las 8:00am, al igual que para las medidas de pH, de forma que la temperatura del invernadero no se encuentre alta. Posteriormente, los pasos a seguir para la toma de la muestra son:

- Limpiar el recipiente donde se tomará el litro de muestra con agua destilada y secarlo.
- Llenar el recipiente con 1 litro de solución.
- En el caso del experimento de “Compensación de ácido”, se procede a tomar la medida directamente después de calibrar el sensor.
- Para el experimento “Volumen de soluciones nutritivas”, se deben tomar medidas del agua del tanque A y posteriormente lavar la sonda con agua destilada, después de ingresar %Sol.A y %Ac en el agua, y tomar la medida de conductividad. Es importante calibrar el sensor por cada iteración del experimento.

**Figura 94**

*Toma de datos con el medidor electrónico APERA*

**Tiempos de Climatización**

Las plantas de lechuga presentan una variación en su estado hídrico a lo largo del día, de acuerdo a las condiciones ambientales, por lo que es necesario controlar la temperatura dentro del invernadero. Para esto, se utilizó un sistema de refrigeración por evaporación de agua, en el cual se cuenta con aspersores aéreos y ventiladores ubicados por encima de las torres de engorde, los mismos que son accionados automáticamente de acuerdo a un setpoint de temperatura.

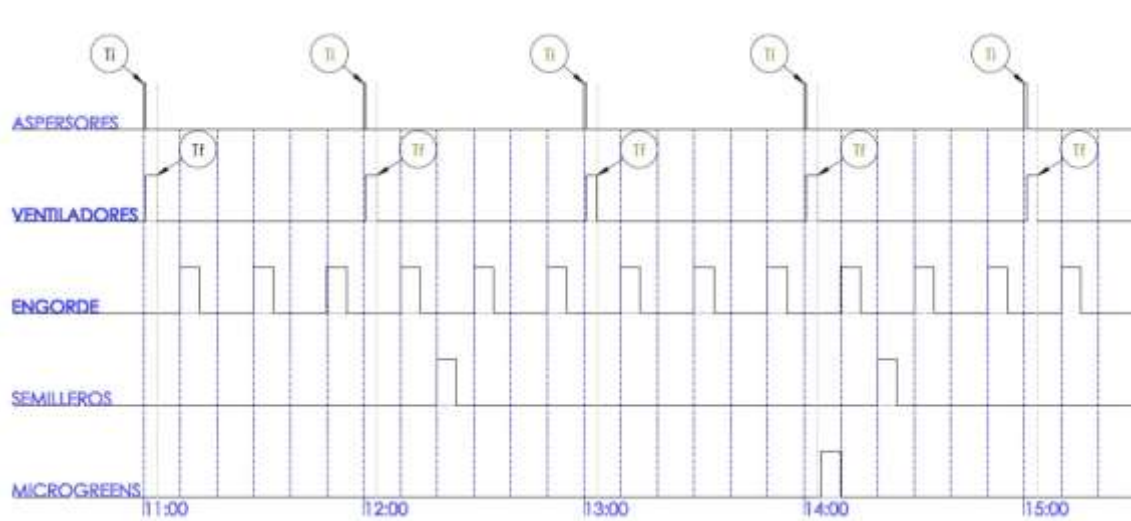
Para calibrar el tiempo de accionamiento de los aspersores y ventiladores, se realizó un experimento en el cual se probaron diferentes combinaciones de valores para cada parámetro, y poder determinar cuál de ellas permite reducir la temperatura del invernadero más rápidamente. El horario establecido para estas pruebas fue entre las 11am y las 3pm, en donde la temperatura es mayor.



El experimento se realizó tomando dos datos de temperatura, al inicio y al final de un ciclo de climatización, cada hora entre las 11 am y 3pm por 3 días. De acuerdo a las observaciones al finalizar este período, se modificaron los parámetros de tiempo de accionamiento de aspersores y ventiladores, y se repitió el experimento. En la **Figura 95** se muestra un fragmento del diagrama de tiempos del sistema de riego, para visualizar la hora a la que se tomaron los datos.

**Figura 95**

*Diagrama de tiempos del riego*



Por medio de pruebas anteriores realizadas por la empresa, se tomaron como valores iniciales 3 minutos de ventiladores y 40 segundos de aspersores. Se utilizó un diseño factorial completo con 3 réplicas, donde los factores a considerar fueron el tiempo de accionamiento de ventiladores (TV) y el tiempo de accionamiento de aspersores (TA), con 3 y 4 niveles respectivamente, como se muestra en la **Tabla 7**. Los datos se registran en la **Tabla 8**.

**Tabla 7***Factores y niveles para experimento de Tiempos de climatización*

<b>Factor</b>	<b>Nombre</b>	<b>Niveles</b>				<b>Unidades</b>
TV	Tiempo de accionamiento de ventiladores	3	4	5		Minutos [min]
TA	Tiempo de accionamiento de aspersores	10	20	30	40	Segundos [seg]

**Tabla 8***Pruebas para determinar tiempo de climatización*

<b>OrdenEst</b>	<b>OrdenCorrida</b>	<b>TipoPt</b>	<b>Bloques</b>	<b>TV</b>	<b>TA</b>	<b>DT</b>
1	1	1	1	3	10	2.86
2	2	1	1	3	20	2.71
3	3	1	1	3	30	2.57
4	4	1	1	3	40	2.26
5	5	1	1	4	10	6.10
6	6	1	1	4	20	5.56
7	7	1	1	4	30	4.93
8	8	1	1	4	40	4.14
9	9	1	1	5	10	9.50
10	10	1	1	5	20	9.18
11	11	1	1	5	30	8.62
12	12	1	1	5	40	7.76

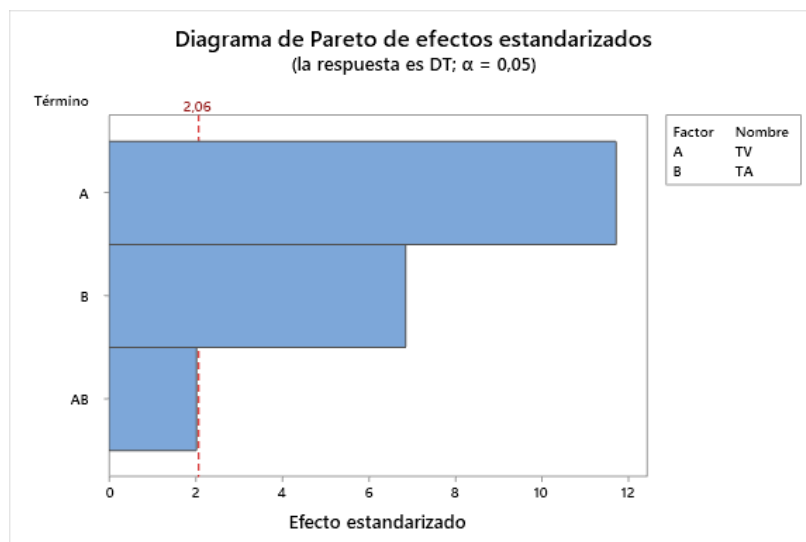
OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	TV	TA	DT
13	13	1	1	3	10	3.05
14	14	1	1	3	20	2.89
15	15	1	1	3	30	2.72
16	16	1	1	3	40	2.68
17	17	1	1	4	10	6.80
18	18	1	1	4	20	6.38
19	19	1	1	4	30	5.87
20	20	1	1	4	40	5.34
21	21	1	1	5	10	9.48
22	22	1	1	5	20	9.16
23	23	1	1	5	30	8.86
24	24	1	1	5	40	7.58
25	25	1	1	3	10	3.18
26	26	1	1	3	20	2.96
27	27	1	1	3	30	2.75
28	28	1	1	3	40	2.68
29	29	1	1	4	10	7.12
30	30	1	1	4	20	6.61
31	31	1	1	4	30	6.04
32	32	1	1	4	40	5.34
33	33	1	1	5	10	9.58
34	34	1	1	5	20	9.50
35	35	1	1	5	30	8.82
36	36	1	1	5	40	7.94

Se analiza el diseño factorial para investigar los efectos de los dos factores en la variación de temperatura ambiente del invernadero.

De acuerdo al diagrama de Pareto de los efectos y el análisis de varianza que se observan en la **Figura 96** y **Figura 97**, ambos factores son significativos, siendo el efecto más grande el tiempo de accionamiento de los ventiladores (TV). Sin embargo, la interacción de dos factores no es significativa, puesto que el valor p es mayor que el nivel de significancia de 0.05, por lo que se remueve la interacción del análisis.

### Figura 96

*Diagrama de Pareto de efectos – Tiempos de climatización*



### Figura 97

*Análisis de varianza – Tiempos de climatización*

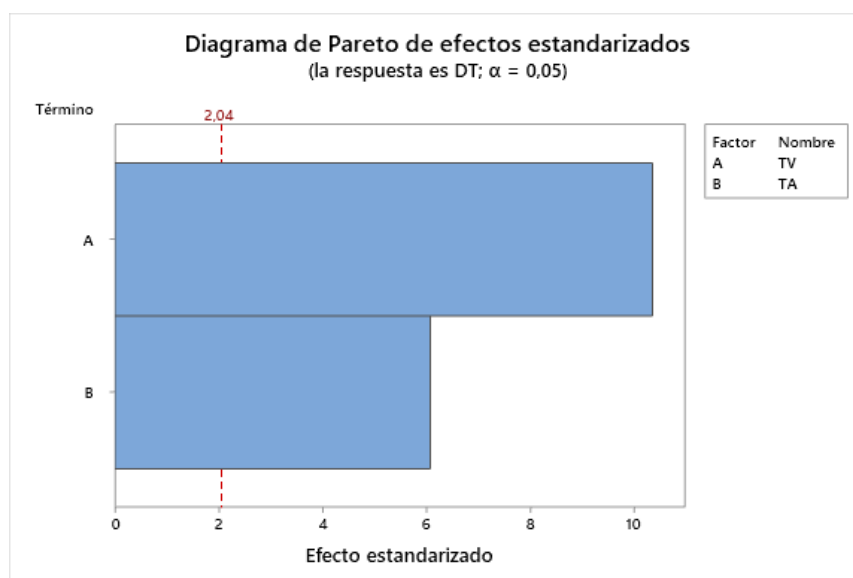
#### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	11	230,966	20,997	156,21	0,000
Lineal	5	228,989	45,798	340,72	0,000
TV	2	220,058	110,029	818,58	0,000
TA	3	8,932	2,977	22,15	0,000
Interacciones de 2 términos	6	1,976	0,329	2,45	0,054
TV*TA	6	1,976	0,329	2,45	0,054
Error	24	3,226	0,134		
Total	35	234,192			

Al remover la interacción, se puede observar en la **Figura 98** y **Figura 99** que los dos factores son significativos. Por otro lado, las gráficas de residuos de la **Figura 100** reflejan puntos aleatorios, con varianza constante, independientes entre sí y distribuidos normalmente, por lo que no indican problemas con el modelo. El valor  $R^2$  de la **Figura 101**, muestra que el modelo se ajusta extremadamente bien a los datos. Finalmente, en la **Figura 102** se presenta la ecuación de regresión del modelo, la cual puede ser utilizada para evaluar el mismo.

