



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño y construcción de un sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico aplicando software libre e internet de las cosas para la alimentación de cuyes (*cavia porcellus*) de la Asociación de Productores Agropecuarios Míster Cuy de la parroquia Ascázubi provincia de Pichincha.

Álvarez Noroña, Freddy Javier y Quijije Zambrano, Erik Paul

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del Título de: Ingeniero Mecatrónico

Ing. Singaña Amaguaña, Marco Adolfo

16 de febrero de 2022

Latacunga



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño y construcción de un sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico aplicando software libre e internet de las cosas para la alimentación de cuyes (cavia porcellus) de la Asociación de Productores Agropecuarios Mister Cuy de la parroquia Ascázubi provincia de Pichincha**” fue realizado por los señores **Álvarez Noroña, Freddy Javier** y **Quijije Zambrano, Erik Paul** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 16 febrero de 2022

.....
Ing. Singaña Amaguaña, Marco Adolfo

C.C: 0501627889



Tesis Alvarez_Quijje.pdf

Scanned on: 21:2 February 16, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	487
Words with Minor Changes	133
Paraphrased Words	413
Omitted Words	4627

A blue ink handwritten signature, appearing to read "Marco Adolfo Singaña Amaguaña", written over a horizontal dotted line.

Ing. Singaña Amaguaña, Marco Adolfo

C.C: 0501627889

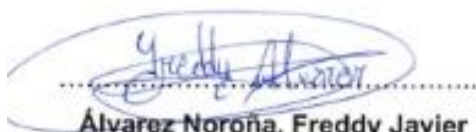


DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Álvarez Noroña, Freddy Javier** con cédula de ciudadanía N° 0503148967 y **Quijije Zambrano, Erik Paul**, con cédula de ciudadanía N° 1722044193, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "**Diseño y construcción de un sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico aplicando software libre e internet de las cosas para la alimentación de cuyes (cavia porcellus) de la Asociación de Productores Agropecuarios Mister Cuy de la parroquia Ascázubi provincia de Pichincha**" 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.

Latacunga, 16 de febrero de 2022



Álvarez Noroña, Freddy Javier

C.C: 0503148967



Quijije Zambrano, Erik Paul

C.C: 1722044193




DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Álvarez Noroña, Freddy Javier** con cédula de ciudadanía N° 0503148967 y **Quijije Zambrano, Erik Paul**, con cédula de ciudadanía N° 1722044193, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Diseño y construcción de un sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico aplicando software libre e internet de las cosas para la alimentación de cuyes (cavia porcellus) de la Asociación de Productores Agropecuarios Mister Cuy de la parroquia Ascázubi provincia de Pichincha"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 16 de febrero de 2022


.....
Álvarez Noroña, Freddy Javier
C.C: 0503148967


.....
Quijije Zambrano, Erik Paul
C.C: 1722044193

Dedicatoria

El presente proyecto de titulación lo dedico a Dios por brindarme cada maravilloso día para cumplir cada una de mis metas.

A mis padres Freddy que, con su amor infinito me hay apoyado incondicionalmente en cada momento de mi vida y que gracias a su trabajo, esfuerzo y ejemplo me han enseñado a ser una persona de bien.

A mis hermanos Sebas y Andre por su cariño, ser fuente de motivación y siempre creer en mí.

A toda mi familia porque con sus oraciones y consejos me acompañan siempre.

A mis docentes y compañeros con quienes compartí esta etapa de mi vida.

Con gran satisfacción les dedico a ustedes el presente trabajo de titulación, que con mucha dedicación y perseverancia lo he conseguido.

Freddy Javier

Dedico este trabajo a mis padres, mi hermana, mi padrino y a mis amigos que gracias por su apoyo y esfuerzo me han motivado y guiado durante toda esta vida, ha sido un gran sacrificio el llegar hasta aquí, sin ellos no hubiera podido mantenerme firme y decidido a culminar mis estudios, espero cosechar estos conocimientos y lograr obtener muchos logros con la compañía de todos.

Erik Paul

ingmecatronerik@hotmail.com

Agradecimiento

Queremos agradecer con mucho cariño a nuestros padres que ha sido una fuente inagotable de apoyo incondicional en la lucha por alcanzar nuestro sueño, por sus sacrificios y paciencia la cual nos han guiado desde siempre para ser personas de trabajo, humildes y responsables.

Agradecemos de manera muy especial a nuestro tutor Ing. Marco Singaña por sus conocimientos, consejos y apoyo brindado durante este proceso de titulación, resaltamos su disposición y motivación para la culminación de este trabajo.

A la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy, en especial al Sr. Iván Portilla que facilitó la vinculación y desarrollo de este proyecto.

A todos ellos, una vez más, mil gracias.

Tabla de Contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación de contenido	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de Contenidos	8
Índice de Tablas	14
Índice de Figuras.....	17
Resumen	21
Abstract.....	22
Introducción.....	23
Antecedentes	23
Planteamiento del Problema	24
Descripción Resumida del Proyecto	25
<i>Etapa de Investigación.....</i>	<i>26</i>
<i>Etapa de Diseño y Selección de Componentes</i>	<i>26</i>
<i>Etapa de Construcción e Implementación.....</i>	<i>26</i>
<i>Etapa de Comunicación IoT.....</i>	<i>27</i>
<i>Etapa de Prueba y Depuración de Errores</i>	<i>27</i>
Justificación e importancia	27
Objetivos	28
<i>Objetivo General.....</i>	<i>28</i>
<i>Objetivos Específicos</i>	<i>28</i>

Hipótesis	29
<i>Variable Independiente</i>	29
<i>Variable Dependiente</i>	29
Fundamentos teóricos e investigación.....	30
Producción de Cuyes	30
Alimentación del Cuy.....	31
<i>Alimentación Básica</i>	32
<i>Alimentación Mixta</i>	32
Hidroponía.....	33
Forraje Verde Hidropónico	33
<i>Proceso de Producción de FVH</i>	34
<i>Ventajas de la Producción de FVH</i>	36
<i>Desventajas de la Producción de FVH</i>	38
<i>Requerimientos y Factores Determinantes del FVH</i>	38
Soluciones Nutritivas Hidropónicas para FVH	40
<i>Solución Nutritiva Concentrada A</i>	41
<i>Solución Nutritiva Concentrada B</i>	41
<i>Funciones de los Elementos Nutritivos en el FVH</i>	41
Sistemas Productores de FVH	42
<i>Principales Componentes de un Sistema Productor de FVH Tecnificado</i>	43
Estructura del Estante.....	43
Bandejas de Desarrollo.....	43
Sistema de Iluminación Artificial.....	44
Riego por Microaspersión.....	45
Riego por Nebulización.....	45
Riego por Goteo.....	46

Dispositivos de Medida.....	46
Dispositivos de Control.....	47
Accionamientos.....	47
Internet de las Cosas IoT.....	47
<i>Arquitectura IoT</i>	48
<i>Beneficios del IoT</i>	49
<i>Desventajas del IoT</i>	50
<i>IoT y la Agricultura 4.0</i>	50
Software Libre.....	51
Placas de Desarrollo de Software Libre.....	52
Diseño y selección de componentes del sistema.....	53
Necesidades y Especificaciones de Diseño.....	53
Diseño del Subsistema Estructural.....	56
<i>Selección de Material</i>	56
<i>Dimensiones de Bandejas</i>	60
<i>Diseño CAD de Bandeja</i>	61
<i>Análisis de Esfuerzos en Bandeja</i>	64
<i>Diseño CAD del estante</i>	65
<i>Análisis de Esfuerzos en la Estructura</i>	66
Diseño del Subsistema Riego.....	67
<i>Diseño de la Línea de Irrigación</i>	69
Esquema de la Línea de Irrigación.....	72
Selección de Bomba Línea Irrigación.....	73
Requerimiento Hídrico de la Línea de Irrigación.....	77
<i>Diseño de la Línea de Inundación</i>	78
Requerimiento Hídrico de la Línea de Inundación.....	80

Selección de Bomba Línea Inundación	80
<i>Diseño de la Línea de Dosificación</i>	84
Selección de Bomba Dosificadora	84
Diseño del Dosificador de Solución Hidropónica	88
Diseño del Dosificador de Hipoclorito de Sodio	89
<i>Línea de recirculación y drenaje</i>	89
<i>Línea de alimentación</i>	90
Diseño del Subsistema Electrónico	92
<i>Sección de Control</i>	92
Selección de la tarjeta electrónica	92
Selección del sensor de temperatura y humedad	96
Disposición del tablero de control	100
<i>Sección de Iluminación</i>	101
<i>Sección de Entradas</i>	105
<i>Sección de Salidas</i>	106
<i>Sección de protección eléctrica</i>	107
Diseño del Subsistema de Control e IoT	109
<i>Protocolo MQTT Mosquitto Open Source</i>	110
<i>Algoritmo de Control Python</i>	111
<i>Programación Node-RED</i>	112
Programación Node-RED Raspberry Pi IP 192.168.100.29	112
Programación Node-RED Raspberry Pi IP 192.168.100.14	114
<i>Almacenamiento de Datos Local</i>	114
<i>Almacenamiento de Datos en la Nube</i>	114
<i>Acceso Remoto Node-RED</i>	115
<i>Alertas Correo Electrónico</i>	116

<i>Alertas CallMeBot WhatsApp</i>	117
Construcción e Implementación del Sistema Mecatrónico	117
<i>Estante</i>	118
<i>Bandeja</i>	118
<i>Dosificador NaClO</i>	119
<i>Dosificador Solución A y B</i>	120
<i>Bombas</i>	120
<i>Sensor de Humedad y Temperatura</i>	121
<i>Válvulas solenoides de entrada</i>	121
<i>Válvulas solenoides de salida y recirculación</i>	121
<i>Válvulas solenoides de alimentación de tanques</i>	122
<i>Aspersores de irrigación</i>	122
<i>Tira LED</i>	123
<i>Tablero de Control</i>	123
Pruebas y Resultados	125
Pruebas de Funcionamiento	125
<i>Prueba eléctrica</i>	125
<i>Prueba Control IoT</i>	126
<i>Prueba notificación IoT</i>	127
<i>Prueba Almacenamiento de Datos IoT</i>	131
<i>Pruebas Bajo el Proceso Manual Empleado por la Asociación Míster Cuy</i> ...	132
Condiciones del Tratamiento A.	132
Metodología del Tratamiento A	132
Resultados del Tratamiento A	133
<i>Pruebas Bajo el Sistema Mecatrónico Implementado</i>	134
Condiciones del Tratamiento B	134

Metodología Tratamiento B1 con Riego Solo Agua	134
Resultados Tratamiento B1 con Riego Solo Agua	135
Metodología Tratamiento B2 Riego Agua y Solución Hidropónica	136
Resultados Tratamiento B2 Riego Agua y Solución Hidropónica.....	137
Pruebas Bromatológicas.....	140
Validación de Hipótesis.....	141
<i>Hipótesis de Mejora del Tiempo de Cultivo en cebada, maíz, trigo y avena ..</i>	<i>142</i>
<i>Hipótesis de Mejora de Calidad.....</i>	<i>143</i>
<i>Porcentaje de humedad</i>	<i>143</i>
<i>Porcentaje de ceniza.....</i>	<i>144</i>
<i>Porcentaje de extracto etéreo</i>	<i>145</i>
<i>Porcentaje de proteína.....</i>	<i>145</i>
<i>Porcentaje de fibra</i>	<i>146</i>
<i>Porcentaje de ELN.....</i>	<i>147</i>
<i>Validación de la Hipótesis de Mejora de Calidad Para el Forraje de Avena ...</i>	<i>148</i>
Conclusiones y Recomendaciones.....	149
Conclusiones	149
Recomendaciones	151
Bibliografía.....	153
Anexos	161

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Requerimientos nutricionales del cuy</i>	31
Tabla 2 <i>Composición nutricional de las principales especies de FVH para alimentación de cuyes</i>	34
Tabla 3 <i>Proceso de producción de forraje verde hidropónico</i>	34
Tabla 4 <i>Pérdidas de agua por transpiración en la producción de un kilogramo de materia seca de forrajes cultivados en campo</i>	36
Tabla 5 <i>Funciones de los elementos nutritivos absorbidos por el FVH</i>	41
Tabla 6 <i>Características del sistema artesanal productor de FV de la Asociación Míster Cuy</i>	53
Tabla 7 <i>Necesidades de usuarios de la Asociación y características técnicas del proyecto</i>	55
Tabla 8 <i>Resultados por nivel de importancia de las características técnicas del proyecto obtenidos de la matriz QFD</i>	56
Tabla 9 <i>Módulos y subsistemas de diseño</i>	56
Tabla 10 <i>Materiales de construcción en la industria alimentaria</i>	57
Tabla 11 <i>Evaluación de criterios para el material</i>	58
Tabla 12 <i>Evaluación de criterios: apto para alimentos</i>	58
Tabla 13 <i>Evaluación de criterios: resistencia mecánica</i>	59
Tabla 14 <i>Evaluación del criterio: Vida útil</i>	59
Tabla 15 <i>Evaluación del criterio: Versatilidad fabricación</i>	59
Tabla 16 <i>Evaluación del criterio: Menor costo de material y fabricación</i>	60
Tabla 17 <i>Conclusiones selección material para estructura</i>	60
Tabla 18 <i>Fuerzas soportadas por bandeja</i>	64
Tabla 19 <i>Alternativas de riego para línea de irrigación</i>	69
Tabla 20 <i>Evaluación de criterios para selección de riego</i>	70

Tabla 21 <i>Evaluación del criterio: eficiencia de riego</i>	70
Tabla 22 <i>Evaluación del criterio: regulación de temperatura y humedad</i>	70
Tabla 23 <i>Evaluación del criterio: fácil instalación</i>	71
Tabla 24 <i>Evaluación del criterio: bajo costo</i>	71
Tabla 25 <i>Conclusiones selección material para estructura</i>	71
Tabla 26 <i>Alternativas de bombas dosificadoras</i>	84
Tabla 27 <i>Evaluación de criterios para la selección de bombas de dosificación</i>	85
Tabla 28 <i>Evaluación del criterio: Fácil instalación</i>	86
Tabla 29 <i>Evaluación del criterio: Autoaspirante</i>	86
Tabla 30 <i>Evaluación del criterio: Costo</i>	86
Tabla 31 <i>Evaluación del criterio: Fácil mantenimiento</i>	87
Tabla 32 <i>Evaluación del criterio: Caudal regulable</i>	87
Tabla 33 <i>Conclusiones selección material para estructura</i>	87
Tabla 34 <i>Evaluación de criterios para la selección de tarjetas electrónicas</i>	94
Tabla 35 <i>Evaluación del criterio: Número puertos GPIO</i>	95
Tabla 36 <i>Evaluación del criterio: Interfaz Gráfica</i>	95
Tabla 37 <i>Evaluación del criterio: Capacidad</i>	95
Tabla 38 <i>Evaluación del criterio: Costo</i>	96
Tabla 39 <i>Conclusiones selección de tarjeta electrónica</i>	96
Tabla 40 <i>Alternativas del sensor de temperatura y humedad</i>	97
Tabla 41 <i>Evaluación del peso específico de cada criterio</i>	97
Tabla 42 <i>Evaluación del criterio: Repetibilidad</i>	98
Tabla 43 <i>Evaluación del criterio: Rango de medición</i>	98
Tabla 44 <i>Evaluación del criterio: Exactitud</i>	98
Tabla 45 <i>Evaluación del criterio: Costo promedio</i>	99
Tabla 46 <i>Evaluación del criterio: Compatible con Node-RED</i>	99