### Figura 98

*Diagrama de Pareto de efectos removiendo la interacción – Tiempos de climatización*



### Figura 99

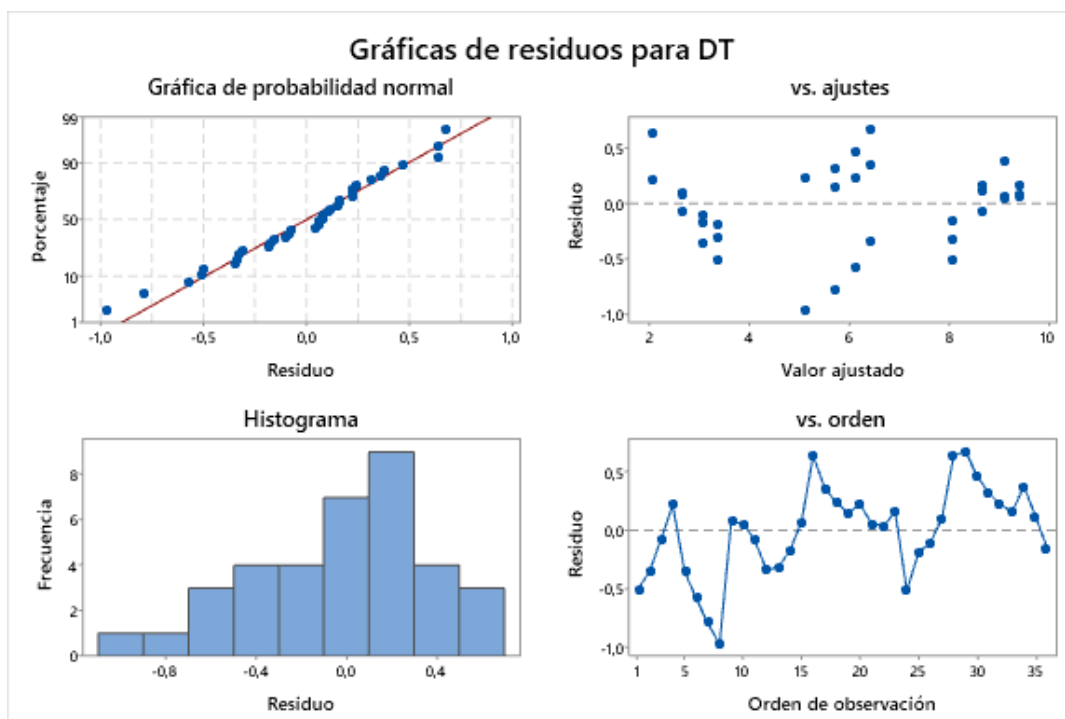
*Análisis de varianza removiendo la interacción – Tiempos de climatización*

#### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust. MC	Ajust. Valor F	Valor p
Modelo	5	228,989	45,798	264,10	0,000
Lineal	5	228,989	45,798	264,10	0,000
TV	2	220,058	110,029	634,51	0,000
TA	3	8,932	2,977	17,17	0,000
Error	30	5,202	0,173		
Falta de ajuste	6	1,976	0,329	2,45	0,054
Error puro	24	3,226	0,134		
Total	35	234,192			

**Figura 100**

*Gráficas de residuos (Verificación de supuestos) – Tiempos de climatización*

**Figura 101**

*Resumen del modelo – Tiempos de climatización*

### Resumen del modelo

	S	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
	0,416424	97,78%	96,80%

**Figura 102**

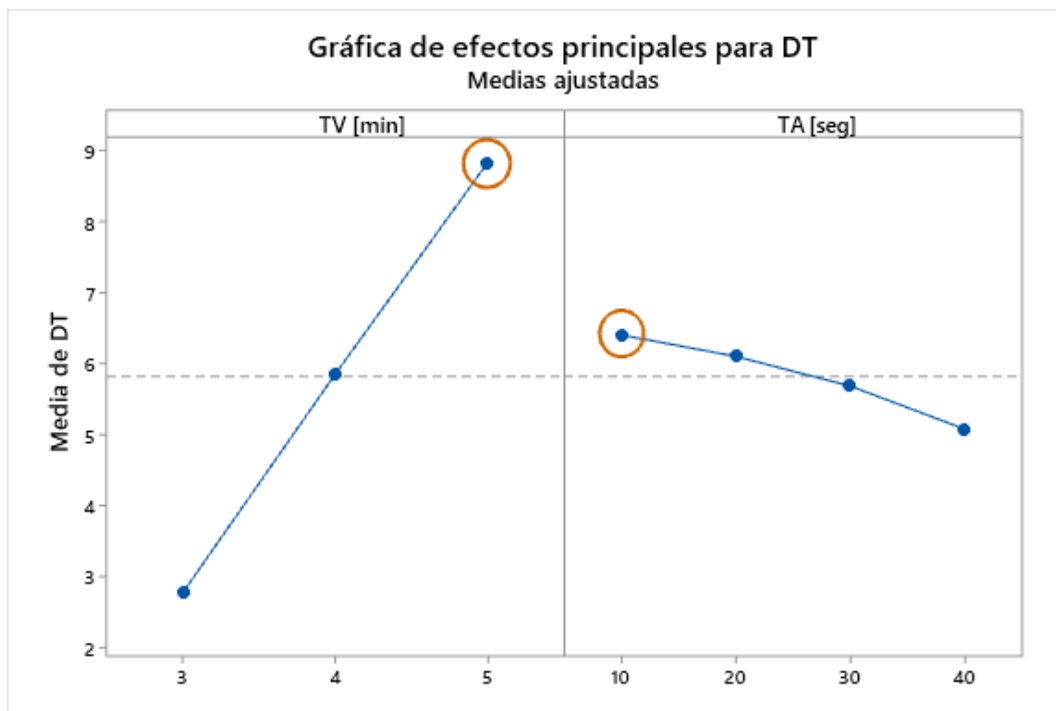
*Ecuación de regresión – Tiempos de climatización*

### Ecuación de regresión

$$DT = 5,8200 - 3,0442 TV_3 + 0,0325 TV_4 + 3,0117 TV_5 + 0,588 TA_{10} + 0,286 TA_{20} - 0,133 TA_{30} - 0,740 TA_{40}$$

**Figura 103**

*Variación de temperatura de acuerdo a los parámetros de climatización*



En la **Figura 103** se presenta la gráfica de efectos principales. Como se puede observar, la mayor tasa de variación de temperatura se obtiene con un tiempo de accionamiento de ventiladores de 5 minutos. El factor TA también se considera significativo, por lo que se determina un tiempo de accionamiento de aspersores de 10 segundos. De esta manera se logra enfriar más rápido el invernadero y se consume menos agua para cada ciclo de climatización.

### **Volumen de Soluciones Nutritivas**

El agua de riego de cada subsistema debe cumplir con un nivel de pH y EC para el buen desarrollo de la planta. Al remover los sensores de pH y EC de los tanques, no se puede realizar un programa que regule la solución continuamente de acuerdo al estado actual de la solución. Sin embargo, se propuso ingresar cantidades fijas de solución A, solución B y ácido en cada llenado del tanque de manera que la solución cumpla con los requisitos de cada riego.

Para poder calibrar la cantidad de solución nutritiva a ser ingresada, se realizó un experimento donde se añadió un volumen específico de solución nutritiva y ácido en un litro de agua, y se tomaron datos de EC y pH de la mezcla preparada utilizando el medidor electrónico APERA. Para cada prueba, los valores iniciales de pH y EC fueron de agua pura, es decir, que se cambió el agua entre cada experimento.

El valor inicial de pH y EC del agua para las pruebas fue de 6.43 y 227  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente. Estos valores varían de los valores determinados con el análisis de agua, de pH 7 y 220  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , debido a que el estudio del agua se realizó directamente de la fuente de agua de manantial, mientras que la toma de datos para el experimento se la realiza en un tanque que 500 lt que cumple la función de cisterna para el huerto, es decir, que las condiciones de la toma de medidas son diferentes para los dos casos y por eso se especula de esta variación. En el caso del pH, el valor deseado es de 6 (Ver **Figura 15**), ya que en este valor las raíces de la planta pueden absorber la mayor cantidad de minerales de la solución nutritiva. Por esto, a pesar de que el valor de pH se encuentra dentro del rango aceptable, se decidió bajar el valor de pH del agua a un valor cercano a 6 en cada iteración del experimento.

Fue necesario expresar la concentración de la solución nutritiva como porcentaje de volumen, para posteriormente determinar las cantidades adecuadas para el volumen real del tanque. El porcentaje de volumen se calcula como:

$$\% \left( \frac{v}{v} \right) = \frac{\text{volumen soluto}}{\text{volumen solución}} \times 100\% \quad (2)$$

Donde el soluto es la solución A, solución B y ácido, según corresponda, mientras que la solución es la suma de todos los solutos más el solvente que es el agua.

Se utilizó un diseño factorial completo, donde los 2 factores a considerar fueron el porcentaje de volumen de la Solución A (%Sol.A) y el porcentaje de volumen del ácido (%Ac), con 8 y 2 niveles respectivamente, como se muestra en la **Tabla 9**. Los datos obtenidos se



muestran en la **Tabla 10**. Este experimento se realizó con una sola réplica, ya que, al utilizar directamente la solución nutritiva usada para producción, era necesario realizar el experimento con la menor cantidad de desperdicio. En este tipo de experimento, se tiene el inconveniente de no poder modelar correctamente la variabilidad, por lo cual se debe tomar consideraciones como elegir niveles en la región donde los factores sean de interés y se conozca que se tiene una relación funcional entre el factor y la respuesta, además de eliminar del modelo la interacción entre los dos factores, tomando en cuenta únicamente la respuesta de cada factor.

**Tabla 9**

*Factores y niveles para experimento de Volumen de soluciones nutritivas*

<b>Factor</b>	<b>Nombre</b>	<b>Niveles</b>								<b>Unidades</b>
%Sol.A	Porcentaje de volumen de solución nutritiva A	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20	0.22	0.25	0.27	%Vol
%Ac	Porcentaje de volumen de ácido	0.10	0.15							%Vol

**Tabla 10**

*Pruebas para determinar volumen de solución nutritiva*

<b>OrdenEst</b>	<b>OrdenCorrida</b>	<b>TipoPt</b>	<b>Bloques</b>	<b>%Sol.A</b>	<b>%Ac</b>	<b>CE</b>	<b>pH</b>
1	1	1	1	0.1	0.1	595	6.26
2	2	1	1	0.1	0.15	635	6.15
3	3	1	1	0.12	0.1	678	6.23

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	%Sol.A	%Ac	CE	pH
4	4	1	1	0.12	0.15	690	6.1
5	5	1	1	0.15	0.1	789	6.2
6	6	1	1	0.15	0.15	800	6.11
7	7	1	1	0.17	0.1	875	6.13
8	8	1	1	0.17	0.15	915	6.08
9	9	1	1	0.2	0.1	983	6.1
10	10	1	1	0.2	0.15	1013	6.07
11	11	1	1	0.22	0.1	1123	6.09
12	12	1	1	0.22	0.15	1112	6.07
13	13	1	1	0.25	0.1	1249	6.06
14	14	1	1	0.25	0.15	1265	6.06
15	15	1	1	0.27	0.1	1369	6.05
16	16	1	1	0.27	0.15	1380	6.04

La **Figura 104** muestra los valores de CE obtenidos, y las líneas de referencia que indica los valores requeridos de CE, que son de 600-800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el tanque D y 1200-1400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el tanque B. De igual manera, la **Figura 105** muestra los valores de pH obtenidos y los límites de pH de 5.5 y 6.5 requerido para ambos tanques.

Es necesario analizar ambas gráficas al mismo tiempo, ya que ambos factores, %Sol.A y %Ac, afectan simultáneamente a la respuesta. Sin embargo, se podría considerar que la solución nutritiva (%Sol.A) afecta de mayor manera a la conductividad eléctrica (EC), y el ácido (%Ac) afecta más al pH, a pesar de que ambas sustancias son añadidas al tanque a la par.

Al trabajar con rangos de pH y EC, se puede tomar como referencia un valor intermedio del rango, es decir, se busca un punto cercano a un valor de EC de 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el tanque D y 1300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el tanque B, y un valor de 6 para el pH en ambos tanques.

Teniendo en cuenta esto, los valores adecuados de %Sol.A son de 0.12% y 0.25% que permiten acercarse al valor referencial de EC de 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 1300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , correspondientes a Semilleros y Engorde. Así mismo, el valor adecuado de %Ac para un pH cercano a 6 es de 0.15%.

### Figura 104

*Gráfica de efectos principales - Nivel de conductividad eléctrica (CE)*

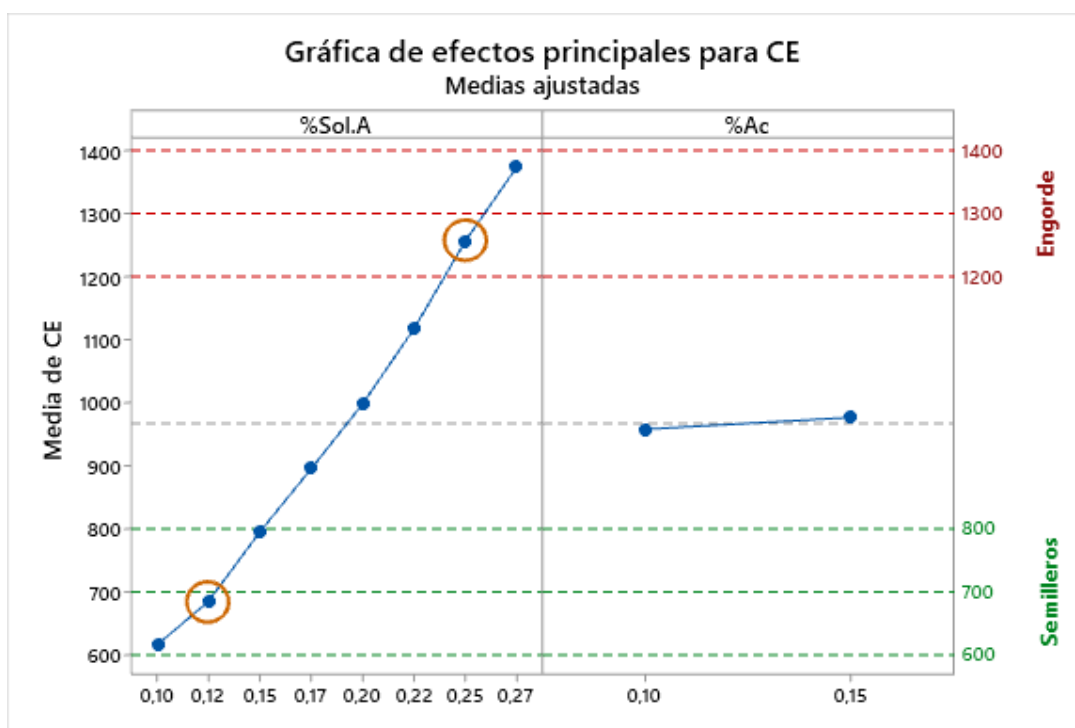
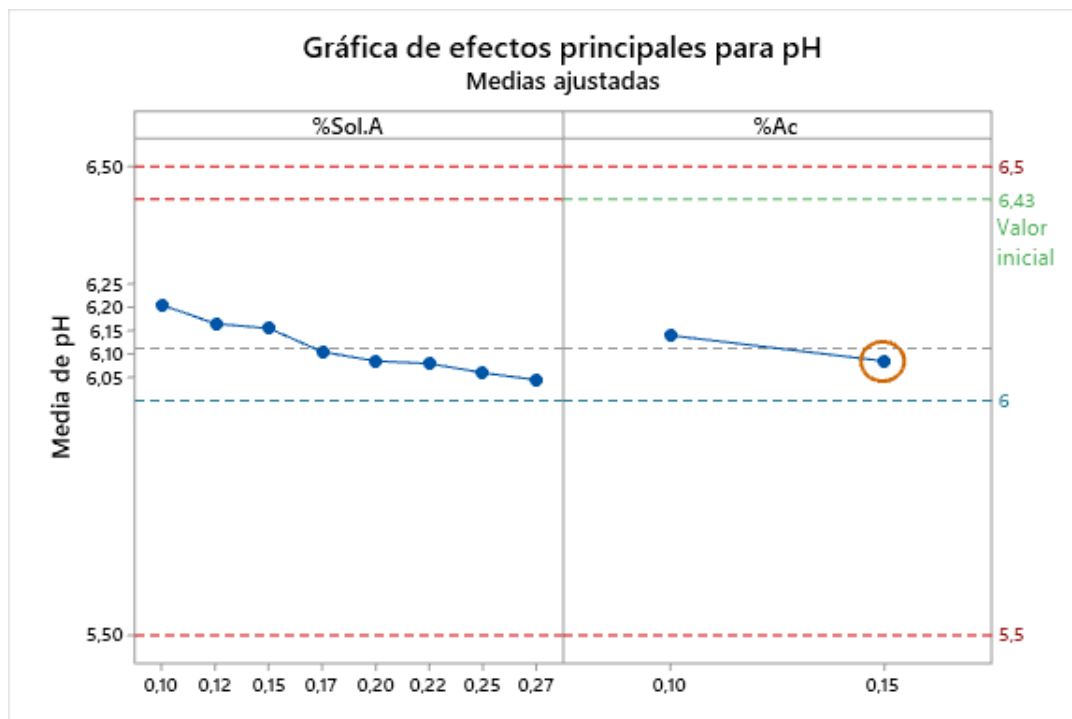


Figura 105

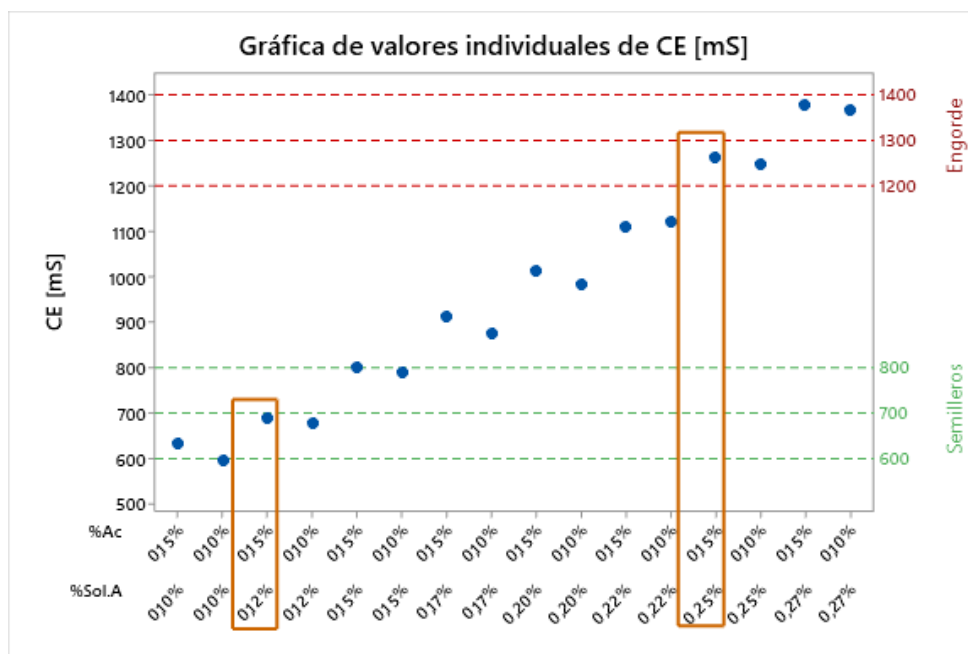
Gráfica de efectos principales - Nivel de pH



En la **Figura 106** y **Figura 107**, se puede comprobar que las combinaciones escogidas mantienen los niveles dentro del rango requerido de funcionamiento. Para el tanque D, un 0.12% de solución A y 0.15% de ácido dio como resultado un valor de conductividad eléctrica de 690  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un pH de 6.1. De igual manera, para el tanque B, un 0.25% de solución A y 0.15% de ácido dio como resultado un valor de conductividad eléctrica de 1265  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un pH de 6.06.

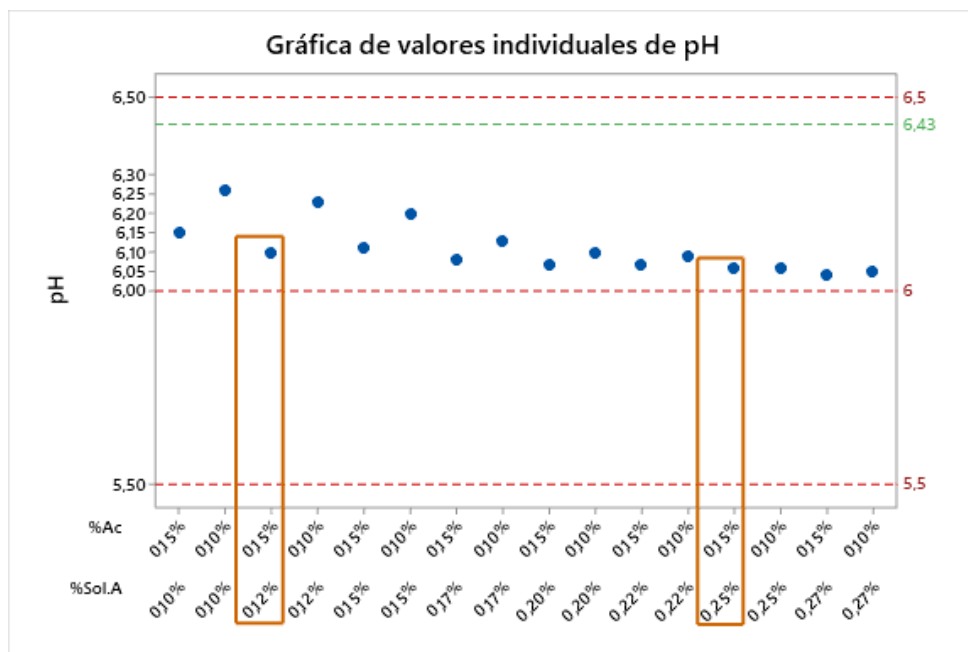
**Figura 106**

*Nivel de conductividad eléctrica (CE) de acuerdo a los porcentajes de volumen de solución A y ácido*



**Figura 107**

*Nivel de pH de acuerdo a los porcentajes de volumen de solución A y ácido*



Ambos tanques se llenan cada vez que se activa el nivel medio y se detiene cuando se activa el nivel alto, por lo cual se puede determinar un volumen de agua fijo que se acumula entre estos dos sensores, y a partir de este volumen calcular la cantidad específica de solución A, solución B y ácido que debe ingresar, teniendo en cuenta que la solución nutritiva B siempre equivale a la mitad de la solución nutritiva A. El volumen de agua de llenado del tanque D es de 42 lt, por lo que los valores ajustados para este volumen serán de 52.32 ml de solución A, 26.16 ml de solución B, y 62.79 ml de ácido. Por otro lado, el volumen de agua de llenado del tanque B es de 60 lt, por lo que los valores ajustados para este volumen serán de 149.22 ml de solución A, 74.61 ml de solución B, y 89.53 ml de ácido.