Tabla 47 Conclusiones selección de sensor temperatura humedad.....	99
Tabla 48 Alternativas de iluminación.....	101
Tabla 49 Evaluación de criterios para iluminación.....	102
Tabla 50 Evaluación del criterio: Duración	102
Tabla 51 Evaluación del criterio: Longitud de onda	102
Tabla 52 Evaluación del criterio: Costo	103
Tabla 53 Evaluación del criterio: Eficiencia	103
Tabla 54 Evaluación del criterio: Amigable con el ambiente.....	103
Tabla 55 Conclusiones selección de iluminación	104
Tabla 56 Potencia suministrada por la fuente de poder.....	107
Tabla 57 Corriente de la máquina	108
Tabla 58 Corriente medida en la máquina.....	125
Tabla 59 Prueba de control IoT.....	126
Tabla 60 Prueba de notificación IoT.....	128
Tabla 61 Condiciones ambientales durante las pruebas del tratamiento A.....	132
Tabla 62 Resultados tratamiento A	134
Tabla 63 Resultados tratamiento B1 con riego solo agua.....	135
Tabla 64 Propiedades de la solución hidropónica	136
Tabla 65 Resultados tratamiento B2 riego agua y solución hidropónica.....	138
Tabla 66 Desarrollo de forrajes con tratamiento B1 y B2.....	139
Tabla 67 Resultados bromatológicos	141

Índice de Figuras

Figura 1 Crianza de cuy tradicional y tecnificada	30
Figura 2 Forrajes de clima frío empleados en la alimentación cuyes	32
Figura 3 Paletizado de balanceado para cuyes	33
Figura 4 Esquema gráfico del proceso de producción de forraje verde hidropónico.....	35
Figura 5 Sistema productor de FVH modular de bandejas.....	37
Figura 6 Principales semillas para FVH.....	39
Figura 7 Diagrama de estructura de producción de FVH	43
Figura 8 Bandejas de desarrollo	44
Figura 9 Luz LED para cultivo.....	44
Figura 10 Microaspersores	45
Figura 11 Riego por nebulización para FVH.....	46
Figura 12 Riego por goteo para FVH.....	46
Figura 13 Arquitectura IoT.....	48
Figura 14 Libertades del software libre	51
Figura 15 Elementos de la bandeja	61
Figura 16 Volumen de bandeja.....	62
Figura 17 Propiedades rejilla de bandeja.....	62
Figura 18 Esquema de Riego	63
Figura 19 Esfuerzo equivalente de Von Mises de la bandeja.....	64
Figura 20 Deformación total de la bandeja	65
Figura 21 Factor de seguridad de la bandeja.....	65
Figura 22 Estructura del estante.....	66
Figura 23 Esfuerzo equivalente de Von Mises de la estructura.....	67
Figura 24 Deformación total y Factor de seguridad de la estructura	67
Figura 25 Esquema de Riego	68

Figura 26 <i>Boquillas de nebulización</i>	72
Figura 27 <i>Manquera para línea de Irrigación</i>	72
Figura 28 <i>Esquema de irrigación</i>	73
Figura 29 <i>Bomba de irrigación 72 W</i>	77
Figura 30 <i>Tanque B</i>	78
Figura 31 <i>Esquema de línea de inundación</i>	78
Figura 32 <i>Tubería para la línea de inundación</i>	79
Figura 33 <i>Electroválvulas de ingreso</i>	79
Figura 34 <i>Tanque A</i>	80
Figura 35 <i>Diagrama de Moody</i>	82
Figura 36 <i>Esquema línea de dosificación</i>	84
Figura 37 <i>Válvula peristáltica</i>	88
Figura 38 <i>Estructura del dosificador de solución hidropónica</i>	88
Figura 39 <i>Estructura del dosificador de hipoclorito de sodio</i>	89
Figura 40 <i>Electroválvulas de recirculación y drenaje</i>	90
Figura 41 <i>Esquema de la línea de recirculación y drenaje</i>	90
Figura 42 <i>Esquema de la línea de alimentación</i>	91
Figura 43 <i>Electroválvulas de alimentación</i>	91
Figura 44 <i>Arduino MKR 1010</i>	92
Figura 45 <i>Raspberry Pi 4</i>	93
Figura 46 <i>NodeMCU ESP8266</i>	94
Figura 47 <i>Sensor DHT22</i>	100
Figura 48 <i>Disposición del tablero de control</i>	100
Figura 49 <i>Tira LED para iluminación</i>	104
Figura 50 <i>Conexión tira LED para iluminación</i>	105
Figura 51 <i>Sección de entradas</i>	105

Figura 52 <i>Circuito de salidas módulo relé A</i>	106
Figura 53 <i>Circuito de salidas módulo relé B</i>	107
Figura 54 <i>Interruptor termomagnético 6 A</i>	108
Figura 55 <i>Estructura IoT implementada</i>	109
Figura 56 <i>Esquema de comunicación MQTT</i>	110
Figura 57 <i>Algoritmo del proceso productivo</i>	111
Figura 58 <i>Dashboard manual</i>	112
Figura 59 <i>Dashboard históricos</i>	113
Figura 60 <i>Archivos de históricos almacenados localmente</i>	114
Figura 61 <i>Formulario para adquirir mediciones de humedad y temperatura</i>	115
Figura 62 <i>Datos de humedad y temperatura almacenados</i>	115
Figura 63 <i>Remote-RED</i>	116
Figura 64 <i>Configuración y recepción de correo</i>	116
Figura 65 <i>Configuración y recepción de mensajes WhatsApp</i>	117
Figura 66 <i>Sistema mecatrónico productor de FVH</i>	118
Figura 67 <i>Construcción del estante</i>	118
Figura 68 <i>Construcción de bandejas</i>	119
Figura 69 <i>Construcción e implementación del dosificador NaClO</i>	119
Figura 70 <i>Construcción e implementación del dosificador solución A y B</i>	120
Figura 71 <i>Implementación de las bombas para tanque A y B</i>	120
Figura 72 <i>Implementación del sensor DHT22</i>	121
Figura 73 <i>Implementación electroválvulas entrada de inundación</i>	121
Figura 74 <i>Implementación de electroválvulas de salida y recirculación</i>	122
Figura 75 <i>Implementación de electroválvulas de alimentación de tanques</i>	122
Figura 76 <i>Implementación de aspersor tipo nebulizador</i>	123
Figura 77 <i>Implementación de tiras LED</i>	123

Figura 78 <i>Implementación del tablero de control</i>	124
Figura 79 <i>Prueba de almacenamiento de datos</i>	131
Figura 80 <i>Metodología del tratamiento A</i>	133
Figura 81 <i>Forraje tratamiento A</i>	133
Figura 82 <i>Metodología del tratamiento B1 con riego solo agua</i>	135
Figura 83 <i>Metodología del tratamiento B2 con riego agua y solución hidropónica</i>	137
Figura 84 <i>Resultados análisis de la varianza del tiempo de cultivo</i>	142
Figura 85 <i>Medias de día de cosecha según tratamientos y tipo de semillas</i>	143
Figura 86 <i>Análisis de varianza del % humedad de cada tratamiento aplicado</i>	144
Figura 87 <i>Análisis de varianza de % ceniza de cada tratamiento aplicado</i>	144
Figura 88 <i>Análisis de varianza del % extracto etéreo de cada tratamiento aplicado</i> ...	145
Figura 89 <i>Análisis de varianza del % proteína de cada tratamiento aplicado</i>	146
Figura 90 <i>Análisis de varianza del % fibra de cada tratamiento aplicado</i>	147
Figura 91 <i>Análisis de varianza del % ELN de cada tratamiento aplicado</i>	147

Resumen

En el presente trabajo de titulación se realiza el diseño y construcción de un sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico para la alimentación de cuyes (*cavia porcellus*) a ser implementado en la Asociación de Productores Agropecuarios Míster Cuy de la parroquia Ascázubi, provincia de Pichincha. A partir del desarrollo de la función de calidad QFD se determinan las necesidades y requerimientos de los usuarios, que junto a un estudio investigativo de maquinaria industrial y proyectos similares permiten desarrollar un diseño concurrente para integrar en una sola máquina el proceso de desinfección, pregerminación, germinación y crecimiento de diferentes tipos de semilla.

En base a software libre e internet de las cosas se automatiza el proceso productivo incorporando un tablero de control y una interfaz virtual que permite gestionarlo de forma remota. El dashboard virtual permite activar cada actuador de la máquina, guardar datos de humedad - temperatura de forma local y en la nube, gestionar alertas por medio de correo electrónico y mensajes WhatsApp. Se evalúa la hipótesis realizando pruebas a la producción de los cuatro forrajes más usados: avena, maíz, trigo y cebada, tanto de forma manual bajo riegos con agua, como lo viene realizando la Asociación y de forma automática a base de tratamientos de riego con agua y soluciones hidropónicas, dando como resultado una reducción del tiempo de cosecha. Los resultados más significativos se obtuvieron con la avena que presentó una mejora de calidad en fibra y extractos libres de nitrógeno ELN, junto a una reducción del tiempo de cosecha de 16 a 14 días.

Palabras clave:

- **FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO**
- **INTERNET DE LAS COSAS**
- **SISTEMA MECATRÓNICO**

Abstract

In this degree work, the design and construction of a mechatronic system to produce hydroponic green fodder for the feeding of guinea pigs (*cavia porcellus*) to be implemented in the Association of Agricultural Producers Míster Cuy of the Ascázubi parish, province of Pichincha. From the development of the QFD quality function, the needs and requirements of the users are determined, which with an investigative study of industrial machines and similar projects allow the development of a concurrent design to integrate in a single machine the process of disinfection, pre-germination, germination, and growth of different types of seed. Based on free software and the internet of things, the production process is automated by incorporating a control panel and a virtual interface that allows it to be managed remotely. The virtual dashboard allows you to activate each actuator of the machine, store humidity - temperature data locally and in the cloud, manage alerts via email and WhatsApp messages. The hypothesis is evaluated by testing the production of the four most used fodder: oats, corn, wheat and barley, both manually under water irrigation as the Association has been doing and automatically based on treatments of irrigation with water and hydroponic solutions, resulting in a reduction in harvest time. The most significant results were obtained with oats, which presented an improvement in fiber quality and ELN nitrogen-free extracts, in addition to a reduction in harvest time from 16 to 14 days.

Keywords:

- **HYDROPONIC GREEN FODDER**
- **INTERNET OF THINGS**
- **MECHATRONIC SYSTEM**

Capítulo I

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Ecuador ha dedicado sus territorios, principalmente, a la producción primaria minera, hidrocarburífera y agropecuaria. En la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) de 2019, se evidenció que el sector agropecuario es de gran importancia para desarrollar la economía del país debido a que en 2018 fue la segunda actividad generadora de divisas, es el sector productivo donde reside el 75 % de la población, concentra el 29,4% del empleo, aporta con el 8% al Producto Interno Bruto y contribuye con la seguridad alimentaria (INEC, 2019).

Este sector está compuesto por actividades relacionadas con la agricultura y ganadería que depende de muchos factores como la ubicación geográfica, la calidad genética de la especie, alimentación, condiciones de desarrollo, entre otros.

En la zona andina de Ecuador, Perú, Bolivia y Colombia, un sector agropecuario en crecimiento que ha contribuido a mejorar la economía de las familias, debido a que se entregan en forma directa el producto al comprador, es el destinado a la crianza y comercialización de cobayos (*Cavia Porcellus*) comúnmente llamados cuyes. En base al III Censo Agropecuario del año 2000, este mamífero roedor alcanzó los 5 millones de cabezas con una tasa de crecimiento del 14,29% anual. Mientras que en el año 2020 la población de cuyes en la zona andina se estimó en 120 millones de cabezas, siendo Perú y Ecuador los principales productores con 65 y 47 millones de cuyes, respectivamente (Cardona J. , 2020).

Es así que el 7 de septiembre de 2011 en la parroquia Ascázubi del cantón Cayambe, provincia de Pichincha se creó la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy Ascázubi bajo acuerdo ministerial MAGAP No. 331, comprendida por doce socios con una producción de 2300 cuyes anualmente.

Como toda especie pecuaria, la alimentación es fundamental para su correcto desarrollo; el principal alimento del cuy es el forraje, sin embargo, su cultivo es limitado en el sector, por lo que el Presidente de la junta de vigilancia de la Asociación Míster Cuy, señor Iván Portilla, ha desarrollado un balanceado de forraje verde a base de semillas germinadas con agua.

Una forma de producir el forraje verde es aplicando la agricultura de precisión, donde el internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial, la automatización, robótica, la conexión entre máquinas y operador en una red de información ayuda a mejorar la productividad, reducir costos y alcanzar una transformación digital de la agricultura.

Además de aplicar la tecnología existen otras técnicas de desarrollo mediante el uso de la hidroponía que mejora la calidad y producción del alimento, como lo realizó el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) en marzo de 2016 con su plan piloto de producción manual de forraje verde hidropónico (FVH) con la participación de pequeños productores de la parroquia Pastocalle, provincia de Cotopaxi. Donde, según Cristian Iza, técnico del MAGAP, “los animales asimilan la biomasa verde, la semilla que se encuentra en germinación y las raíces; eso hace que el forraje hidropónico sea una especie de alimentación complementaria, además contiene vitaminas y proteínas que ayudan a la dieta alimenticia del animal” (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2016).

1.2. Planteamiento del Problema

En Ecuador, la emergencia sanitaria golpeó duramente al sector agropecuario; uno de los grupos más vulnerables fue el de la agricultura familiar campesina e indígena en donde se genera el 80% de los empleos agrícolas y se produce cerca del 70% de los alimentos (FAO, 2020).

La Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy Ascázubi es parte de este sector vulnerable que presenta, al igual que otros productores del lugar, una baja

productividad debido a la escasa capacitación técnica en procesos de alimentación, crianza y comercialización de cuyes; además de contar con deficientes sistemas de riego, insuficiente apoyo estatal, poco capital de trabajo, entre otros.

A más de estos problemas, una de sus mayores limitaciones es el cultivo de forraje como alimento para cuyes, principalmente en época de sequía. Una alternativa empleada por los miembros de la Asociación ha sido desarrollar balanceado a base de forraje verde de semillas germinadas con agua, proceso que se realiza de forma artesanal e inicia con la preparación de semillas de cereales ya sean de trigo, maíz, cebada, avena, entre otros; posteriormente colocando 1 kilo de semillas distribuidas sobre bandejas agujereadas de 60 cm de largo por 40 cm de ancho y 4 cm de alto, colocadas en estanterías dentro de un invernadero. Su desarrollo demora alrededor de veinte días y produce una biomasa forrajera de 6 a 8 kilos por cada bandeja que depende de un constante riego y supervisión.

Ya que todo el proceso ha sido realizado de forma empírica y manual, el riego lo realizan mediante manguera sin contar con ningún control adecuado de las condiciones óptimas para la germinación de las semillas; debido a esto, existe desperdicio de agua, crecimiento no homogéneo, tiempo de desarrollo variado, plagas y generación de hongos.

1.3. Descripción Resumida del Proyecto

El presente proyecto inicia identificando una necesidad o problema de un sector, se evidencia sus limitaciones, posibles soluciones y sintetizan los requerimientos del usuario.

Además, se realizará un estudio bibliográfico de sistemas de riego, producción de forraje verde hidropónico comerciales y técnicas de control adecuadas para germinación y desarrollo de semillas para forraje.

El proyecto se llevará a cabo en las instalaciones del Presidente de la junta de vigilancia de la Asociación Míster Cuy, señor Iván Portilla. Cuenta con semillas para la germinación y la infraestructura para lo cual se diseñará y construirá un sistema escalable productor de forraje verde hidropónico con riego automático y control de parámetros ambientales aplicando software libre e internet de las cosas IoT para el monitoreo y supervisión de las condiciones de producción, el cual tendrá las siguientes etapas:

1.3.1. Etapa de Investigación

Se determinarán los requerimientos de cada etapa de la producción de forraje verde llevada a cabo por la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy Ascázubi, se investigará el tipo de semillas aptas para germinación de forraje, los parámetros ambientales óptimos para su desarrollo como temperatura, humedad, riego, luminosidad, etc.; así como sistemas estructurales, eléctricos, de control y de riego de máquinas productoras de forraje presentes en el mercado.

1.3.2. Etapa de Diseño y Selección de Componentes

En base a un análisis exhaustivo de los parámetros indagados anteriormente se determinará el diseño óptimo ajustado a los requerimientos de la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy Ascázubi previo a su implementación.

Se diseñará un sistema de riego automático programable que permita la irrigación de agua y nutrientes a las plantas, un sistema de iluminación controlada que reemplace a la radiación solar ya que ésta es variable con el clima, se diseñará el sistema IoT que permita supervisar y controlar al sistema bajo una plataforma de software libre que permita reducir costos.

1.3.3. Etapa de Construcción e Implementación

Finalizada la etapa de diseño y selección de componentes, se iniciará la construcción del sistema mecatrónico productor de forraje verde que permita la

automatización del cuidado y desarrollo de las semillas germinadas. Con el funcionamiento coordinado entre hardware y software se evaluará al sistema.

1.3.4. Etapa de Comunicación IoT

Se realizará la conexión y comunicación entre la plataforma de supervisión en tiempo real con el sistema mecatrónico implementado.

1.3.5. Etapa de Prueba y Depuración de Errores

En esta etapa se realizan las pruebas respectivas del sistema productor de forraje verde evaluando diferentes parámetros como temperatura, humedad, tiempo de riego, tiempo de germinación y crecimiento de diferentes semillas, pruebas con desarrollo en base a agua y soluciones hidropónicas, sistema IoT de supervisión del proceso; se depurará errores hasta cumplir y satisfacer los requerimientos de la Asociación.

1.4. Justificación e importancia

La diversificación y el aumento de la producción han marcado el desarrollo del sector agroindustrial por lo que la mecanización y la tecnología son los principales factores del cambio de los sistemas agrícolas.

En un contexto variante y en cara a la emergencia sanitaria causada por el Covid-19, el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador a desarrollado nuevas política pública para el sector agropecuario y ha propuesto el Plan Nacional Agropecuario al 2030 que busca la modernización e innovación, el fomento de la productividad y la calidad del agro orientándolo al desarrollo de nuevos mercados con sostenibilidad ambiental y adaptación al cambio climático (Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural, 2020).

Apoyando esta política de estado y a la misión de la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy Ascázubi que busca la producción limpia y comercialización de cuyes a fin de aportar al desarrollo socioeconómico de sus asociados, el presente

proyecto busca contribuir con el incremento de la producción de cuyes (*Cavia porcellus*) mediante la tecnificación y desarrollo de alimento con forraje verde hidropónico; ya que la capacidad de producción de la Asociación es de 15 000 cuyes, sin embargo, la producción anual es de 2300 debido a la falta de alimento.

De la alimentación provista al ganado va a depender la calidad de su carne y otros derivados, por ello es fundamental que su alimentación sea balanceada. Basados en el plan piloto de forraje hidropónico que ejecutó el MAGAP en la provincia de Cotopaxi en 2016 y produjo buenos resultados, la construcción de un sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico mejorará el tiempo de producción, calidad de alimento y optimizará recursos a los productores agropecuarios, ya que este proceso se lo realiza de forma manual convirtiéndose en una tarea repetitiva y cansada, que depende de la experticia de cada asociado.

Con la incorporación del internet de las cosas IoT se plantea incorporar la agricultura de precisión y atender la inexistente comunicación entre máquina - operario a fin de supervisar en tiempo real la germinación y desarrollo de forraje verde hidropónico.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

- Diseñar y construir un sistema mecatrónico para la producción de forraje verde hidropónico para la alimentación de cuyes (*cavia porcellus*) aplicando software libre e internet de las cosas para la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy de la parroquia Ascázubi, provincia de Pichincha.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Identificar la situación actual y requerimientos del proceso de producción de forraje verde que se realiza por parte de la Asociación.

- Investigar sistemas de riego y de control de variables ambientales de temperatura, iluminación, humedad, etc.; presentes en maquinaria industrial o proyectos similares que permitan la integración de la agricultura de precisión.
- Diseñar el sistema mecatrónico que permita supervisar la germinación y desarrollo de forraje verde por medio del Internet de las Cosas IoT.
- Construir el sistema, evaluarlo y depurarlo para satisfacer los requerimientos provistos por la Asociación Míster Cuy.
- Realizar pruebas de funcionamiento y obtener resultados para validar la hipótesis.
- Efectuar un análisis nutricional para evaluar la calidad del forraje verde hidropónico en un laboratorio especializado.

1.6. Hipótesis

- ¿El sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico aplicando software libre e internet de las cosas permitirá mejorar el tiempo de cultivo y calidad del forraje para la alimentación de cuyes (*cavia porcellus*) de la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy de la parroquia Ascázubi, provincia de Pichincha?

1.6.1. Variable Independiente

- Sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico aplicando software libre e internet de las cosas.

1.6.2. Variable Dependiente

- Mejorar el tiempo de cultivo y calidad del forraje para la alimentación de cuyes (*cavia porcellus*) de la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy de la parroquia Ascázubi, provincia de Pichincha.

Capítulo II

2. Fundamentos teóricos e investigación

El presente capítulo presenta de manera puntual el estado del arte referente al proyecto de investigación, definiciones, características, técnicas de los sistemas de producción de forraje verde hidropónico para alimentación de cuyes, internet de las cosas y sistemas de control con software libre.

2.1. Producción de Cuyes

El cuy, cobayo, conejillo de indias o científicamente conocido como *cavia porcellus*, es un roedor mamífero herbívoro que, gracias a su gran adaptabilidad, se encuentra en diferentes regiones de los países andinos del sur de América como Bolivia, Ecuador, Colombia y Perú. (Zaldívar, 1997)

La crianza de cuyes se realiza de forma tradicional, bajo condiciones empíricas inadecuadas y deficiente; o de forma tecnificada con un buen manejo sanitario que garantiza una mejor producción, como se presenta en la figura 1. Para llevar a cabo esta última, el MAGAP determina diversos factores adecuados referentes a alimentación, infraestructura, manejo sanitario y medio ambiental, sistemas de apareamiento y crianza, control de plagas, entre otros factores. (MAGAP, 2014)

Figura 1

Crianza de cuy tradicional y tecnificada



Nota. Tomado de *Manual de crianza y producción de cuyes con estándares de calidad*, por (MAGAP, 2014).

2.2. Alimentación del Cuy

La alimentación es uno de los factores de mayor importancia en el proceso y rendimiento productivo, ya que representa entre el 65% al 70% de los costos de producción. (Quispe, 2015)

Este animal requiere de proteínas, energía, fibra, minerales, vitaminas y agua, que varían en cantidad según su etapa de vida y el medio que habita, sin embargo, su carencia puede producir retardo de crecimiento, rigidez en las articulaciones, enfermedades e incluso generar una alta tasa de mortalidad. (FAO, 2016)

Los principales requerimientos nutricionales de este animal se describen en la tabla 1, junto a sus respectivas magnitudes y unidades en cada etapa de desarrollo del animal.

Tabla 1

Requerimientos nutricionales del cuy

Nutriente	Unidad	Etapa de Gestación	Etapa de Lactancia	Etapa de crecimiento y engorde
Energía digestible	Kcal / kg de materia seca	2.800-2.860	2.860-3.000	2.800-2.900
Proteína	%	18-20	18-22	13-18
Fibra	%	8-17	8-17	6-10
Calcio	%	1,4	1,4	0,8-1,2
Fósforo	%	0,8	0,8	0,4-0,7
Vitamina C	mg	200	200	200

Nota. Tomado de *Importancia de la alimentación en el sistema productivo del cuy*, por (Cardona, y otros, 2020)

Existen principalmente dos sistemas de alimentación para satisfacer estos requerimientos, básico o por forraje y mixta con forraje y alimentos complementarios.

2.2.1. Alimentación Básica

Hace referencia a la alimentación en base a forrajes de gramíneas como falsa poa figura 2 a), pasto brasileiro b), kikuyo c), y para aumentar su valor nutricional, leguminosas como la alfalfa d), entre otros. Sin embargo, este tipo de alimentación genera un crecimiento lento. (INIA, 2020)

Figura 2

Forrajes de clima frío empleados en la alimentación cuyes



Nota. Tomado de (Cardona, y otros, 2020).

En los primeros 90 días de vida, el cuy consume 250 gramos de forraje al día; mientras que, cuando es adulto requiere 450 gramos al día, aproximadamente un 30% de su peso. La combinación de forrajes es incorporada lentamente ya que estos animales son susceptibles a trastornos digestivos ocasionados por cambios bruscos en su alimentación. (Quispe, 2015)

2.2.2. Alimentación Mixta

Cuando los forrajes son insuficientes en cantidad o calidad se complementan con otros alimentos como granos partidos o balanceados concentrados preparados mediante la mezcla de afrecho, maíz, soya, harinas, entre otros; que permiten aumentar

la ganancia de peso y mejorar el potencial reproductivo. Para un engorde sano del cuy se debe suministrar 80% de forraje y 20% concentrado, junto a una buena hidratación con una media taza de agua diaria. (MAGAP, 2014)

La figura 3 muestra el paletizado de balanceado para cuyes realizado por el señor Iván Portilla, miembro de Asociación de productores agropecuarios Mister Cuy Ascázubi, con una mezcla de alimentos 100% naturales.

Figura 3

Paletizado de balanceado para cuyes



Nota. Tomado de *Balanceado pelletizado [sic] para cuyes*, por (Asociación de Productores Agropecuarios Mister Cuy Ascázubi, 2019)

2.3. Hidroponía

La hidroponía proviene del griego HIDRO (agua) y PONOS (labor o trabajo), es un conjunto de técnicas de producción de biomasa vegetal en un medio libre de tierra o en sustratos, como fibra de coco, lana de roca, arcilla expandida, entre otros; que utiliza eficientemente de forma estática o circundante agua combinada con soluciones nutritivas ricas en minerales. (Beltrano, J., & Gimenez, D. O., 2015)

2.4. Forraje Verde Hidropónico

El forraje verde hidropónico (FVH) resulta de germinar granos de cereales o leguminosas sobre bandejas colocadas en estantes bajo invernadero que protege al forraje del sol, lluvia, bajas temperaturas y plagas.

El cuy al ser una especie herbívora presenta preferencia por el forraje, siendo el FVH consumido en su totalidad, desde la raíz, tallo y hojas hasta restos de semillas. La tabla 2 presenta el contenido nutricional de las principales especies de FVH.

Tabla 2

Composición nutricional de las principales especies de FVH para alimentación de cuyes

Indicadores	FVH trigo	FVH avena	FVH maíz	FVH cebada	FVH vicia
Humedad total (%)	83,6	73,8	83,0	76,8	79,5
Materia seca (%)	16,4	26,2	17,0	23,3	20,6
Proteína cruda (%)	14,2	9,2	12,3	10,1	20,6
Fibra cruda (%)	25,9	22,1	24,2	12,5	24,5
Ceniza (%)	3,3	3,0	2,5	2,4	3,0
Materia orgánica (%)	96,7	97,0	97,5	97,6	97,0

Nota. Recuperado de *Producción de forraje verde hidropónico de diferentes cereales y su efecto en la alimentación de cuyes*, por (Sinchiguano, 2008).

2.4.1. Proceso de Producción de FVH

El proceso productivo se describe en la tabla 3, un kilo de semilla produce alrededor de doce a dieciocho kilogramos de forraje con una altura promedio de veinticinco centímetros en un lapso de diez a dieciséis días.

Tabla 3

Proceso de producción de forraje verde hidropónico

Etapas	Actividad
Selección de semilla	Adquirir semillas no tratadas, sin preservantes y de bajo costo como cebada y maíz.
Lavado de semilla	Sumergir en agua las semillas para retirar impurezas y granos partidos. Luego desinfectar en agua con hipoclorito de sodio o lejía (10 mililitros de lejía por litro de agua) durante 1 a 2 minutos.

Etapa	Actividad
Pre germinación (25 horas)	Las semillas reciben: <ul style="list-style-type: none"> • Primer remojo: 12 horas • Oreaje: 1 hora • Segundo remojo: 12 horas
Siembra-Germinación (1-2 días)	Las semillas son colocadas en las bandejas de 40 x 60 cm bajo sombra, usando 2 libras y media de semilla.
Crecimiento (10 días)	Realizar ocho riegos diarios los primeros cinco días y cuatro riegos diarios los últimos cinco días con: 1,25 cc de Solución A, y 0,5 cc de Solución B, por cada litro de agua.
Limpieza-Cosecha (2 días)	Los dos últimos días sólo se riega con agua para desmineralizar las raíces. La cosecha ocurre cuando el forraje tiene una altura de 20 a 25 cm y debe dejarse orear entre 2 a 3 horas antes de ser proporcionado al cuy.

Nota. Recuperado de *Manual de crianza y producción de cuyes con estándares de calidad del cuy*, por (MAGAP, 2014).

En la figura 4 se presenta de forma gráfica el proceso de producción de forraje verde hidropónico descrito en la tabla 3.

Figura 4

Esquema gráfico del proceso de producción de forraje verde hidropónico



Nota. Tomado de (MAGAP, 2014).

2.4.2. Ventajas de la Producción de FVH

Olvidando así el uso tradicional del suelo agrícola, la (FAO, 2002) determina las siguientes ventajas.

Alta Eficiencia de FVH en el Ahorro de Agua. Las pérdidas de agua por diversos factores naturales son mínimas en comparación con las condiciones de producción convencional en campo; la producción de un kilogramo de FVH requiere de 15 a 20 litros de agua por kilogramo de materia seca obtenida en catorce días, aproximadamente.