### **Compensación de Ácido**

El tanque de semilleros funciona mediante un sistema hidropónico de flujo y reflujo. En este sistema, el agua con solución inunda los semilleros para que la planta absorba los nutrientes necesarios, y posteriormente retorna al mismo tanque. Debido a la recirculación del agua, que entra en contacto con los semilleros, el pH de la solución cambia. Por esta razón, se consideró importante realizar un experimento para calibrar la cantidad de ácido requerido para compensar el pH de la solución después de un día de riegos. En el día se realizan 10 riegos de semilleros, se tomó como primer riego el que se realiza a las 7am.

Como primer paso, fue necesario determinar la cantidad de ácido que hace falta para reducir el pH del tanque D a un nivel de 6, el cual es un valor promedio del rango aceptable para la planta. Para esto, se tomaron 3 muestras de un litro agua de solución del tanque antes de iniciar el día de riegos.

En cada muestra, se tomó la medida del valor de pH inicial por medio de un medidor electrónico, siguiendo el mismo procedimiento de medición explicado en el anterior experimento. Posteriormente se añadió una cantidad de ácido hasta obtener un pH final de 6, y se registraron los datos. Por último, se procedió a calibrar la solución del tanque D a un pH de 6

para poder iniciar los riegos del día. Este procedimiento se repitió durante 5 días y al finalizar, se realizó el cálculo del porcentaje de volumen de ácido, para posteriormente determinar las cantidades adecuadas para el volumen real del tanque. Los datos obtenidos se muestran en la

**Tabla 11.**

**Tabla 11**

*Nivel de pH de acuerdo a los porcentajes de volumen de solución A y ácido*

Prueba N°	pH inicial	Vol. ácido (ml)	pH final	$\Delta$ pH	Vol. Total	%Ac
1	7.18	5.1	6.02	1.16	1005.1	0.51%
2	7.19	5	6.01	1.18	1005	0.50%
3	7.18	4.9	6.01	1.17	1004.9	0.49%
4	7.18	5.1	6	1.18	1005.1	0.51%
5	7.17	4.9	6.01	1.16	1004.9	0.49%
6	7.18	5.2	5.99	1.19	1005.2	0.52%
7	7.05	5	6.01	1.04	1005	0.50%
8	7.04	4.9	6.01	1.03	1004.9	0.49%
9	7.05	5.1	6	1.05	1005.1	0.51%
10	7.05	4.9	6	1.05	1004.9	0.49%
11	7.05	4.8	6	1.05	1004.8	0.48%
12	7.07	4.9	6.01	1.06	1004.9	0.49%
13	6.99	4.6	5.99	1	1004.6	0.46%
14	7	4.9	6.01	0.99	1004.9	0.49%
15	7	4.8	6	1	1004.8	0.48%
<b>Prom</b>		<b>4.954</b>	<b>6.005</b>	<b>1.087</b>		<b>0.49%</b>

El nivel de pH varía cada día, ya que depende de la temperatura del agua y el estado de la planta, en cuanto a su ciclo de crecimiento. Después de un día de riegos de semilleros, se determinó que, para equilibrar el pH de la solución a un valor de 6, se necesita añadir ácido en una proporción de 0.49%.

En este caso, no se puede determinar un valor fijo del volumen de solución en el tanque D, ya que este varía entre cada recirculación. Entonces se realizarán 3 suposiciones:

- El nivel de agua llega al sensor de nivel alto, es decir, el tanque está lleno y tiene un volumen de 125 lt
- El nivel de agua se encuentra en medio de los sensores de nivel medio y alto, lo cual representa un volumen de 104 lt
- El nivel de agua alcanza el sensor de nivel medio, es decir el tanque tiene un volumen de 83 lt

Para estos 3 volúmenes de agua, se calcula la cantidad de ácido que debería ingresar al tanque, de acuerdo a la proporción obtenida al inicio. Los volúmenes de ácido obtenidos son de 615, 511 y 408 ml. Posteriormente, se programó una compensación automática que se realiza antes del primer riego del día. Se probó cada semana con un volumen diferente de ácido, y se tomó el valor de pH después de hacerse la compensación. Finalmente, se realizó el cálculo del porcentaje de volumen de ácido, y se presentaron los datos en la **Tabla 12**. Los resultados se pueden observar de manera gráfica en la **Figura 108**.



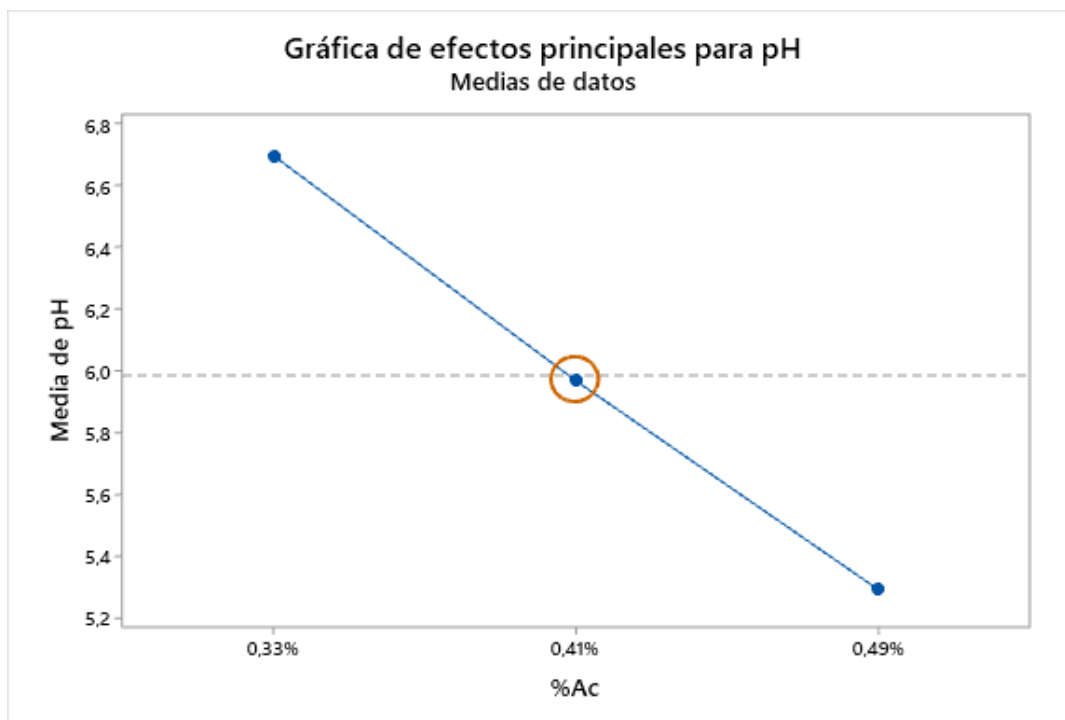
**Tabla 12***Pruebas para compensación de ácido de los semilleros*

<b>Prueba N°</b>	<b>Vol. Ácido [ml]</b>	<b>pH</b>	<b>Vol. Total</b>	<b>%Ac</b>
1	408	6.68	125408	0.33%
2	408	6.72	125408	0.33%
3	408	6.63	125408	0.33%
4	408	6.75	125408	0.33%
5	408	6.69	125408	0.33%
6	408	6.7	125408	0.33%
7	408	6.69	125408	0.33%
8	511	5.92	125511	0.41%
9	511	6.1	125511	0.41%
10	511	5.88	125511	0.41%
11	511	5.86	125511	0.41%
12	511	5.91	125511	0.41%
13	511	5.9	125511	0.41%
14	511	6.2	125511	0.41%
15	615	5.32	125615	0.49%
16	615	5.27	125615	0.49%

Prueba N°	Vol. Ácido [ml]	pH	Vol. Total	%Ac
17	615	5.28	125615	0.49%
18	615	5.3	125615	0.49%
19	615	5.35	125615	0.49%
20	615	5.19	125615	0.49%
21	615	5.34	125615	0.49%

**Figura 108**

*Gráfica de efectos - Nivel de pH después de la compensación de ácido*



De acuerdo con los datos obtenidos, una proporción de 0.41% de ácido añadido en el tanque mantiene el pH dentro del rango de 5.5 a 6.5, cerca del valor referencial de 6. Como se determinó en el análisis de agua de riego que se presenta en el Apéndice 3, el agua es de tipo

blanda, es decir, presenta una resistencia media a la acidificación. Por esta razón, la cantidad fija de ácido que se ingresa al tanque no se ve afectada por la variación del volumen de agua a lo largo del día. Considerando que el tanque tiene un volumen de 125 lt, la cantidad de ácido que debe ingresar en cada compensación es de 51.25 ml.

## Capítulo 5

### Resultados y Discusión

#### Pruebas de Funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento se realizaron en el invernadero de la empresa “Aeroponía del Valle”, ubicado en el Valle de los Chillos. Para la siembra en tierra, se utilizó una caja de madera de 1 m x 1 m x 0.35 m rellena de tierra negra mezclado con 20 gramos de fertilizante Cribosol 30-10-10, donde se ubicaron 8 plántulas de lechuga. Para la siembra en aeroponía, se utilizó una torre aeropónica metálica donde se ubicaron 110 plántulas de lechuga.

Ambos contenedores se ubicaron dentro del invernadero, es decir, que se encontraban en un ambiente controlado de temperatura y humedad. Las plántulas de lechuga se obtuvieron a partir de semillas de lechuga tipo Buttercrunch o Mantecosa, que se desarrollaron en los semilleros de flujo y reflujo del invernadero de la empresa “Aeroponía del Valle”. Las pruebas de cultivo se realizaron a partir del mes de septiembre, y se evaluó el desempeño del sistema en base al crítico de calidad, que es el tiempo de ciclo de cultivo.

Desde el primer día de cultivo hasta el último, se tomaron los datos de longitud de hoja más grande y número de hojas, utilizando un flexómetro y conteo manual. Es importante tener cuidado al manipular las hojas para evitar que se rompan. Al finalizar el ciclo, se tomaron datos del peso de una muestra aleatoria de 8 lechugas para comparar aquellas obtenidas con el sistema aeropónico vs. en tierra. Para la toma de datos, se utilizó una balanza electrónica.

Asimismo, se analizaron las variables de importancia para el cultivo, como son la temperatura del invernadero y el nivel de pH y EC. El dato de temperatura fue tomado a través del sensor de temperatura y humedad ambiente, mientras que los datos de pH y EC fueron tomados con el medidor electrónico de pH y EC de la marca APERA, el mismo que fue utilizado para la experimentación. Todos estos datos se obtuvieron directamente de la base de datos.