La transpiración es uno de los factores naturales más ineficientes en el consumo de agua, en la tabla 4 se presentan los litros de agua perdidos por transpiración para producir un kilogramo de materia seca de diferentes especies forrajeras cultivadas tradicionalmente en campo.

Tabla 4

Pérdidas de agua por transpiración en la producción de un kilogramo de materia seca de forrajes cultivados en campo

Especie	Litros de agua / kg materia seca
Avena	635
Cebada	521
Trigo	505
Maíz	372
Sorgo	27

Nota. Recuperado de *Las sequías: antes, durante y después*, por (Carámbula, 2000), como se citó en (FAO, 2002).

Eficiencia en el Uso del Espacio. Un ejemplo concreto es el planteado por (Ortiz, 2012), el cual realiza la comparación que en 30.000 m² de terreno se produjo 180.000 kilogramos de forraje de alfalfa al año, mientras que en el sistema productor

modular de la figura 5 el cual consta con 480 de bandejas distribuidas en un área de 60m² se obtuvo 175.200 kilogramos de forraje al año.

Figura 5

Sistema productor de FVH modular de bandejas



Nota. Tomado de *Crianza de cuyes con forraje verde hidropónico* por (Ortiz, 2012).

Menor Tiempo de Producción. Pese a que varios productores realizan la cosecha a los catorce o dieciséis días, el cultivo óptimo de la producción se encuentra entre el décimo hasta el doceavo día, ya que a partir de ese día su valor nutricional empieza a descender.

Inocuidad. Hábitat menos propenso a plagas como hongos, insectos o maleza que puede resultar tóxica para el animal.

Mayor Digestibilidad. En comparación al uso de granos usados como alimentación animal se aumentó su digestibilidad de un 30% a un 95 % de digestibilidad con FVH.

Diversificación e Intensificación de las Actividades Productivas. La producción puede realizarse bajo diversos climas o ambientes adversos. Se estima que 170 metros cuadrados de instalaciones con bandejas modulares en 4 pisos para FVH

de avena, equivalen a la producción convencional de 5 hectáreas, las cuales pueden ser empleadas al cultivo de otros productos.

Rentabilidad. La rentabilidad de la producción del FVH es lo suficientemente aceptable como para mejorar las condiciones de calidad de vida del productor con su familia.

Mayor control. Máximo control de parámetros de desarrollo como la cantidad de nutrientes y los parámetros del agua, PH y electro conductividad.

2.4.3. Desventajas de la Producción de FVH

Sobrevaloración de la Tecnología. Se debe a que los sistemas productores comerciales son vendidos sin considerar los requerimientos específicos de cada usuario como las variedades forrajeras a emplear, su comportamiento productivo, plagas, demanda nutricional, condiciones ambientales, entre otros.

Desinformación. La producción de FVH requiere tiempo y gran dedicación, la falta de capacitación y de conocimiento hace que esta actividad perjudique su rendimiento.

Elevado Costo de Instalación. Se requiere tecnificación del cultivo por lo que su inversión inicial es elevada, sin embargo, el FVH puede llevarse a cabo de forma más económica y accesible bajo invernaderos comunes o bajo micro túneles en el piso.

2.4.4. Requerimientos y Factores Determinantes del FVH

Según el manual técnico de forraje verde hidropónico realizado por la (FAO, 2002), establece los siguientes requerimientos y factores para la producción de FVH.

Selección Adecuada de la Semilla. El primer requerimiento es la selección de una semilla de calidad, que garantice la germinación con más del 75% y rendimiento productivo en condiciones locales.

En la figura 6 se encuentran los principales tipos de semillas utilizadas para la producción de FVH.

Figura 6

Principales semillas para FVH



Nota. Tomado de *Producción de forraje verde hidropónico para la pequeña agricultura*, por (Abarca y otros, 2016).

Luz. Durante los primeros tres días para favorecer el brote de las raíces, las bandejas deben permanecer en un ambiente de poca luminosidad.

Con el inicio del riego con solución nutritiva al cuarto día hasta la cosecha las bandejas deben estar bajo una luminosidad homogénea proveniente de la radiación solar no directa.

En el caso de usar luz artificial, el FVH requiere una intensidad lumínica entre 1.000 a 1.500 microwatts / cm² en un intervalo aproximado de 12 a 15 horas diarias y los dos últimos días del proceso de producción se debe ubicar al forraje en luz solar para que obtenga un mayor nivel nutricional y color intenso.

Temperatura. La temperatura ideal para la germinación y desarrollo de FVH de cebada, avena y trigo requieren de temperaturas entre 18 °C a 21 °C, mientras que el maíz requiere entre 25°C a 28°C.

Humedad. La humedad relativa representa la cantidad de vapor de agua presente en el aire expresada en porcentaje, para el FVH debe ser alrededor del 90%.

Si se encuentra dentro de un invernadero debe existir ventilación adecuada, ya que una excesiva ventilación provoca deshidratación del cultivo mientras que una escasa ventilación puede generar hongos.

PH del Agua de Riego. El PH permite medir el grado de acidez de una sustancia, en este caso el valor del agua de riego debe estar en el rango de 5.2 a 7.

Conductividad Eléctrica (CE) del Agua. La conductividad eléctrica permite medir en miliSiemens por centímetro (mS/cm) la concentración de sales en la solución nutritiva a aplicar al cultivo, su rango óptimo es de 1,5 a 2,0 mS/cm.

Cantidad y Tiempo de Riego. Una dosis exacta de riego según cada especie de forraje resulta difícil de determinar ya que depende de la infraestructura y condiciones ambientales de desarrollo; sin embargo, el manual técnico recomienda que el volumen diario se lo divida en 6 o 9 veces en el transcurso del día con una duración menor a 2 minutos.

Riego. El riego con agua se obtiene por microaspersión o nebulización; otros tipos de riego requieren de difusores de aire o incluso pueden llegar a inundar las bandejas de crecimiento provocando pudrición, hongos y muerte del cultivo.

Los primeros 4 días se riega hasta 0,5 litros de agua por metro cuadrado, desde el quinto día hasta dos días antes de la cosecha se usa solución hidropónica y llegado el antepenúltimo día se emplea exclusivamente agua para eliminar residuos de sales minerales.

2.5. Soluciones Nutritivas Hidropónicas para FVH

Existen varias formas para preparar soluciones hidropónicas, sin embargo, suministrar 1.25 cc de solución concentrada "A" y 0.5 cc de solución concentrada "B" por cada litro de agua a dado buenos resultados en más de 30 especies de varios países de América, según lo afirma el manual técnico de la huerta hidropónica popular de (FAO, 2003).

2.5.1. Solución Nutritiva Concentrada A

Esta solución contiene macronutrientes o nutrientes de mayor consumo por la planta, los elementos presentes en una preparación con 10 litros de agua son:

- 340 gr de fosfato mono amónico
- 2.080 gr de nitrato de calcio
- 100 gr de nitrato de potasio

2.5.2. Solución Nutritiva Concentrada B

La solución B contiene micronutrientes esenciales que son requeridos en menor cantidad, los elementos presentes en una preparación de 4 litros son:

- 492 gr de sulfato de magnesio
- 0,48 gr de sulfato de cobre
- 2,48 gr de sulfato de manganeso
- 1,20 gr de sulfato de zinc
- 6,20 gr de ácido bórico
- 0,02 gr de molibdato de amonio
- 50 gr de quelato de hierro

2.5.3. Funciones de los Elementos Nutritivos en el FVH

En la tabla 5 se detallan las funciones de cada elemento químico proveniente de la asimilación de los macro y micronutrientes de las soluciones hidropónicas.

Tabla 5

Funciones de los elementos nutritivos absorbidos por el FVH

Elemento	Funciones
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Otorga el color verde intenso a las plantas • Fomenta un rápido crecimiento y producción de hojas • Aumenta el contenido de proteínas en cultivos
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Estimulación radicular y del inicio de la planta

Elemento	Funciones
Potasio	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona resistencia a enfermedades y bajas temperaturas • Contribuye a la producción de proteína
Calcio	<ul style="list-style-type: none"> • Temprana estimulación radicular • Aumenta el contenido de calcio del FVH
Magnesio	<ul style="list-style-type: none"> • Componente esencial de la clorofila y formación de azúcares • Regula la asimilación de nutrientes, promoviendo la formación de grasas y aceites
Azufre	<ul style="list-style-type: none"> • Ingrediente esencial de las proteínas • Aporta con un crecimiento vigoroso.
Cobre	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la asimilación y la concentración del 70% en la clorofila
Boro	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementa el rendimiento y calidad del forraje
Hierro	<ul style="list-style-type: none"> • Relacionado a la síntesis de la clorofila
Manganeso	<ul style="list-style-type: none"> • Acelera la germinación y la maduración • Interviene en la fotosíntesis y síntesis de la clorofila
Zinc	<ul style="list-style-type: none"> • Promueve la síntesis de proteínas
Molibdeno	<ul style="list-style-type: none"> • Indispensable en la fijación de nitrógeno
Cloro	<ul style="list-style-type: none"> • Relacionado a la activación de enzimas

Nota. Recuperado de *Manual técnico La Huerta Hidropónica Popular*, por (FAO, 2003).

2.6. Sistemas Productores de FVH

La localización para la construcción del sistema productor de FVH requiere estar cercana a una zona de producción animal, protegido del medioambiente bajo un invernadero, cuarto o armario con acceso al agua y si es el caso a energía eléctrica.

De acuerdo con su complejidad, estos pueden ser:

- **Tradicionales:** Presentan una producción limitada debido a su construcción simple o artesanal y requiere completamente del trabajo del agricultor durante todo el proceso.

- **Tecnificados:** De construcción robusta e implementan herramientas tecnológicas para facilitar el trabajo, pueden ser semiautomáticos o completamente automáticos. (FAO, 2003)

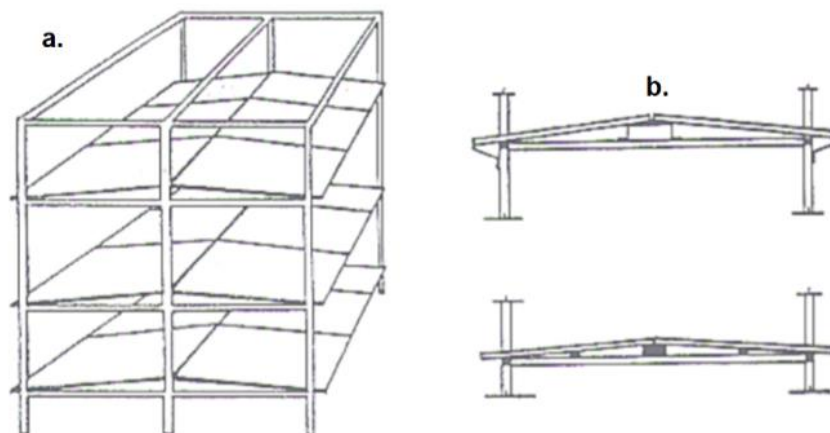
2.6.1. Principales Componentes de un Sistema Productor de FVH Tecnificado

Estructura del Estante. El estante es una estructura en la cual se distribuyen las bandejas de desarrollo por niveles o pisos con una separación de 50 cm que permite el óptimo desarrollo de la planta ya que permite el paso de luz, además de albergar al sistema de riego, sensores, etc.

La figura 7a presenta el diagrama de la estructura de un estante de tres niveles para 18 bandejas que pueden ser orientados a diferentes grados de pendiente como indica la figura 7b.

Figura 7

Diagrama de estructura de producción de FVH



Nota. Tomado de *Manual Técnico Forraje Verde Hidropónico*, por (FAO, 2002).

Bandejas de Desarrollo. Su material de construcción, tamaño y forma puede ser variado, por lo general son plásticas y rectangulares tal como se observa en la figura 8, con canales y perforaciones que mejoran el drenaje mientras aportan a la oxigenación del forraje.

Figura 8

Bandejas de desarrollo



Nota. Tomado de (MascotaModa, 2021).

Sistema de Iluminación Artificial. Las plantas requieren una fuente de luz para realizar la fotosíntesis normalmente del sol, sin embargo, se ha usado otras fuentes como fluorescentes, halógeno, incandescentes que proporcionan más longitudes de onda de las requeridas por las plantas. (Hernández y otros, 2017)

Una fuente eficiente de iluminación artificial son los diodos emisores de luz (LED) que presentan un bajo consumo eléctrico, son integrables a sistemas de control digitales, pero su mayor desventaja es su alto costo de adquisición comparados con otros. (Espinal & Del Castillo, 2018)

La lámpara LED de la figura 9 presenta dos tipos de luz: azul y roja.

Figura 9

Luz LED para cultivo



Nota. Tomado de (Amazon, 2021).

La luz azul con una longitud de onda que oscila entre 450 a 560 nm es usada por su influencia en la fotosíntesis, floración y germinación; mientras que, al emplear iluminación de luz roja la longitud de onda tiene un rango entre 630 a 770 nm que contribuye al crecimiento vegetativo y la fotosíntesis. (Martín y otros, 2010, como se citó en Serrano, 2018)

Riego por Microaspersión. En este sistema el agua llega al cultivo en forma de una fina lluvia, generalmente requiere una presión entre 1,5 a 2 bares para regar una superficie de 3 a 4 metros.

La figura 10 presenta las diferentes posiciones de trabajo de estos dispositivos tipo bailarina colocados directamente en la tubería o en estacas sobre el suelo y tipo microjets colgados mediante microtubos (Demin, 2014).

Figura 10

Microaspersores



Nota. Tomado de (NOVAGRIC, 2016).

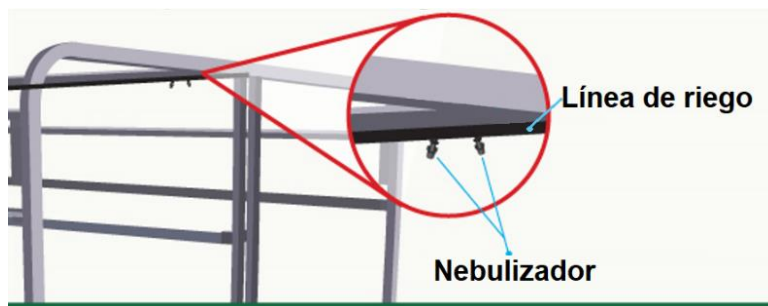
Riego por Nebulización. En este sistema los emisores colocados sobre los cultivos envían el agua o fertilizante en forma de niebla, según (HYDRO ENVIRONMENT S.A., 2021) presenta varias ventajas entre ellas:

- Riego uniforme en una fina capa de gotas que no afecta la germinación ni compactar el sustrato.
- Contribuye a disminuir la temperatura y elevar el nivel de humedad relativa.

- Ideal en la producción de FVH como se presenta en la figura 11, además en semilleros e invernaderos.

Figura 11

Riego por nebulización para FVH



Nota. Tomado de (HydroEnviroment, 2021)

Riego por Goteo. Este sistema aplica directamente el agua sobre la bandeja de desarrollo usando goteros o cintas de goteo como se presenta en la figura 12, según (Romero y otros, 2009) presenta una alta eficiencia en el uso del agua sin embargo existe una falta de desigualdad en la distribución del agua en la producción de FVH.

Figura 12

Riego por goteo para FVH



Nota. Tomado de (Romero y otros, 2009).

Dispositivos de Medida. Los factores a medir son aquellos que modifican las condiciones ambientales del cultivo, tradicionalmente existen instrumentos manuales de medición sin embargo para la automatización se emplean sensores, entre ellos se encuentran:

- Sensores de humedad y temperatura.
- Sensores de luminosidad.
- Sensores de presencia de lluvia.
- Medidores de velocidad y dirección del viento.
- Medidores de PH y conductividad eléctrica.
- Estaciones meteorológicas.
- Medidores de presión, caudal de riego, etc.

Dispositivos de Control. Recopilan información de los sensores, la analizan y ejecutan un accionamiento.

Accionamientos. Transforman la energía eléctrica, hidráulica o neumática para realizar un proceso, entre ellos se encuentran:

- Bombas
- Válvulas
- Motores
- Actuadores
- Lámparas
- Ventiladores (Rivero, 2018)

2.7. Internet de las Cosas IoT

El IoT es el conjunto e interconexión de diversos dispositivos a través del internet, donde existe una interacción entre máquinas sin la necesidad de la intervención de una persona por lo que hay posibilidad de conectar cualquier objeto imaginable al internet, desde sensores, dispositivos mecánicos hasta objetos de uso habitual. (Rose, 2015).

La continua evolución del internet permite que IoT, sea usado tanto en aplicaciones empresariales, como en la vida cotidiana por lo que muchos dispositivos

permiten la comunicación a internet de manera rápida, directa y de fácil conexión, además algunos antiguos dispositivos pueden ser actualizarlos a esta tecnología.

La principal función del IoT es permitir la recolección de datos y enviarlos a la red para su análisis, con estos datos se proponen soluciones adecuadas para el usuario que han desarrollado diferentes fabricantes por lo que también garantizan una mejora constante con el paso del tiempo.

2.7.1. Arquitectura IoT

El IoT permite conectar algo a la red para que trabajen con autonomía sin la necesidad de tener una persona cerca. Por lo que en la industria y en el hogar se realiza esta conexión por medio de protocolos de internet; su capacidad de ofrecer conectividad permite registrar, seguir, monitorear y tomar ciertas decisiones en consecuencia a los datos muestreados, gracias a sensores que detectan y envían la información recaudada, por lo que cualquier cosa puede ser inteligente gracias a los diferentes componentes que permiten la conexión de forma segura hacia el Internet, en la figura 13 se presenta la arquitectura IoT.

Figura 13

Arquitectura IoT



Nota. Tomado de *Planning an Architecture for the Internet of Things*, por (Sharma, 2014, diapositiva 10).

Cosas. Son los diferentes dispositivos como sensores, actuadores y en general el hardware necesario para la interacción del mundo físico con el virtual.

Sensores. Dispositivos capaces de medir, detectar y registrar cambios físicos, estos cambios se transforman en información o datos digitales para enviar a un sistema controlador.

Actuadores. Éstos se encargan de interactuar con el medio a través de salidas físicas y se activan a través de órdenes programadas en el controlador.

Punto de acceso. Permiten la interconexión entre las cosas y una plataforma virtual vía internet o llamada en la nube a través de tecnologías de comunicación como ZigBee, WiFi, MQTT, LoRa, sigfox, Bluetooth, etc.

Procesamiento de datos. Los datos de sensores son enviados y gestionados mediante plataformas de procesamiento de datos en la nube que permitan tomar decisiones inteligentes en base a ellos.

Aplicaciones. Software que permite al usuario gestionar un sistema IoT, conectarse al procesamiento de datos y visualizarlos gracias a interfaces de programación de aplicaciones (APIs) o mediante servicios web (Del Valle, 2016, 37m24s).

2.7.2. Beneficios del IoT

Muchos de los objetos electrónicos que se usan para el diario vivir con el paso del tiempo han incorporan la tecnología IoT presentando las siguientes ventajas:

- Conectividad a la red en tiempo real intercambiando información necesaria para su gestión automática y eficiente, ahorrando tiempo al usuario.
- Con el hecho de tener la información siempre disponible se ofrece la posibilidad de mantener los dispositivos siempre actualizados, proporcionando un sistema mucho más avanzado, sostenibles y seguros por medio de muchos entornos que se han trasladado a la nube generando dispositivos inteligentes.

- Ahorro energético, de recursos y económico debido a un mayor desempeño al monitorizar y automatizar procesos de forma controlada.
- Simplifica la vida del usuario al simplificar procesos.

2.7.3. Desventajas del IoT

Al igual que en otras tecnologías existen desventajas, entre ellas:

- La principal desventaja es su inversión inicial que depende del grado de complejidad del sistema IoT a implementar.
- Brecha digital, a pesar de que muchos de los dispositivos pueden conectarse a la red no todos los usuarios disponen de una conexión a internet.
- Brecha tecnológica entre dispositivos modernos y antiguos, en muchas ocasiones actualizar estos dispositivos suponen un gasto significativo.
- No existe un protocolo IoT estándar de comunicación por lo que se genera una incompatibilidad entre dispositivos de diferentes marcas.
- Vulnerabilidad de información, ya que mucha de ésta, no se encuentra asegurada con un cifrado de datos siendo de fácil acceso. (Winecta, 2019)

2.7.4. IoT y la Agricultura 4.0

La agricultura 4.0 incorpora la tecnología para recopilar y analizar datos sobre el campo a fin de maximizar el uso sostenible del agua, suelo, aire y otros recursos que a través de buenas prácticas agropecuarias mejoran la producción, la sostenibilidad y mitigan el daño medioambiental.

Entre las tecnologías IoT que optimizan el tiempo y las tareas agrícolas se encuentran sensores ambientales que permiten obtener información de temperatura, humedad, PH, entre otros datos que son analizados para tomar decisiones sobre los diversos procesos agrícolas en tiempo real. Por otro lado, se encuentra el uso de

drones los cuales pueden fotografiar el terreno para determinar el estado del cultivo, a más de realizar tareas de fumigación, riego e incluso siembra.

Se estima que en 2020 se aplicaron 75 millones de dispositivos IoT en el sector agrícola a nivel mundial, a pesar de ello la brecha tecnológica y digital resulta un gran desafío para muchos agricultores. (De Clercq, Vats, & Biel, 2018)

2.8. Software Libre

El software libre respeta la libertad de cada usuario de la comunidad para estudiar, mejorar, modificar y distribuir el código del programa a diferencia del software privativo que lo restringe. Que se llame libre no significa que todo sea gratis ya que existen diferentes tipos de licencias, para que el programa pueda llamarse software libre debe de cumplir cuatro condiciones presentadas en la figura 14. (Free Software Foundation, 2021)

Figura 14

Libertades del software libre

LIBERTAD	DESCRIPCIÓN
0	La libertad de usar el programa, con cualquier propósito.
1	La libertad de estudiar cómo funciona el programa y modificarlo, adaptándolo a tus necesidades.
2	La libertad de distribuir copias del programa, con lo cual se puede ayudar a otros.
3	La libertad de mejorar el programa y hacer públicas esas mejoras a los demás, de modo que toda la comunidad se beneficie.
Las libertades 1 y 3 requieren acceso al código fuente porque estudiar y modificar software sin su código fuente es muy poco viable.	

Nota. Tomado de *Software libre*, por (Rocha Vargas, s.f.).

2.9. Placas de Desarrollo de Software Libre

Existe la tendencia hacia la implantación del software libre en la industria y en los hogares, sobre todo por el ahorro de costes y el soporte ofrecido por los desarrolladores de las comunidades de programadores que suelen ser más colaborativos a la hora de participar en el desarrollo de un proyecto.

Las placas de desarrollo son dispositivos que cuentan de microcontroladores que permiten ejecutar un código de programación, presentan entradas y salidas digitales y analógicas permitiendo la comunicación con sensores y actuadores.

La característica principal de las placas de desarrollo de software libre es que se basa en licencias tipo GPL, AGPL, Copyleft, etc., lo que otorga permisos para ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, modificar el software e incluso redistribuirlo una vez modificado. No se debe confundir el software libre con el software gratuito, aunque muchas veces ambos términos confluyen. El beneficio de los desarrolladores de software libre proviene de donaciones y de los servicios asociados que proporcionan, como instalación, personalización o el soporte técnico.

La iniciativa de software libre tiene como objetivo fomentar el desarrollo y colaboración entre desarrolladores dentro de comunidades. Todos ellos, podrán desarrollar libremente y serán poseedores de un acceso a todos los avances realizados, pudiendo modificar los mismos para mejorar los proyectos.

En el mercado existen diferentes plataformas de desarrollo; entre las más usadas se encuentra Raspberry Pi, Arduino, Onion, entre otras.

Capítulo III

3. Diseño y selección de componentes del sistema

En este capítulo se plantea el diseño y selección de componentes del sistema productor de FVH tomando en consideración estudios, diseños existentes y principalmente los requerimientos de la Asociación Míster Cuy; con el fin de establecer la estructura, sistema de riego, dispositivos de medición, actuadores y tarjeta electrónica, donde se desarrollará el algoritmo de control del sistema y su conexión con la interfaz IoT.

3.1. Necesidades y Especificaciones de Diseño

En la tabla 6 se describe la situación actual del sistema productor artesanal empleado por la Asociación.

Tabla 6

Características del sistema artesanal productor de FV de la Asociación Míster Cuy

Característica	Descripción
Ubicación	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo carpa cerrada
Temperatura exterior	<ul style="list-style-type: none"> • Máxima 18°C-22°C /Min 7°-10°C
Temperatura interior	<ul style="list-style-type: none"> • Máxima 26°C-30°C /Min 10°-15°C
Capacidad productiva	<ul style="list-style-type: none"> • 40 kg al día para 198 cuyes
Rendimiento	<ul style="list-style-type: none"> • De 3 a 5 kg de FVH por cada 1.2 kg de semilla usada
Tiempo de producción	<ul style="list-style-type: none"> • Cada 15 días
Tipo de semillas	<ul style="list-style-type: none"> • Maíz, cebada, avena y trigo.
Proceso de producción	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de semilla • Lavado de semilla • Pre germinación (25 horas) • Siembra-Germinación (2 días) • Crecimiento (12 días) • Cosecha

Característica	Descripción
Material de estructura	<ul style="list-style-type: none"> • Madera
Tipo de estructura	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo estante
Número de pisos	<ul style="list-style-type: none"> • 3
Dimensiones estructura	<ul style="list-style-type: none"> • 5.2 m x 2.5 m x 2 m
Distancia entre pisos	<ul style="list-style-type: none"> • 0.5 m
Dimensiones de bandejas	<ul style="list-style-type: none"> • 60 cm x 39.5 cm x 4cm, 1mm de espesor
Capacidad de bandejas	<ul style="list-style-type: none"> • 1.2 kg de semillas
Número de bandejas	<ul style="list-style-type: none"> • 180 bandejas en 15 días (12 bandejas / día)
Material de bandejas	<ul style="list-style-type: none"> • Plástico ABS
Vida útil de bandejas	<ul style="list-style-type: none"> • 1 año o hasta que se rompan
Tipo de riego	<ul style="list-style-type: none"> • Riego manual por aspersion
Frecuencia de riego	<ul style="list-style-type: none"> • 8 riegos diarios los primeros 11 días • 4 riegos diarios los últimos 4 días
Tiempo de riego	<ul style="list-style-type: none"> • 10 seg por bandeja
Reutilización de agua	<ul style="list-style-type: none"> • No
Tipo de luminosidad	<ul style="list-style-type: none"> • Luz solar
Uso de solución hidropónica	<ul style="list-style-type: none"> • No
Automatización	<ul style="list-style-type: none"> • No

Nota. Tomado de *Datos Asociación Míster Cuy Ascázubi*, por (Portilla, 2021).

Los requerimientos por parte de la Asociación Míster Cuy a tomar en cuenta es la capacidad de producción, siendo anualmente 2500 cuyes por año, es decir en promedio 192 cuyes mensual. Sin embargo, como plan de reactivación económica se ha proyectado la producción de 300 cuyes mensuales, los cuales consumen alrededor de 60 kg diarios de forraje verde junto a otros alimentos. Se requiere que el sistema productor de FVH mantenga la estructura tipo pisos con separación de 50 cm, como el actual sistema artesanal que dispone la Asociación; sin embargo, con una menor cantidad de bandejas y de mayor área, con diseño que evite el estancamiento de agua y elaboradas con un material que garantice la inocuidad de los alimentos.

El sistema deberá ser escalable para ampliar la producción de forraje ya que el trabajo de titulación proveerá del primer módulo que abastecerá de FVH para un día de alimento, luego de procesar las semillas durante 15 días. El módulo se ubicará bajo una carpa cerrada a modo de invernadero montado previamente por parte de la Asociación, la cual servirá como protección ante factores climáticos y plagas.

En la tabla 7 se sintetizan las necesidades y demandas subjetivas de la Asociación para las cuales se establecen las respectivas características técnicas.

Tabla 7

Necesidades de usuarios de la Asociación y características técnicas del proyecto

N°	Necesidad	Característica técnica
1	Fácil de manejar o manipular	Fácil operación
2	Simplificar el proceso de producir	Proceso productivo automático
3	No se contamine el FVH	Bandejas de material de grado alimenticio
4	FVH para 300 cuyes	Capacidad de producción eficiente
5	Estructura resistente al agua y al clima	Estructura de material inoxidable
6	Bandejas resistentes y con drenaje	Bandejas con diseño eficiente
7	Fácil instalación y mantenimiento	Modular
8	Sistema crezca según la necesidad de producir FVH	Escalable
9	Inteligente con control remoto	Capacidad IoT
10	Costo moderado	Manufactura y materiales del mercado nacional

Se analiza el nivel de importancia de las características técnicas según la puntuación obtenida por la matriz QFD del anexo A y se ordena porcentualmente como se observa en la tabla 8

Tabla 8

Resultados por nivel de importancia de las características técnicas del proyecto obtenidos de la matriz QFD

Indicador	Porcentaje	Características técnicas
1	14.28 %	Proceso productivo automático
2	13.94 %	Capacidad de producción eficiente
3	13.34 %	Estructura de material inoxidable
4	12.76 %	Bandejas de material de grado alimenticio
5	11.84 %	Bandejas con diseño eficiente
6	8.84 %	Fácil operación
7	8.25 %	Capacidad IoT
8	7.50 %	Modular
9	5.36 %	Escalable
10	3.90 %	Manufactura y materiales del mercado nacional

Con los resultados por nivel de importancia obtenidos de la matriz QFD se realiza la tabla 9 que delimita la estructura del proyecto en módulos y subsistemas.

Tabla 9

Módulos y subsistemas de diseño

Módulo	Subsistema	Indicador satisfecho
Estructural	Diseño del subsistema estructural de bandejas	1, 2, 4, 5, 6, 8, 10
	Diseño del subsistema estructural del estante	2, 3, 8, 9, 10
Riego	Diseño del subsistema de riego	1, 2, 8, 10
Electrónico	Diseño del subsistema electrónico	1, 2, 6, 7, 8, 10
IoT	Diseño de control e IoT	1, 2, 6, 7

3.2. Diseño del Subsistema Estructural

3.2.1. Selección de Material

Basados en las amplias posibilidades para la construcción descritas en el manual técnico de FVH (FAO, 2002), en la tabla 10 se detallan las características de posibles materiales de construcción.