Finalmente, se realizó una comparación del volumen de agua utilizado a lo largo de todo el ciclo, tanto en el cultivo aeropónico automatizado como en el cultivo manual en tierra.

Además, se obtuvo el dato de rendimiento del cultivo en unidades de peso por metro cuadrado para ambos sistemas.

## Resultados

### *Desarrollo de las Lechugas*

A continuación, se presentan los datos de longitud y número de hojas a lo largo del ciclo, así como la duración del ciclo. Los datos fueron tomados cada 6 días.

La **Tabla 13** corresponde a la etapa de semillero, desde la germinación de la semilla hasta obtener la plántula. Este proceso se llevó a cabo en los semilleros del invernadero que funcionan mediante flujo y reflujo. Las plántulas obtenidas se utilizaron para el crecimiento tanto en las torres aeropónicas como en la tierra, ya que no se logró obtener plántulas por métodos tradicionales de cultivo.

**Tabla 13**

*Datos de lechugas en etapa de semillero*

Fecha	Longitud [cm]	No. de hojas	Observación	Duración
11/8/2022	-	-	<b>Se plantaron 128 semillas</b>	
17/8/2022	0.5	2	Germinaron pocas semillas	
23/8/2022	2	2	Germinaron todas las semillas	
29/8/2022	4	3	Una hoja más grande que otras	30
4/9/2022	6	3	Nuevo brote en el centro	
10/9/2022	7.5	4	<b>Paso a engorde</b>	

La etapa de crecimiento finaliza con la cosecha de la lechuga. La **Tabla 14** presenta los datos obtenidos con el sistema aeropónico, mientras que la **Tabla 15** presenta los datos de las lechugas sembradas en tierra.

**Tabla 14**

*Datos de lechugas en etapa de crecimiento – Sistema aeropónico*

<b>Fecha</b>	<b>Longitud [cm]</b>	<b>No. de hojas</b>	<b>Observación</b>	<b>Duración</b>
10/9/2022	7.5	4	<b>Paso a engorde</b>	
16/9/2022	9	4	Se secaron 3 plantas. raíces muy escasas	
22/9/2022	11	5	Tallo más largo	
28/9/2022	13	7	Empiezan a tomar textura	
4/10/2022	14.5	8	Hojas empiezan a curvarse	
10/10/2022	16	8	Hojas más grandes	60
16/10/2022	17	11	3 nuevos brotes	
22/10/2022	18.5	13	Filos marrones en ciertas hojas	
28/10/2022	21	17	Nuevos brotes	
3/11/2022	22	21	Hojas muy brillantes	
9/11/2022	22.5	25	<b>Cosecha de 98 lechugas</b>	

**Tabla 15***Datos de lechugas en etapa de crecimiento – Método tradicional*

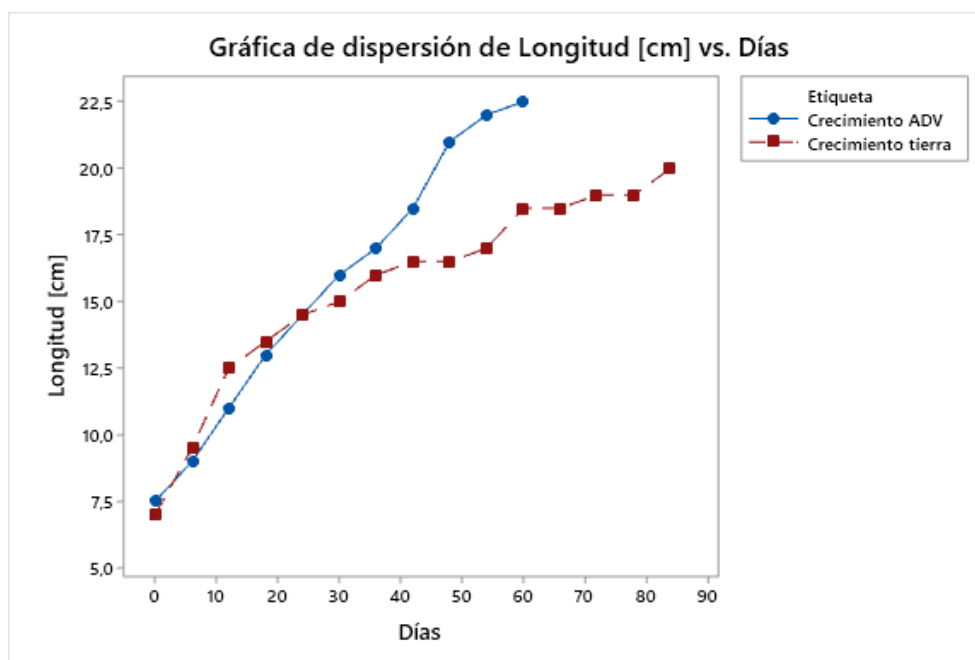
<b>Fecha</b>	<b>Longitud [cm]</b>	<b>No. de hojas</b>	<b>Observación</b>	<b>Duración</b>
10/9/2022	7	4	<b>Siembra de 8 plántulas de semilleros en tierra</b>	
16/9/2022	9.5	4	Una hoja más alta que otras	
22/9/2022	12.5	4	Tallo más largo	
28/9/2022	13.5	5	Hojas más grandes	
4/10/2022	14.5	5	Empiezan a tomar textura	
10/10/2022	15	6	<b>Trasplante a maceta más grande</b>	
16/10/2022	16	7	Hojas más anchas	84
22/10/2022	16.5	9	Nuevos brotes en el centro	
28/10/2022	16.5	11	Hojas se abren	
3/11/2022	17	13	Hojas empiezan a curvarse	
9/11/2022	18.5	15	1 planta afectada por plaga	
15/11/2022	18.5	16	Hojas más anchas	
21/11/2022	19	18	Nacen más brotes	
27/11/2022	19	20	Hojas muy brillantes	
3/12/2022	20	20	<b>Cosecha de 8 lechugas</b>	

Una vez finalizado el ciclo, se seleccionó la lechuga más grande obtenida, tanto en el sistema aeropónico como en el cultivo en tierra, para realizar la comparación de la longitud y número de hojas. Los resultados se muestran en la **Figura 109** para la longitud, y en la **Figura 110** para el número de hojas.

Como se puede observar, se alcanza una longitud de hoja de 22,5cm con el sistema aeropónico, mientras que la longitud obtenida con el método tradicional fue de 20cm. Por otro lado, el número de hojas obtenido con el sistema aeropónico fue de 25 hojas, mientras que con el método tradicional se obtuvieron 20 hojas. Estos datos muestran una ventaja del sistema aeropónico frente al método tradicional de cultivo.

### Figura 109

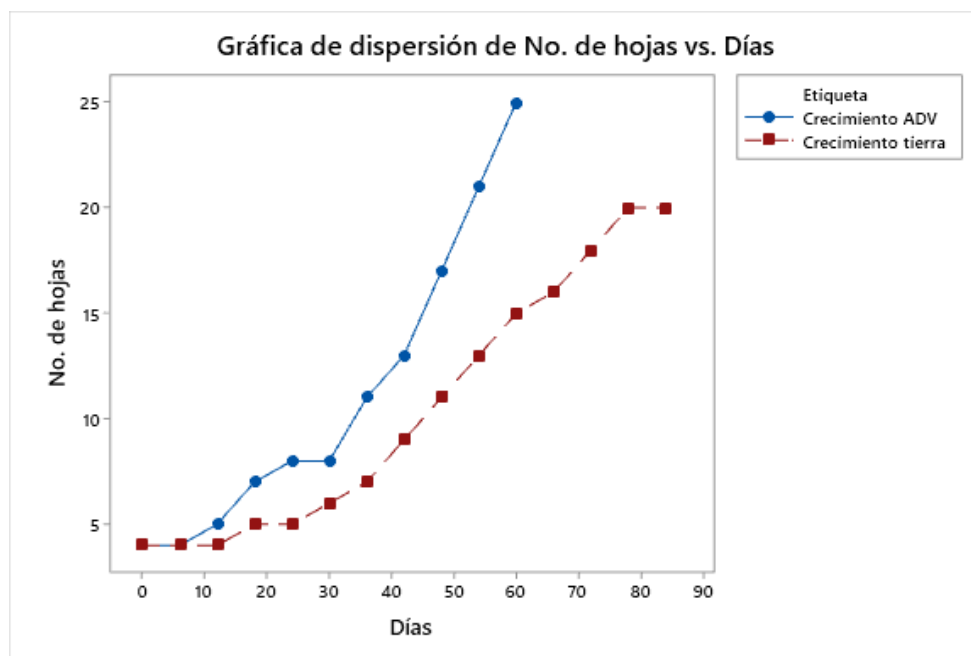
*Comparación de longitud de hoja más grande de lechuga obtenido por sistema de Aeroponía y sistema tradicional*





**Figura 110**

*Comparación de número de hojas de lechuga obtenido por sistema de Aeroponía y sistema tradicional*



También se seleccionó una muestra aleatoria de 8 lechugas obtenidas por Aeroponía para comparar con las lechugas obtenidas en tierra. Los datos se muestran en la **Tabla 16** y se tiene una gráfica explicativa en la **Figura 111**.

**Tabla 16**

*Peso de lechugas obtenidas por sistema aeropónico vs. método tradicional*

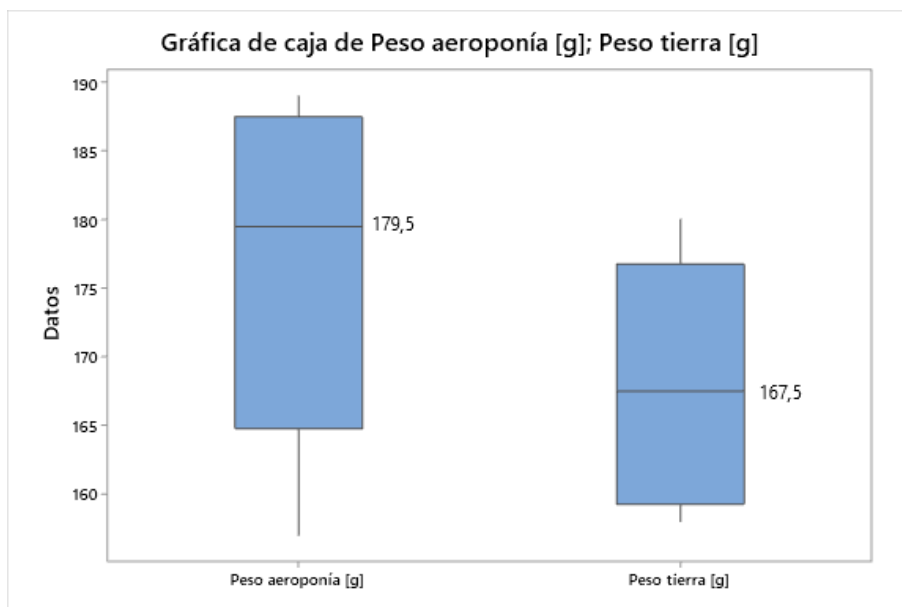
	<b>Aeroponía</b>	<b>Tradicional</b>
<b>N°</b>	<b>Peso [g]</b>	<b>Peso [g]</b>
1	173	180
2	189	159
3	157	178
4	188	173

5	162	160
6	183	165
7	176	158
8	186	170

El promedio de peso de las lechugas del sistema aeropónico es de 179.5g, mientras que, con el método tradicional, se obtuvo un peso de 167.5g. Se puede observar que existe una mayor variación de pesos en la aeroponía, esto se podría explicar debido a la ubicación de los aspersores dentro de las torres aeropónicas, ya que las plantas que están más bajas reciben más cantidad de agua que las que están en la parte superior. Sin embargo, aún se mantiene la ventaja del menor tiempo de producción de las lechugas frente al método tradicional en tierra.