Tabla 10*Materiales de construcción en la industria alimentaria*

Material	Características
Aluminio	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad: 2.70 Mg/m³ • Resistencia media a la corrosión • Buen conductor térmico • Resistencia mecánica media • Baja dureza
Acero inoxidable	<ul style="list-style-type: none"> • Alta densidad: 7.7 - 8.0 Mg/m³ • Excelente resistencia a la corrosión • Resistencia a detergentes y desinfectantes • Alto costo
Acero galvanizado	<ul style="list-style-type: none"> • Alta densidad: 7.8 – 7.9 Mg/m³ • Plancha de acero recubierta con zinc • Resistencia media-baja a la corrosión • Resistencia mecánica alta
Polímeros termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Baja densidad: 0.94 – 0.96 Mg/m³ • Material ligero • Resistencia mecánica baja • Rigidez baja • Bajo costo

Nota. Tomado de *Selección de materiales en el diseño de máquinas*, por (Romeva, 2008)

Para seleccionar el material más adecuado se emplea el método ordinal corregido de criterios ponderados donde en cada tabla de evaluación se establece una relación jerárquica entre criterios. (Romeva, 2002)

Los criterios de evaluación según algunos fabricantes de equipos para la industria alimenticia como (Brito, 2019) son:

- Material apto para alimentos no oxidante

- Resistencia mecánica
- Vida útil
- Versatilidad en el momento de fabricación
- Costo de material y fabricación

En la tabla 11 se presentan los pesos específicos de cada criterio de evaluación.

Tabla 11

Evaluación de criterios para el material

Apto para alimento > Resistencia = Vida útil > Versátil > Costo							
Criterio	Apto alim.	Resist.	Vida útil	Versátil	Costo	$\Sigma+1$	Pondera.
Apto alimento		1	1	1	1	5	0,33
Resistencia	0		0,5	1	1	3,5	0,23
Vida útil	0	0,5		1	1	3,5	0,23
Versátil	0	0	0		1	2	0,13
Costo	0	0	0	0		1	0,07
Suma						15	1

Se procede a la evaluación del peso específico de cada criterio como se realiza en las siguientes tablas.

Tabla 12

Evaluación de criterios: apto para alimentos

Inoxidable = Polímero > Aluminio > Galvanizado						
Apto alim.	Aluminio	Inoxidable	Galvanizado	Polímero	$\Sigma+1$	Ponderación
Aluminio		0	1	0	2	0,20
Inoxidable	1		1	0,5	3,5	0,35
Galvanizado	0	0		0	1	0,10
Polímero	1	0,5	1		3,5	0,35
Suma					10	1

Tabla 13*Evaluación de criterios: resistencia mecánica*

Inoxidable > Galvanizado > Aluminio > Polímero						
Resistencia	Aluminio	Inoxidable	Galvanizado	Polímero	$\Sigma+1$	Ponderación
Aluminio		0	0	1	2	0,20
Inoxidable	1		1	1	4	0,40
Galvanizado	1	0		1	3	0,30
Polímero	0	0	0		1	0,10
Suma					10	1

Tabla 14*Evaluación del criterio: Vida útil*

Inoxidable > Galvanizado > Aluminio > Polímero						
Vida útil	Aluminio	Inoxidable	Galvanizado	Polímero	$\Sigma+1$	Ponderación
Aluminio		0	0	1	2	0,20
Inoxidable	1		1	1	4	0,40
Galvanizado	1	0		1	3	0,30
Polímero	0	0	0		1	0,10
Suma					10	1

Tabla 15*Evaluación del criterio: Versatilidad fabricación*

Polímero > Inoxidable > Aluminio > Galvanizado						
Versátil	Aluminio	Inoxidable	Galvanizado	Polímero	$\Sigma+1$	Ponderación
Aluminio		0	1	0	2	0,20
Inoxidable	1		1	0	3	0,30
Galvanizado	0	0		0	1	0,10
Polímero	1	1	1		4	0,40
Suma					10	1

Tabla 16

Evaluación del criterio: Menor costo de material y fabricación

Aluminio > Galvanizado > Polímero > Inoxidable						
Costo	Aluminio	Inoxidable	Galvanizado	Polímero	$\sum+1$	Ponderación
Aluminio		1	1	1	4	0,40
Inoxidable	0		0	0	1	0,10
Galvanizado	0	1		1	3	0,30
Polímero	0	1	0		2	0,20
				Suma	10	1

En base a la evaluación del peso específico de cada criterio se establece la tabla 17 de conclusiones.

Tabla 17

Conclusiones selección material para estructura

Conclusiones	Apto alim.	Resist.	Vida útil	Versátil	Costo	\sum	Prioridad
Aluminio	0,33*0,2	0,23*0,2	0,23*0,2	0,13*0,2	0,07*0,4	0,2133	3
Inoxidable	0,33*0,35	0,23*0,4	0,23*0,4	0,13*0,3	0,07*0,1	0,3500	1
Galvanizado	0,33*0,1	0,23*0,3	0,23*0,3	0,13*0,1	0,07*0,3	0,2067	4
Polímero	0,33*0,35	0,23*0,1	0,23*0,1	0,13*0,4	0,07*0,2	0,2300	2

La mejor alternativa de solución es acero inoxidable ya que no se corroe ni oxida, garantizando la inocuidad de alimentos, el acero escogido será de grado alimenticio AISI 430; tanto para las bandejas, como para la estantería.

3.2.2. Dimensiones de Bandejas

Según (MAGAP, 2014) idealmente 1.2 kg de semillas rinde entre de 12 a 18 kg de forraje, sin embargo, en la práctica (Portilla, 2021) afirma que la misma cantidad de semillas rinde alrededor de 3 a 5 kg de forraje por cada 0.24 m².

Tomando como referencia un rendimiento de 6kg, se calcula el área mínima total de cultivo para producir los 60 kg de FVH requeridos aplicando la ecuación (1).

$$\text{Área}_{\text{mín Total}} = \text{Forraje requerido} * \frac{0.24 \text{ m}^2}{\text{rendimiento}_{\text{mín}}} \quad (1)$$

$$\text{Área}_{\text{mín Total}} = 60 \text{ kg} * \frac{0.24 \text{ m}^2}{6 \text{ kg}}$$

$$\text{Área}_{\text{mín Total}} = 2.4 \text{ m}^2$$

Empleando bandejas comerciales de 60 x 40 x 4 cm se requerirían de 10 bandejas, sin embargo, el productor desea aumentar su tamaño y reducir el número de estas por lo que se estima una cantidad de 6 bandejas.

El área mínima de cada bandeja se calcula:

$$\text{Área}_{\text{mín bandeja}} = \frac{\text{Área}_{\text{mín Total}}}{\# \text{ de bandejas}} \quad (2)$$

$$\text{Área}_{\text{mín bandeja}} = \frac{2.4 \text{ m}^2}{6} = 0.4 \text{ m}^2$$

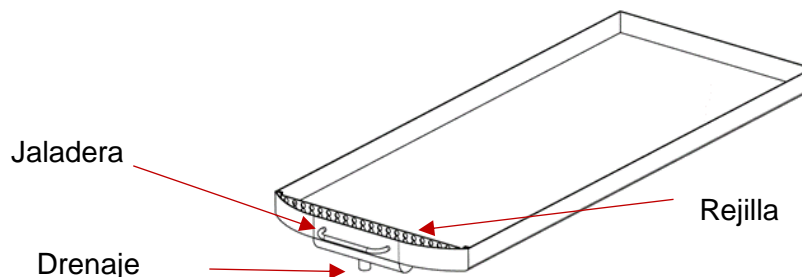
3.2.3. Diseño CAD de Bandeja

Se realiza el modelado CAD empleando el software Autodesk Inventor con licencia Educativa, la bandeja se encuentra construida en acero inoxidable AISI 430 de grado alimenticio con un espesor de 1.5 mm, que según fabricantes de equipos alimenticios es un espesor ideal que proporciona una adecuada rigidez para que no sea demasiado flexible ni demasiada pesada. (Mipanelinox, 2018)

En la figura 15 se presenta el diseño propuesto junto con sus partes y sus respectivos planos se encuentran en el anexo B.

Figura 15

Elementos de la bandeja

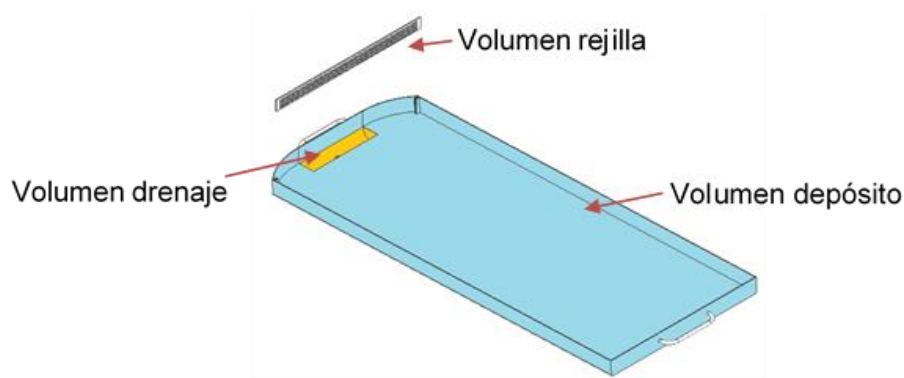


Cuenta con jaladeras para una mejor manipulación, tubo roscado $\frac{1}{2}$ " para drenaje y una rejilla realizada con una malla comercial perforada de 1 mm de espesor que evita que las semillas caigan al drenaje. La dimensión de la bandeja es de 42 x 450 x 1053.20 mm con un área de cultivo de 0.4725 m^2 superior al área mínima calculada, además, se toma en cuenta el mayor uso posible de la plancha estándar de 1.22 x 2.44 m para no desperdiciar material al momento de su construcción.

El volumen de trabajo de cada bandeja es calculado segmentando la bandeja en tres volúmenes como indica la figura 16.

Figura 16

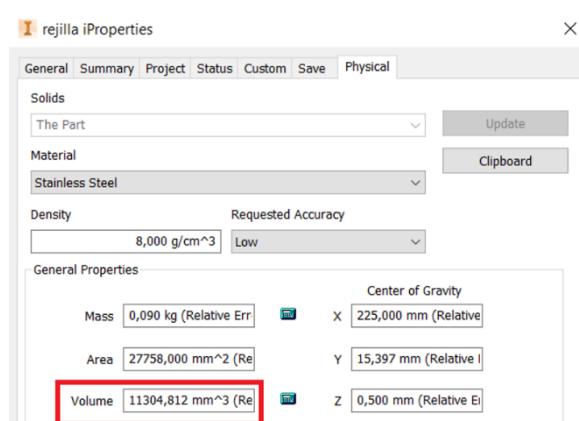
Volumen de bandeja



El volumen de la rejilla se adquiere de las propiedades mostradas a continuación

Figura 17

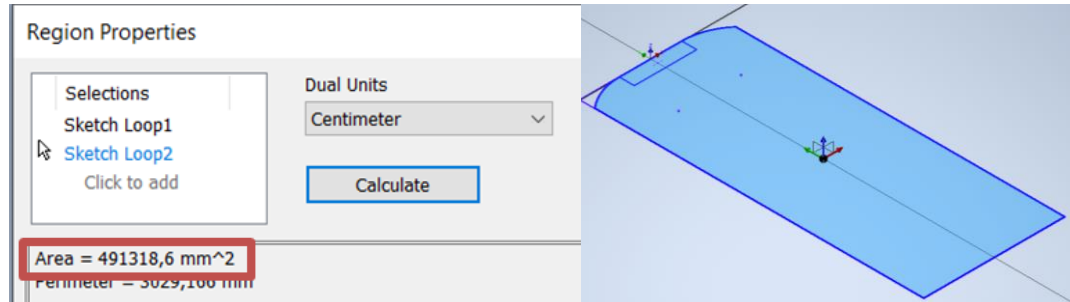
Propiedades rejilla de bandeja



Para calcular el volumen del depósito primero se estima el área de la figura 18.

Figura 18

Esquema de Riego



El volumen del depósito se calcula con la siguiente ecuación.

$$Volumen_{depósito} = Área_{depósito} * alto_{rejilla} \quad (3)$$

$$Volumen_{depósito} = 4913.186 \text{ cm}^2 * 3 \text{ cm}$$

$$Volumen_{depósito} = 14739,558 \text{ cm}^3$$

El volumen del drenaje es la mitad de un cilindro del cual su radio es de 2.34 cm y altura de 20 cm, permitiendo el cálculo en la ecuación 4.

$$Volumen_{drenaje} = \frac{Volumen_{cilindro}}{2} \quad (4)$$

$$Volumen_{drenaje} = \frac{\pi * r^2 * altura}{2}$$

$$Volumen_{drenaje} = \frac{\pi * (2.34 \text{ cm})^2 * 20 \text{ cm}}{2}$$

$$Volumen_{drenaje} = 172.021 \text{ cm}^3$$

El volumen de trabajo de cada bandeja es:

$$Volumen_{trabajo} = Volumen_{depósito} + Volumen_{drenaje} - Volumen_{rejilla} \quad (5)$$

$$Volumen_{trabajo} = 14739,558 \text{ cm}^3 + 172.021 \text{ cm}^3 - 11.3048 \text{ cm}^3$$

$$Volumen_{trabajo} = 14900.27 \text{ cm}^3 = 14.9 \text{ litros}$$

3.2.4. Análisis de Esfuerzos en Bandeja

Para realizar el análisis de esfuerzos en la bandeja primero se determina las cargas a soportar de la misma, como se indica en la tabla 18.

Tabla 18

Fuerzas soportadas por bandeja

Etapas del proceso	Masa	Peso
Lavado	2.36 kg (semillas) + 18.9 kg (agua) = 21.3 kg	208.6 N
Pregerminación	2.36 kg * 3 (semillas hidratadas) = 7.08 kg	69.5 N
Cosecha Rend. 4/1	7.08 kg + 8.8 kg (forraje) = 14.96 kg	146.76 N
Cosecha Rend. 8/1	7.08 kg + 15.75 kg (forraje) = 22.84 kg	224.06 N
Cosecha Rend.18/1	7.08 kg + 34.44 kg (forraje) = 42.5 kg	417.2 N

Mediante un software CAE se analiza el comportamiento de la bandeja ante el peso crítico de 417.2 N, donde el máximo esfuerzo de Von Mises calculado en la figura 19 es de 43.98 MPa, siendo menor a la resistencia a la cedencia de 276 MPa del material; por lo que el diseño es adecuado.

Se obtiene la deformación total máxima de 1.903 mm ubicada en el centro de la bandeja (figura 20); y el factor de seguridad mínimo de 5.68 y máximo de 15, siendo muy robusta (figura 21).