### Figura 111

*Comparación de peso promedio de lechuga obtenido por sistema de aeroponía y sistema tradicional*



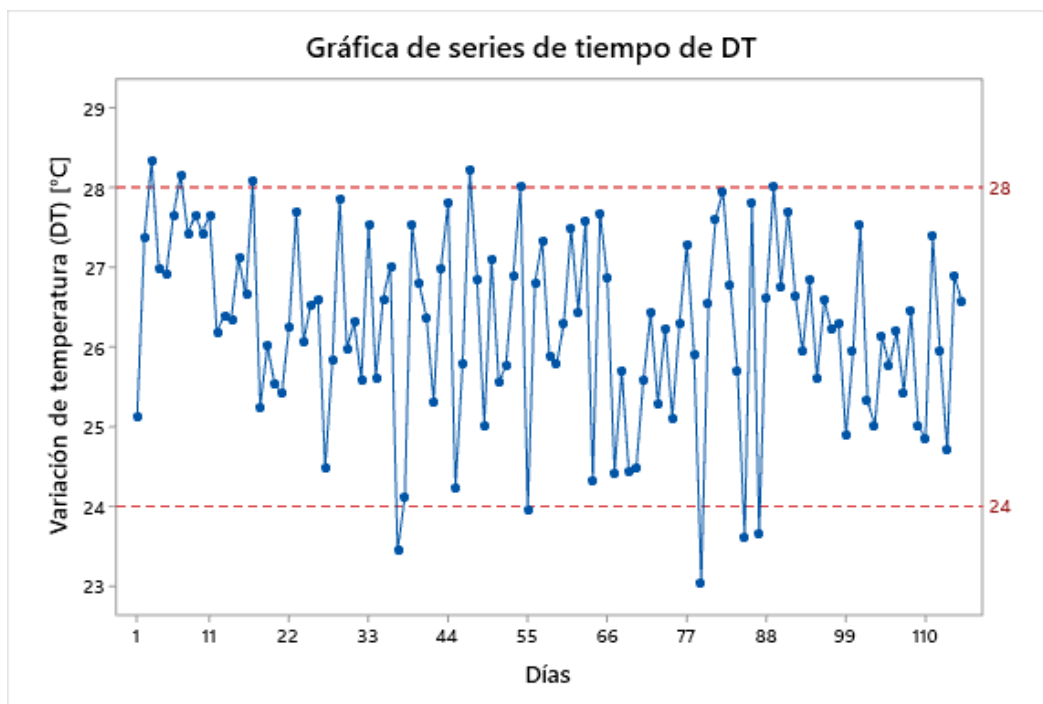
### **Temperatura del Invernadero**

Se realizó un gráfico para poder observar la variación de la temperatura desde que se inició el cultivo hasta que se cosecharon las lechugas de ambos sistemas, el aeropónico y el de tierra. Únicamente se tomaron en cuenta los datos entre las 8am y 5pm, ya que fuera de esas horas la temperatura se mantiene baja, lo cual no afecta a las plantas. La gráfica se puede observar en la **Figura 112** y la **Figura 113**.

Se graficó la media de la temperatura por cada día, y se comprobó que la mayoría de datos se encuentran dentro del rango aceptable entre 24-28°C. Existen datos de temperatura que salen del rango aceptable, sin embargo, la temperatura no alcanza niveles extremos de manera que no afecta al desarrollo de las plantas.

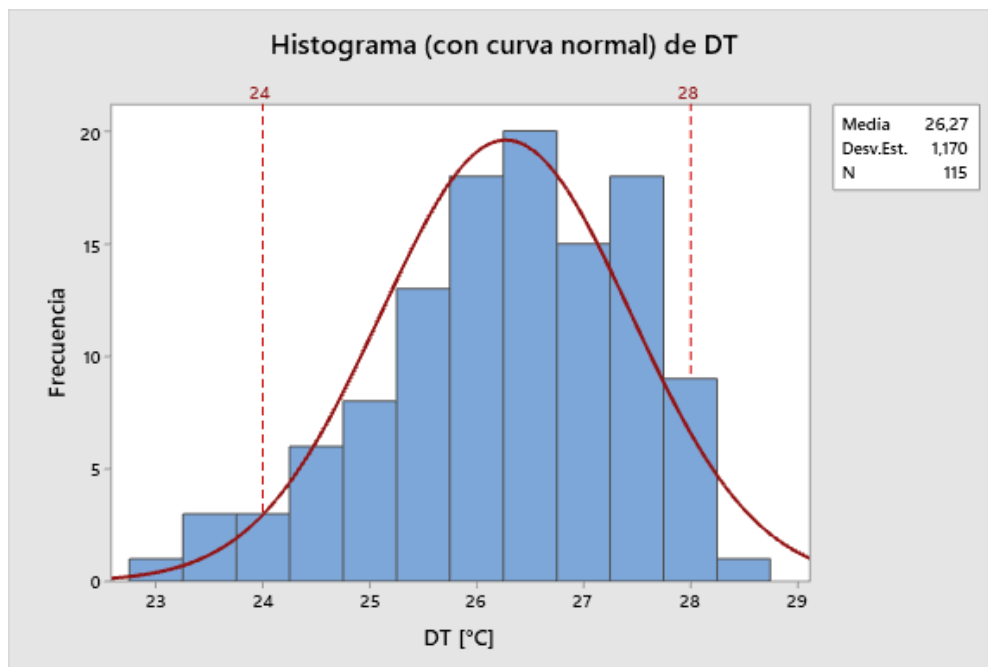
### **Figura 112**

*Temperaturas del invernadero durante el ciclo de cultivo de las lechugas*



**Figura 113**

*Histograma de temperaturas del invernadero durante el ciclo de cultivo de las lechugas*



La bomba debe trabajar con una función a la vez, es decir, no se puede realizar el riego y la climatización al mismo tiempo. El programa mantiene como prioridad a los riegos, por lo que, si la temperatura se encuentra fuera del rango al momento de realizar un riego, los ventiladores se mantienen encendidos pero los aspersores no se activan hasta haber finalizado el riego. Hay momentos en el día en donde se realizan riegos muy seguidos, lo cual da la posibilidad de que la temperatura aumente, especialmente en un día muy cálido.

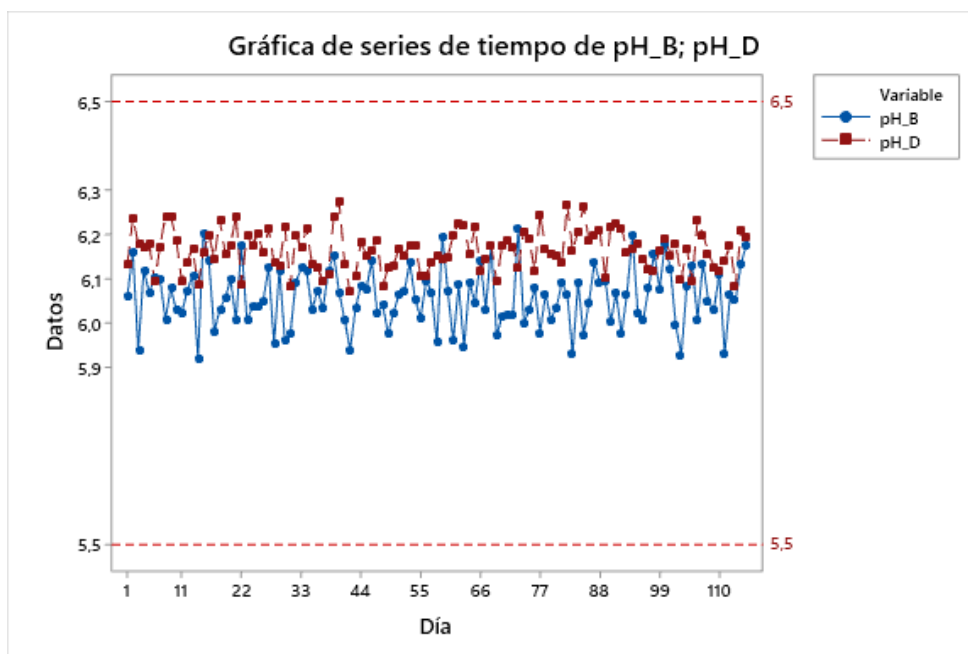
### ***Niveles de pH y EC***

Se realizó un gráfico para poder observar la variación de pH y EC durante todo el ciclo de crecimiento de las lechugas en el sistema hidropónico. Se tomó un dato diario tanto para pH como para EC, del tanque de semilleros y del tanque de engorde, con el mismo medidor electrónico utilizado para realizar los experimentos de calibración. La gráfica del pH se puede observar en la **Figura 114** y la **Figura 115**, mientras que la gráfica de EC se muestra en la **Figura 116** y la **Figura 117**.

El nivel de pH alcanzado en el tanque B varía entre 5.9 y 6.3, el cual se encuentra dentro de un rango aceptable. El nivel de pH del tanque D varía entre 6.1 y 6.6, el cual sale un poco del rango aceptable, pero esto se debe a que en los semilleros se trabaja con el sistema de flujo y reflujos, por lo que el pH varía a lo largo del día hasta volver a realizar la compensación de ácido. En cuanto al nivel de EC, la mayoría de datos se encuentran dentro de los rangos correspondientes de semilleros y engorde.