Figura 19

Esfuerzo equivalente de Von Mises de la bandeja

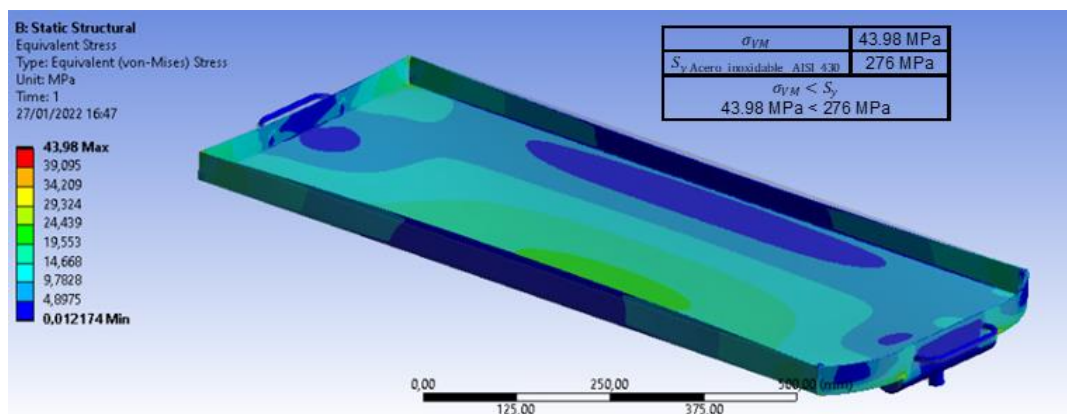
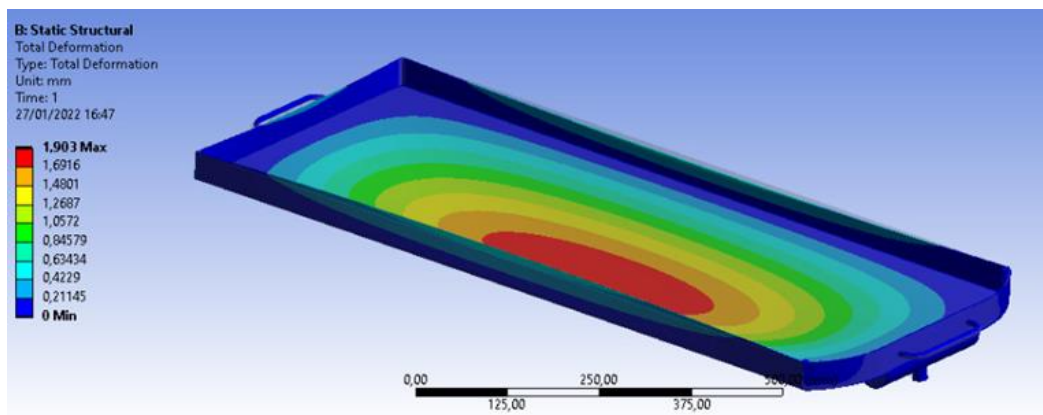
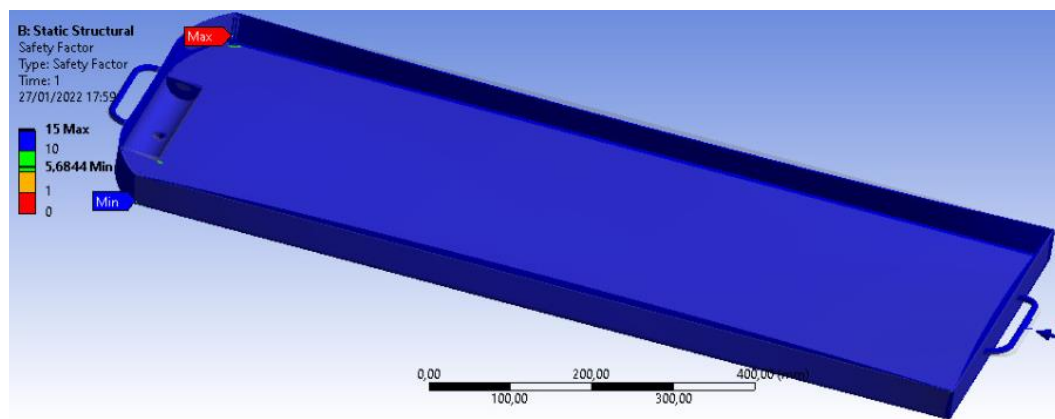
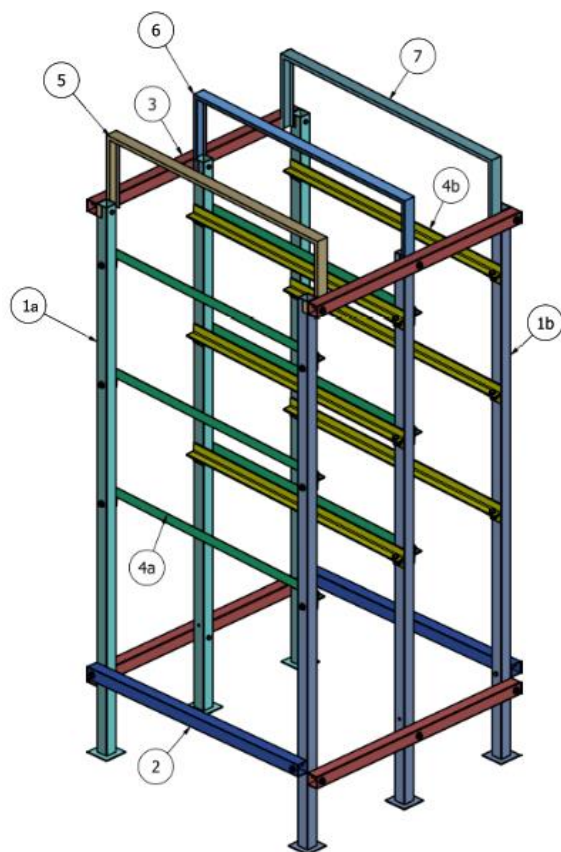


Figura 20*Deformación total de la bandeja***Figura 21***Factor de seguridad de la bandeja*

3.2.5. Diseño CAD del estante

El estante es el lugar donde reposan las bandejas junto a otros elementos electrónicos y de riego, su material es el mismo empleado en la construcción de las bandejas, por ser el más adecuado al analizarlo por el método ordinal corregido de criterios ponderados de la tabla 17.

El diseño de la estructura al ser modular y escalable se compone de 6 tipos de piezas ensamblables como se presenta en la figura 22, sus planos se encuentran en el anexo B.

Figura 22*Estructura del estante*

3	Tubo parante posterior	1a	Acero Inox
3	Tubo parante frontal	1b	Acero Inox
3	Tubo lateral	2	Acero Inox
3	Tubo frontal	3	Acero Inox
6	Ángulo con pasador izquierdo	4a	Acero Inox
6	Ángulo con pasador derecho	4b	Acero Inox
1	C superior izquierda	5	Acero Inox
1	C superior central	6	Acero Inox
1	C superior derecha	7	Acero Inox
6	Bandeja	8	Acero Inox
6	Rejilla	9	Acero Inox
No. de pieza	Denominación	No. de dibujo	Material

3.2.6. Análisis de Esfuerzos en la Estructura

Los resultados del análisis estructural de la figura 23 determina que la tensión máxima de Von Mises es 7.66 MPa ante la fuerza crítica de 417.2 N ejercido en cada bandeja, siendo menor a la resistencia a la cedencia de 276 MPa para el acero inoxidable AISI 430.

La deformación total máxima de 0.047 mm, se presenta en el último piso como se evidencia en la figura 24a, mientras que en la figura 24b el factor de seguridad es 15, siendo un diseño robusto ante un posible incremento en el número de pisos cumpliendo el requerimiento de escalabilidad.

Figura 23

Esfuerzo equivalente de Von Mises de la estructura

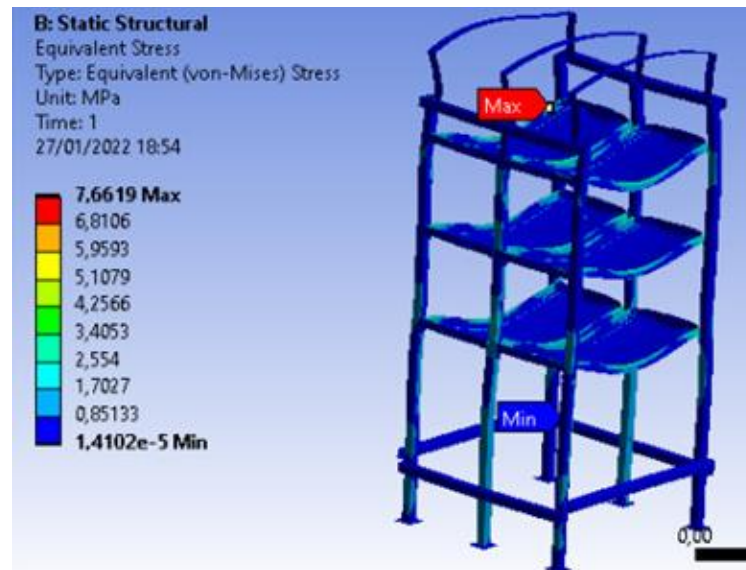
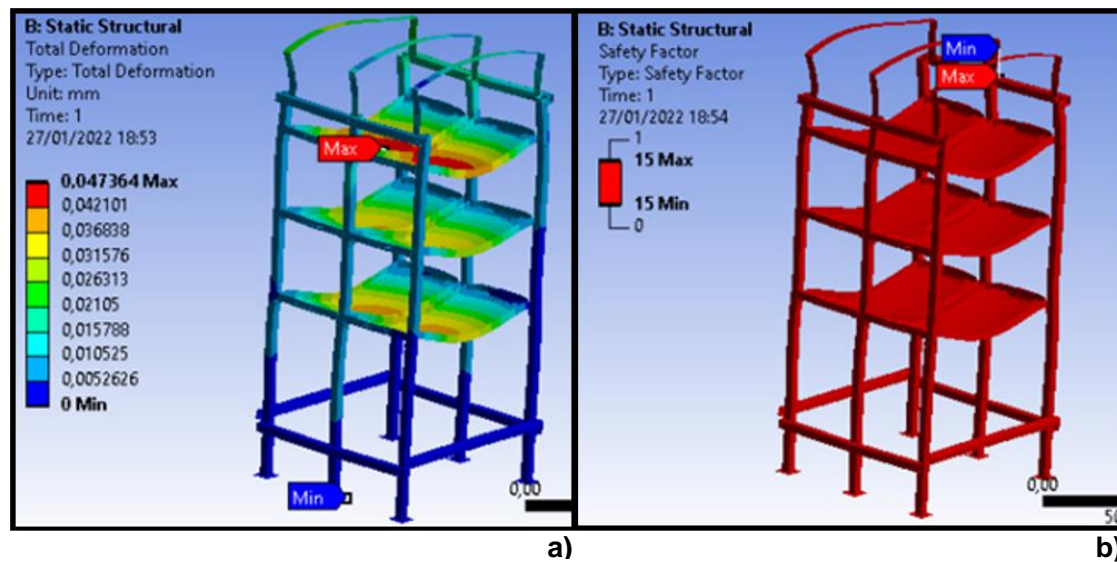


Figura 24

Deformación total y Factor de seguridad de la estructura



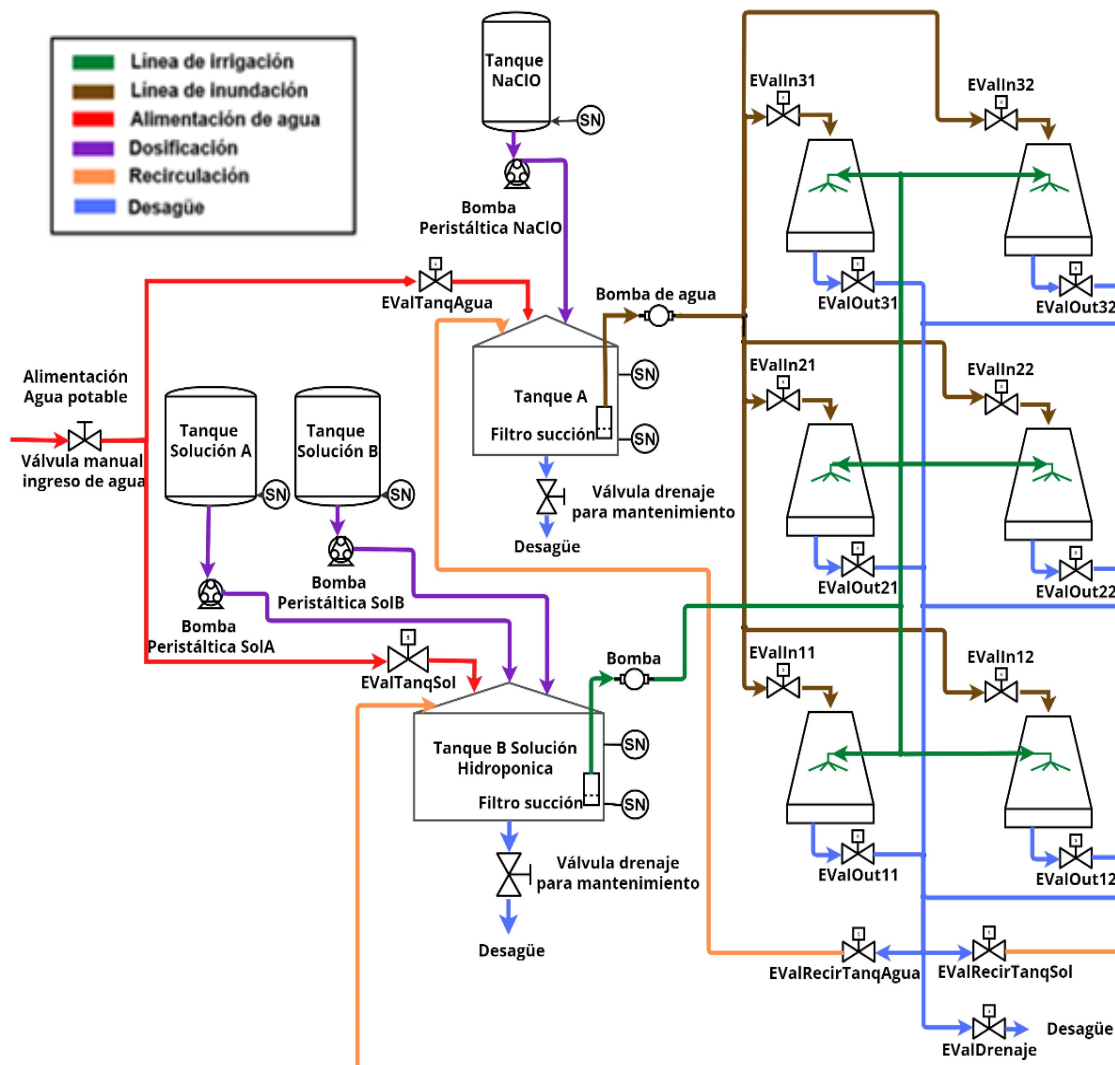
3.3. Diseño del Subsistema Riego

El sistema productor de FVH integra todas las etapas de producción en las mismas bandejas, por lo cual en su diseño se considera el uso de varias líneas de flujo de líquidos, enunciadas a continuación:

- Línea de irrigación, destinada a la etapa de crecimiento.
- Línea de inundación, empleada en la etapa de desinfección y pregerminación.
- Línea de alimentación de agua potable.
- Línea de dosificación, empleada para dispensar NaClO y soluciones nutritivas.
- Línea de recirculación de fluido.
- Línea de desagüe.