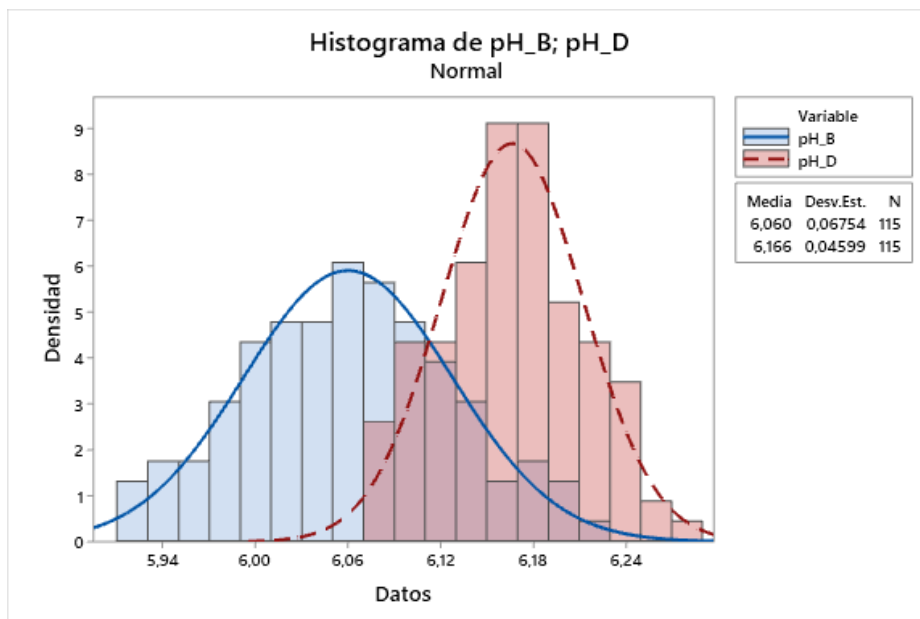
### Figura 114

*Niveles de pH de los tanques B y D durante el ciclo de cultivo de las lechugas*



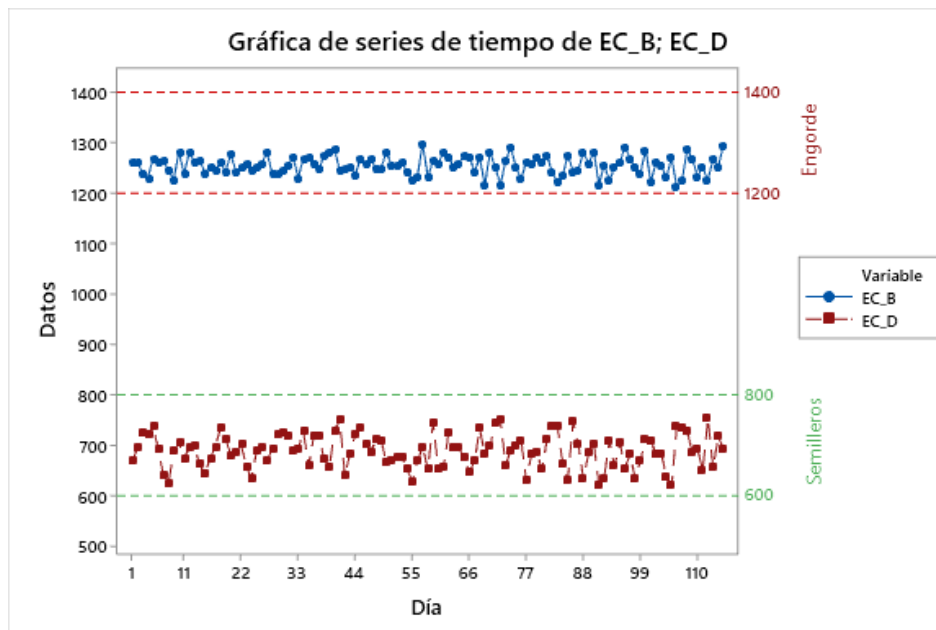
**Figura 115**

*Histograma de niveles de pH de los tanques B y D durante el ciclo de cultivo de las lechugas*



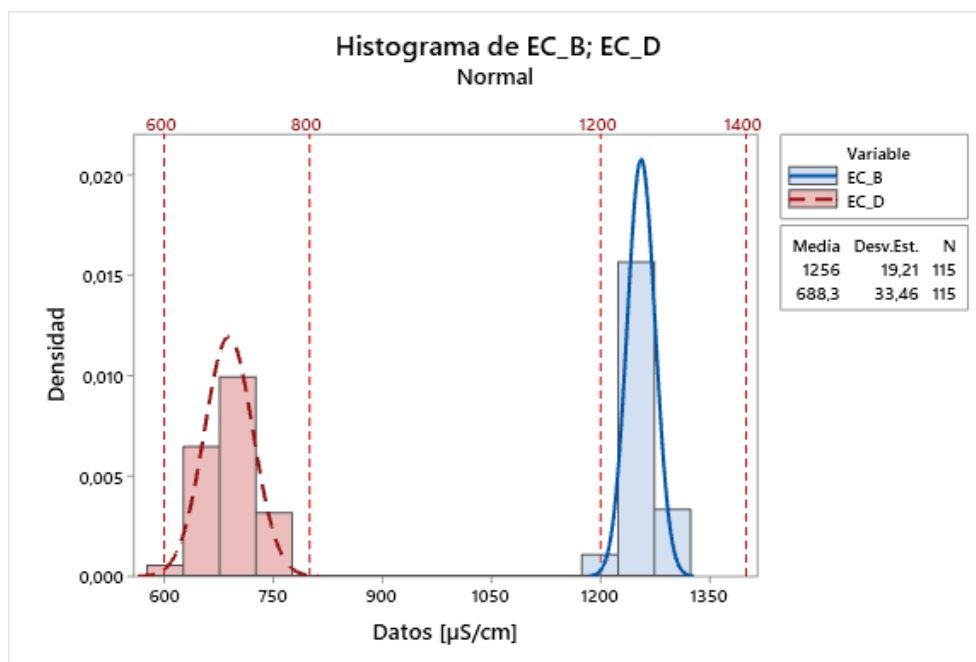
**Figura 116**

*Niveles de EC de los tanques B y D durante el ciclo de cultivo de las lechugas*



**Figura 117**

*Histograma de niveles de EC de los tanques B y D durante el ciclo de cultivo de las lechugas*



### **Rendimiento del Cultivo**

El rendimiento del cultivo es una medida de la cantidad de un cultivo producido por unidad de superficie de tierra. Para el actual sistema implementado, el rendimiento se obtiene como el peso total de lechugas por metro cuadrado, para lo cual se considera todas las lechugas sembradas en este espacio. En el caso del cultivo en tierra, se sembraron 8 lechugas, las cuales alcanzaron un peso total de 1340 g. Por otro lado, en el cultivo en las torres aeropónicas se obtuvieron 100 lechugas con un peso total de 19745 g.

Al calcular el rendimiento, se determina que se obtuvo un rendimiento de 1.34 kg/m<sup>2</sup> para el cultivo en tierra y 19.745 kg/m<sup>2</sup> para el cultivo en aeroponía, lo cual muestra una ventaja muy alta en el tema de rendimiento.

### **Consumo de Agua**

Se realizó el cálculo del consumo de agua para ambos sistemas, tanto el aeropónico como el del cultivo en tierra. Para el sistema aeropónico, se tomó en cuenta el caudal y tiempo de riego, determinados anteriormente, mientras que para el cultivo en tierra se trabajó con la frecuencia de riego manual realizado.

En el sistema aeropónico, se obtuvo un caudal de salida de los aspersores de 0.00883 lt/s. La duración del riego de engorde fue de 21 segundos, y se realizaron 34 riegos diarios por un período de 60 días que duró el ciclo del cultivo en aeroponía. Con estos datos se calculó el volumen de agua utilizado.

$$0.00883 \frac{lt}{s} * 21s * 34_{riegos \text{ al día}} * 60_{días \text{ en engorde}} = 378.42 \text{ lt}$$

Este valor es la cantidad de agua utilizada en una torre aeropónica, de la cual se obtuvieron 100 lechugas. Entonces, se calcula la cantidad de agua utilizada por lechuga.

$$\frac{378.42lt}{110} = 3.44 \text{ lt/lechuga}$$

Por otro lado, para el cultivo en tierra se realizaron riegos controlados durante todo el ciclo de crecimiento. Se regaron 8 lechugas con un litro de agua en la mañana y otro litro de agua en la noche, lo cual equivale a 2 litros diarios. El tiempo que demoró el ciclo de crecimiento en tierra fue de 84 días, y con estos datos se calcula el volumen de agua utilizado.

$$2 \frac{lt}{día} * 84_{días} = 168 \text{ lt}$$

Esta cantidad de agua abasteció a las 8 lechugas sembradas en tierra. Entonces, se calcula la cantidad de agua utilizada por lechuga.

$$\frac{168lt}{8} = 21 \text{ lt/lechuga}$$



De acuerdo con datos de la (FAO, 2009), la huella hídrica de la comida, es decir el valor que nos indica la cantidad de agua que requiere la producción de un alimento, representa un 70% del agua que se gasta a nivel mundial. En promedio, son necesarios 13 lt de agua para producir una unidad de lechuga. Se observa claramente que el sistema aeropónico consume menor cantidad de agua al compararse con el método tradicional de cultivo, lo cual representa una ventaja ecológica alta.

La automatización de un sistema hidropónico contribuye en la calidad de vida de las personas, ya que busca cumplir con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) al implementar estrategias que permitan optimizar los recursos y reducir desperdicios, principalmente. Los ODS a los que apunta este proyecto se muestran en la **Figura 118**.

Una clara desventaja del sistema automatizado es el costo inicial de inversión que dependerá de la capacidad de producción requerida. Además, al trabajar con dispositivos electrónicos, es necesario un mantenimiento realizado por un técnico capacitado para estos sistemas, lo cual se traduce en costos extras.

La hidroponía es una técnica que requiere un nivel de conocimiento por parte del operador, y a pesar de que el sistema puede llegar a ser bastante intuitivo, el uso de tecnologías puede ser difícil de manipular para agricultores que no tienen afinidad con las mismas.

**Figura 118**

*Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con el proyecto*



## Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

- Partiendo del sistema hidráulico implementado por la empresa, se realizaron los cálculos de pérdidas por fricción y accesorios de tuberías, y se determinó que una de las bombas no abastecía al sistema, por lo que fue reemplazada. Por otro lado, se implementaron presurizadores acoplados a cada bomba, de esta manera las soluciones no se mezclan y se mantiene constante la presión de trabajo de 6 bares.
- Se destinaron los aspersores Tefen únicamente para el riego aeropónico, ya que estos manejan una mayor presión y permiten obtener el tamaño de gota adecuado. Además, se implementaron válvulas reguladoras en todas las entradas de agua de los semilleros para conseguir un llenado uniforme de todas las camas de cultivo, y se implementó una válvula de purga común para todo el sistema, de manera que se pueda realizar el mantenimiento respectivo de los tanques.

- Después de una comparación entre PLCs del mercado de acuerdo a los requerimientos del sistema, se seleccionó el PLC Controllino para el control de las electroválvulas de los riegos y la adquisición de información de las variables críticas del sistema.
- El tablero de control implementado se diseñó de acuerdo a los requerimientos de la empresa y las normas del código eléctrico NEC 2020 para cumplir con requisitos para cableado eléctrico, protecciones contra sobrecorriente, conexión a tierra e instalación de equipos.
- Se implementaron algoritmos de control basados en los requerimientos de la empresa para el monitoreo y supervisión del invernadero, con lo cual se logró cubrir la demanda de riego y generar un entorno climatizado de manera automática, proporcionando un ambiente óptimo de crecimiento para las plantas.
- Por medio de la aplicación Blynk, se creó una interfaz que permite controlar y monitorear el sistema de forma remota. Se incluyeron funciones que permiten manipular variables críticas como el tiempo de riego y la cantidad de solución que ingresa a los tanques, de modo que el usuario pueda recalibrar los parámetros para trabajar con otro tipo de cultivo. Además, se incluyeron controles para registrar los datos de pH y EC tomados por el operario, así como notificaciones para advertencias o fallas en el sistema.
- Se seleccionó la plataforma PlanetScale para crear una base de datos que permita llevar un registro del funcionamiento del sistema y la variación de los parámetros de cultivo. Se utilizó el protocolo de comunicación MQTT y Node-Red para obtener la información de los sensores, para posteriormente ser presentados en una hoja de cálculo de Excel.
- Al establecer un protocolo de pruebas para evaluar el sistema bajo ciertas condiciones, se logró obtener datos fiables sobre el desempeño del sistema.

- Se creó un plan de mantenimiento preventivo que indica el procedimiento para el mantenimiento general de los equipos de riego, las alertas del sistema y los tratamientos preventivos y correctivos necesarios para alargar la vida útil del sistema.
- Los experimentos realizados fueron de utilidad para establecer los valores de calibración para los parámetros de control del riego, de manera que las variables de funcionamiento del invernadero se mantengan dentro de los rangos aceptables de operación.
- Los resultados obtenidos en el cultivo aeropónico respecto a la producción de lechuga en tierra, fueron superiores en todo momento. Por un lado, se obtuvo un 25% más en cantidad de hojas y 13% más en tamaño de hojas, mientras que en el tiempo de cultivo presentó una ventaja de 24 días.
- El rendimiento para el cultivo en aeroponía fue de  $19.75\text{kg/m}^2$ , mientras en tierra fue de  $1.34\text{kg/m}^2$ , lo cual representa una ventaja muy alta de aproximadamente 1500%.
- El consumo de agua del sistema aeropónico fue de 3.44lt por lechuga, mientras que en el cultivo en tierra se ocuparon 21lt de agua por lechuga, lo cual representa un ahorro de agua del 84%.
- La temperatura del invernadero se mantuvo, en su mayoría, dentro del rango de 24-28°C. Ya que no se puede realizar el riego y la climatización al mismo tiempo, se mantuvo como prioridad los riegos lo cual afectaba a la variación de temperatura, por lo cual, en días muy calurosos, el sistema no lograba mantener la temperatura bajo el límite. Sin embargo, esto no afectó mayormente al desarrollo de las lechugas.
- El nivel de conductividad eléctrica se mantuvo dentro de los rangos sugeridos para el riego de engorde y de semilleros, entre  $1200\text{-}1400\ \mu\text{S/cm}$  y  $600\text{-}800\ \mu\text{S/cm}$  respectivamente. De igual manera, el pH se mantuvo dentro del rango. Se presentó una mayor variación de los datos en el engorde, debido a que este riego es de flujo y reflujo.

- La técnica aeropónica es una solución ecológica para contribuir a corregir el estado actual del medio ambiente, ya que representa un alto ahorro de agua y espacio de construcción reducido, mientras se obtiene una alta producción. Sin embargo, la inversión inicial es alta debido a que debe existir un control preciso del sistema hidráulico y el sistema de automatización para los riegos.
- La mecatrónica contribuye en la calidad de vida de las personas ya que busca cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, al implementar estrategias que permitan aprovechar las fuentes de energía renovable, optimizar los recursos, reducir desperdicios, entre otros.

#### Recomendaciones

- La solución nutritiva depende de la calidad de agua con la que se trabaja, por lo cual se recomienda hacer un análisis del agua previo y consultar con una empresa experta para obtener la solución nutritiva adecuada para el tipo de agua a utilizar.
- La fiabilidad del sistema IoT y base de datos depende mucho de los equipos utilizados, por lo que se recomienda contar con equipos que puedan trabajar ininterrumpidamente y de forma estable.
- El modelo de regresión obtenido en los experimentos puede ser usado para evaluar la relación entre la respuesta y los términos en el modelo e incluso predecir los datos.
- Es necesario capacitar al personal para el correcto uso del sistema automatizado.

## Bibliografía

- AGRI NOVA Science. (2020). *El cultivo de la lechuga*. Obtenido de infoAgro:  
<https://www.infoagro.com/hortalizas/lechuga.htm>
- Albuja, V., Andrade, J., Lucano, C., & Rodriguez, M. (16 de Marzo de 2021). Comparison of the advantages of hydroponic systems as agricultural alternatives in urban areas. *Minerva*, 2(4), 45-54. doi:10.47460/minerva.v2i4.26
- Blynk. (2022). Obtenido de Blynk: <https://blynk.io/>
- Cepex Fluidra. (2022). Obtenido de FLUID HANDLING EXPERTS: <http://riego.cepex.com/>
- Colombo, B., Engstrom, P., Ray, D., Urevig, A., & West, P. (2015). *Is There Enough Food for the Future?* Minnesota: Institute on the Environment. Obtenido de <http://www.environmentreports.com/enough-food-for-the-future/>
- Controllino. (2022). Obtenido de Controllino: <https://www.controllino.com/>
- Corporativa, E. (2022). *Electric Water Pump*. Obtenido de Foras Pump: <https://www.espa.com/>
- Distribución de Stemas de Riego y Fuentes Ornamentales*. (2022). Obtenido de EuroRain: <https://www.euro-rain.es/>
- Electric Water Pumps*. (2022). Obtenido de Foras Pump: <https://www.foraspump.com/>
- Escuderos, Y., Gálvez, L., Garrido, M., Muñoz, D., Romero, E., Stoute, K., . . . Sevillano, F. (2017). *Cultivo Hidropónico*. Universidad de Panamá, Ingeniería de Prevención de Riesgo, Seguridad y Ambiente. Panamá: Universidad de Panamá.
- FAO. (2009). *How to Feed the World in 2050*. Roma: FAO. Obtenido de <https://www.fao.org/3/ak542e/ak542e00.htm>
- Francis, F., Vishnu, P., Jha, M., & Rajaram, B. (2018). IOT-Based Automated Aeroponics System. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 492, 337-345.
- Gavilánez, F. (2019). *La hidráulica del ingeniero agrícola* (Primera ed.). Babahoyo: CIDEPRO.
- Global Leader in irrigation*. (2022). Obtenido de Netafim: <https://www.netafim.com/>
- González , L., Osiris, S., Laguía, D., Gesto, E., & Hallar, K. (2020). Internet del Futuro – Estudio

- de tecnologías IoT. *Informe Científico Técnico UNPA*, 12(3), 105-137. doi:10.22305/ict-unpa.v12.n3.744
- Google Maps. (2022). Obtenido de <https://www.google.com/maps/@-0.3482746,-78.4510106,586m/data=!3m1!1e3?hl=es>
- Honest Seed Co. (2022). Obtenido de Honest Seed: <https://www.honestseedco.com>
- ISE APERA INSTRUMENTS. (2022). Obtenido de Apera Instruments: <https://aperainst.com/>
- Jóias em prata. (2022). Obtenido de Stylo Pratas: <https://stylopratas.com.br/>
- Kerns, S., & Lee, J.-L. (2017). Automated Aeroponics System Using IoT for Smart Farming. *European Scientific Journal*, 104-110. doi:10.19044/esj.2017.c1p10
- Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (Enero de 2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*, 3(5), 264-274. doi:10.4236/jcc.2015.35021
- Martínez, P. (2013). *Aeroponía como método de cultivo sostenible, rentable e incluyente en Colombia*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia. Obtenido de <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00000864.pdf>
- Morales, V. (2021). *COMPORTAMIENTO DE COMPRA EN EL CONSUMO RESPONSABLE DE PRODUCTOS ORGÁNICOS - FRUTOS SECOS: CASO DE LA GENERACIÓN X*. Guayaquil: Universidad Casa Grande. Obtenido de <http://dspace.casagrande.edu.ec:8080/bitstream/ucasagrande/3270/1/Tesis3305MORc.pdf>
- MySQL. (2022). Obtenido de MySQL: <https://www.mysql.com/>
- NASA. (2006). Progressive Plant Growing Has Business Blooming. *Spinoff*, 64-67. Obtenido de [https://www.nasa.gov/pdf/164449main\\_spinoff\\_06.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/164449main_spinoff_06.pdf)
- Naylamp Mechatronics. (2021). Obtenido de Naylamp Mechatronics: <https://naylampmechatronics.com/>
- Node-RED. (2022). Obtenido de Node RED: <https://nodered.org/>

- Novicompu*. (2022). Obtenido de Novicompu: <https://www.novicompu.com/>
- Oreggioni, J. (2006). Métodos de medida del ph para estudios invasivos prolongados: ISFET y fibra óptica. *XV Seminario de Ing. Biomédica 2006* (págs. 1-5). Montevideo: Universidad de la República Oriental del Uruguay. Obtenido de <https://docplayer.es/4570718-Metodos-de-medida-del-ph-para-estudios-invasivos-prolongados-isfet-y-fibra-optica.html>
- Pentax Industries*. (2022). Obtenido de Pentax Industries: <https://www.pentax-pumps.it/>
- Perristaltic Pumps Manufacturer*. (2022). Obtenido de JIHPUMP: <https://www.jihpump.net/>
- PlanetScale. (2022). Obtenido de PlanetScale: <https://planetscale.com/>
- Rahman, F., Ritun, I., Biplob, R., Farhin, N., & Uddin, J. (2018). Automated Aeroponics System for Indoor Farming using Arduino. *2018 Joint 7th International Conference on Informatics, Electronics & Vision*, 137-141. doi:10.1109/ICIEV.2018.8641026.
- Revista Electroindustria. (Diciembre de 2016). *Controladores eficientes para la industria inteligente*. Obtenido de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2942&ni=controladores-eficientes-para-la-industria-inteligente>
- Rodriguez, E., Montes, J., & Escobar, R. (2012). Acondicionamiento del sensor de pH y temperatura para realizar titulaciones potenciométricas. *Scientia Et Technica*, 2(51), 188-196. doi:10.22517/23447214.1603
- Safadi, H., & Lucio, L. (2016). *DISEÑO Y CONTROL DE AMBIENTE INTERNO DE UN VIVERO MODULAR PARA CULTIVO EN INTERIORES DE PLANTAS COMESTIBLES*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/4a6a3340-21f0-4435-8b6c-cf384139c1f1/D-103464.pdf>
- Soto, F. (2018). *Producción de lechuga con la técnica de lámina de nutrientes modificada (NFT)*. Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía. Alajuela: Universidad de Costa Rica. Obtenido de <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/86391>



- Sreekumar, V. (2020). *DROPLET SIZE ANALYSIS OF HIGH PRESSURE AEROPONIC SYSTEM*. Massey University. Massey University. Obtenido de [https://www.academia.edu/45660017/DROPLET\\_SIZE\\_ANALYSIS\\_OF\\_HIGH\\_PRESSURE\\_AEROPONIC\\_SYSTEM?auto=citations&from=cover\\_page](https://www.academia.edu/45660017/DROPLET_SIZE_ANALYSIS_OF_HIGH_PRESSURE_AEROPONIC_SYSTEM?auto=citations&from=cover_page)
- Tefen. (2022). Obtenido de Tefenitely: <https://tefentech.com/>
- Valderrama, Y. (2017). *Diseño e implementación de un instrumento electrónico de medida de pH para terreno agrícola*. Ibagué: Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13356/1110464411.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Velasteguí, F. (2021). *Cultivo hidropónico de lechuga Green salad bowl habilitado por IoT en Tungurahua (Ecuador)*. Universidad Internacional de la Rioja. Obtenido de <https://reunir.unir.net/bitstream/handle/123456789/12169/Velastegu%c3%ad%20Silva%2c%20Francisco%20Pa%c3%bal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vizcarra, S. (2018). *Producción semihidropónica de Lechuga Lactuca sativa L. Starfigther bajo cubierta plástica en la Unidad Agronómica del Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC)*. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, Departamento de Producción Agrícola y Animal. Xochimilco: Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. Obtenido de <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/25087>

## Apéndices