Figura 25

Esquema de Riego



La distribución de las líneas de flujo se presenta en el esquema de la figura 25; para proporcionar presión y caudal adecuados se emplea bombas eléctricas, para evitar la obstrucción de la red de tuberías se emplean los respectivos filtros, el control del paso de fluido se realiza mediante válvulas solenoides distribuidas de tal manera que permitan la automatización dentro de las etapas del proceso productivo.

3.3.1. Diseño de la Línea de Irrigación

Existen diferentes tipos de riego empleado en la producción de forraje, en la tabla 19 se describe cada posible opción aplicar en la línea de irrigación.

Tabla 19

Alternativas de riego para línea de irrigación

Riego	Características
Microaspersión	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia: 85 – 90 % • Dosificación precisa • Empleado en cultivos pequeños
Nebulización	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia: 90 % • Regula la humedad ambiental • Fácil instalación
Inundación	<ul style="list-style-type: none"> • Baja complejidad y costo • Eficiencia: 40 – 65 %
Goteo	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia: 90 % • Bajo consumo y alta eficiencia • Permite el uso de fertilizantes

Nota. Tomado de *El desarrollo del microrriego en América Central*, por (FAO, 2008)

Para seleccionar el riego más adecuado se emplea el método de criterios ponderados basados en los factores a considerar de la tabla 20.

Tabla 20*Evaluación de criterios para selección de riego*

Eficiencia > Regulación Temperatura /Humedad > Fácil instalación > Costo						
Criterio	Eficiencia	Regulación T/H	Instalación	Costo	$\Sigma+1$	Pondera.
Eficiencia		1	1	1	4	0,40
Regulación T/H	0		1	1	3	0,30
Fácil instalación	0	0		1	2	0,20
Costo	0	0	0		1	0,10
				Suma	10	1

En siguientes tablas se valoran los pesos específicos de cada criterio y mediante una relación de orden se prioriza cada posible opción de riego.

Tabla 21*Evaluación del criterio: eficiencia de riego*

Nebulización = Goteo > Microaspersión > Inundación						
Eficiencia	Microaspersión	Goteo	Nebulización	Inundación	$\Sigma+1$	Pondera.
Microaspersión		0	0	1	2	0,20
Goteo	1		0,5	1	3,5	0,35
Nebulización	1	0,5		1	3,5	0,35
Inundación	0	0	0		1	0,10
				Suma	10	1

Tabla 22*Evaluación del criterio: regulación de temperatura y humedad*

Nebulización = Microaspersión > Goteo = Inundación						
Regulación T/H	Microaspersión	Goteo	Nebulización	Inundación	$\Sigma+1$	Pondera.
Microaspersión		1	0,5	1	3,5	0,35
Goteo	0		0	0,5	1,5	0,15
Nebulización	0,5	1		1	3,5	0,35
Inundación	0	0,5	0		1,5	0,15
				Suma	10	1

Tabla 23*Evaluación del criterio: fácil instalación*

Inundación > Goteo > Microaspersión = Microaspersión						
Fácil instalación	Microaspersión	Goteo	Nebulización	Inundación	$\Sigma+1$	Pondera.
Microaspersión		0	0,5	0	1,5	0,15
Goteo	1		1	0	3	0,30
Nebulización	0,5	0		0	1,5	0,15
Inundación	1	1	1		4	0,40
Suma					10	1

Tabla 24*Evaluación del criterio: bajo costo*

Inundación > Goteo > Microaspersión = Microaspersión						
Costo	Microaspersión	Goteo	Nebulización	Inundación	$\Sigma+1$	Pondera.
Microaspersión		0	0,5	0	1,5	0,15
Goteo	1		1	0	3	0,30
Nebulización	0,5	0		0	1,5	0,15
Inundación	1	1	1		4	0,40
Suma					10	1

Una vez determinadas las ponderaciones de cada criterio se analiza la tabla 25 de conclusiones.

Tabla 25*Conclusiones selección material para estructura*

Conclusiones	Eficiencia	Regula T/H	Instalación	Costo	Σ	Prioridad
Microaspersión	0,4*0.2	0.3*0.35	0.2*0.15	0.1*0.15	0,230	3
Goteo	0,4*0.35	0.3*0.15	0.2*0.30	0.1*0.30	0,275	2
Nebulización	0,4*0.35	0.3*0.35	0.2*0.15	0.1*0.15	0,290	1
Inundación	0,4*1.0	0.3*0.15	0.2*0.40	0.1*0.40	0,205	4

La mejor alternativa de riego que se adapta al proyecto es por nebulización; ya que, a más de una alta eficiencia, cuenta con la capacidad de regular la temperatura y humedad del ambiente.

3.3.1.1. Esquema de la Línea de Irrigación. La nebulización requiere de una bomba que suministre el suficiente caudal y presión a los rociadores, para el diseño se usa boquillas de baja presión como se indica en la figura 26, que cubren una superficie desde 30 cm a 50 cm según su disposición.

Figura 26

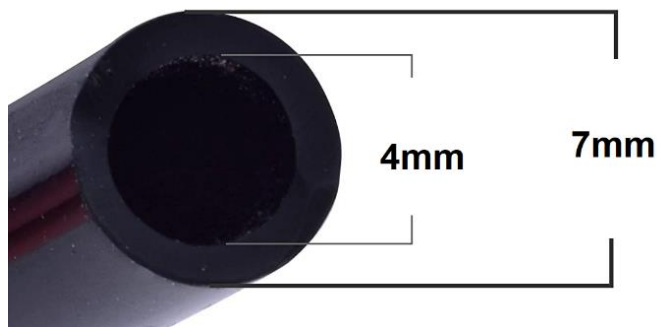
Boquillas de nebulización



Se estima el uso de tres boquillas para abarcar el área requerida de 45 x 105 cm de cada bandeja, en general el caudal de pulverización se encuentra entre 95 ml/min a 178 ml/min con una presión de funcionamiento de 2 a 10 kg/cm². La tubería empleada será manguera plástica de 1/4" cuyas dimensiones se presentan en la figura 27.

Figura 27

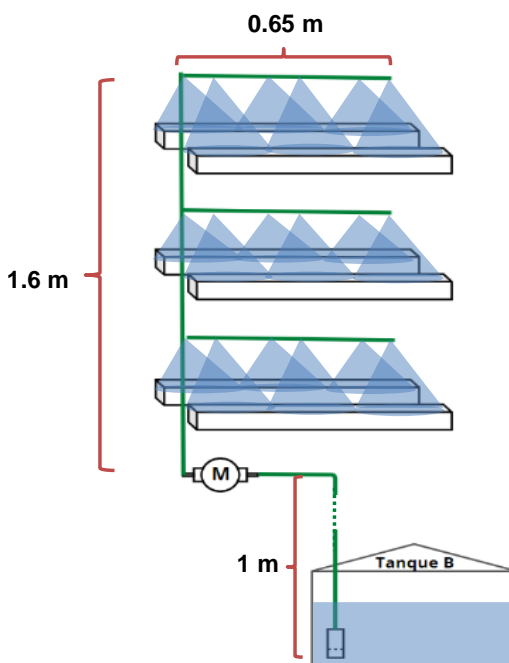
Manquera para línea de Irrigación



En la figura 28 se presenta el diseño de distribución de irrigación.

Figura 28

Esquema de irrigación



3.3.1.2. Selección de Bomba Línea Irrigación. Para determinar la potencia real de la bomba se aplica la ecuación:

$$P_{real} = \frac{P_{teórica}}{\% \text{ eficiencia}} \quad (6)$$

Donde el porcentaje de eficiencia deseado es del 85% y la potencia teórica se calcula con la ecuación 7.

$$P_{teórica} = H_B * \rho * g * Q_T \quad (7)$$

Donde:

H_B Altura dinámica o carga de trabajo de la bomba

ρ Densidad del fluido

g Coeficiente de gravedad

Q_T Caudal total

Siendo necesario hallar la altura dinámica y el caudal total.

El caudal total se obtiene como:

$$Q_T = \text{caudal de pulverización} * \# \text{ boquillas} \quad (8)$$

$$Q_T = 178 \frac{\text{ml}}{\text{min}} * 18$$

$$Q_T = 3204 \frac{\text{ml}}{\text{min}} = 0.000053186 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

La altura dinámica se calcula con la ecuación:

$$H_B = h_f + \left[\frac{P_2}{\rho * g} + \frac{V_2^2}{2 * g} + Z_2 \right] - \left[\frac{P_1}{\rho * g} + \frac{V_1^2}{2 * g} + Z_1 \right] \quad (9)$$

Donde:

h_f Pérdida de carga

Presión en el nivel en la toma de agua en el tanque $P_1 = 0 \text{ kg/cm}^2$

Velocidad de flujo de agua en el tanque $V_1 = 0 \text{ m/s}$

Altura toma de agua en tanque respecto a la bomba $Z_1 = -1 \text{ m}$

Presión de boquilla $P_2 = 10 \text{ kg/cm}^2 = 980665 \text{ N/m}^2$

V_2 Velocidad de flujo del rociador

Altura máxima de rociadores respecto a la bomba $Z_2 = 1.60 \text{ m}$

Densidad del agua $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Gravedad $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Sin embargo, se desconoce la velocidad del flujo de agua del rociador, por lo que se calcula como:

$$V_2 = \frac{Q_{\text{rociador}}}{S_{\text{int manguera}}} \quad (10)$$

Donde:

Caudal pulverización de boquilla $Q_{\text{rociador}} = 178 \text{ ml/min} = 0.00000295 \text{ m}^3/\text{s}$

$S_{\text{int manguera}}$ Sección de la manguera

La sección de la manguera se halla a partir de su diámetro interno siendo este de 4 mm y aplicando la ecuación 11.

$$S_{int\ manguera} = \frac{\pi D_{int}^2}{4} \quad (11)$$

$$S_{int\ manguera} = \frac{\pi (4\ mm)^2}{4}$$

$$S_{int\ manguera} = 12.566\ mm^2 = 0.00001256\ m^2$$

Una vez calculada la sección interna de la manguera se emplea la ecuación 10 para calcular la velocidad del flujo de agua a la salida de la boquilla.

$$V_2 = \frac{0.00000295\ m^3/s}{0.00001256\ m^2} \quad (12)$$

$$V_2 = 0.235\ m/s$$

También se debe calcular la pérdida de carga en el recorrido del agua por la manguera empleando la ecuación:

$$h_f = \frac{f * L * V_2^2}{2 D_{int} * g} \quad (13)$$

Donde:

f Coeficiente de fricción

Longitud de la manguera $L = 3.55\ m$

$D_{int} = 4\ mm = 0.004\ m$

Sin embargo, se requiere determinar el coeficiente de fricción en función de número de Reynolds según la rugosidad relativa.

El número de Reynolds N_R permite diferenciar si un fluido es laminar o turbulento y se calcula como (Mott, 2006):

$$N_R = \frac{V_2 * D_{int} * \rho}{\eta} \quad (14)$$

Donde:

$V_2 = 0.235\ m/s$

$$D_{int} = 4 \text{ mm} = 0.004 \text{ m}$$

$$\text{Viscosidad del agua a } 25^\circ\text{C } \eta = 0.000891 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2} * \text{s}$$

Reemplazando datos:

$$N_R = \frac{0.235 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.004 \text{ m} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.000891 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2} * \text{s}} \quad (15)$$

$$N_R = 1055.602$$

Debido a que el número de Reynolds es menor que 2000 el coeficiente de fricción se calcula como:

$$f = 64/N_R \quad (16)$$

$$f = 64/1055.602$$

$$f = 0.06062$$

Reemplazando los datos en la ecuación 13:

$$h_f = \frac{0.06062 * 3.55 \text{ m} * \left(0.235 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 0.004 \text{ m} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \quad (17)$$

$$h_f = 0.151 \text{ m}$$

Reemplazando los datos calculados en la ecuación 9, se obtiene en la ecuación 18, la carga de trabajo de la bomba.

$$H_B = 0.151 \text{ m} + \left[\frac{980665 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + \frac{\left(0.235 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1.60 \text{ m} \right] - \left[\frac{0}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + \frac{0}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + (-1 \text{ m}) \right] \quad (18)$$

$$H_B = 102,7202 \text{ m}$$

Reemplazando datos en la ecuación 7 se halla la potencia teórica:

$$P_{teórica} = 102,7202 \text{ m} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.000053186 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (19)$$

$$P_{teórica} = 53.5951 \text{ kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3} = 53.5951 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 53.5951 \text{ W}$$

Considerando una eficiencia de la bomba del 85% se calcula su potencia real:

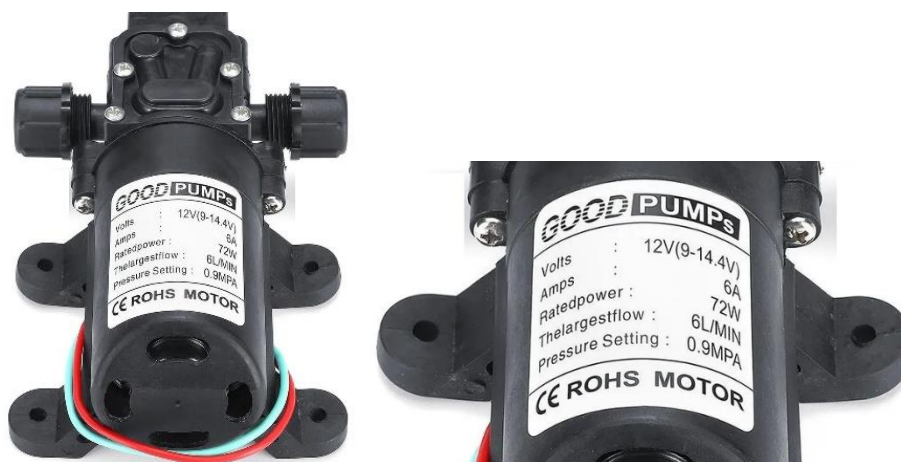
$$P_{real} = \frac{53.5951 W}{0.85} \quad (20)$$

$$P_{real} = 63.053 W$$

La bomba seleccionada para la línea de irrigación según los cálculos realizados es de 72 W, cuyas características se observan en la figura 29.

Figura 29

Bomba de irrigación 72 W



3.3.1.3. Requerimiento Hídrico de la Línea de Irrigación. En base al estudio de (López, 2005) los primeros 4 días se debe regar máximo con 0.5 L de agua por metro cuadrado al día, y los 10 días restantes regar entre 0.9 a 1.5 L por metro cuadrado.

En base a esta información durante la etapa de crecimiento para las seis bandejas con un área total de 2.8 m², se requiere los 5 primeros días regar 8 veces un total de 1.42 L al día, mientras que los restantes regar 4 veces un total de 4.25 L al día.

El diseño del sistema permite que se recicle la solución hidropónica, sin embargo, presenta pérdidas en el peor de los casos de un 10% debido a la nebulización y la absorción del agua por las raíces del forraje. (FAO, 2008)

Considerando estos factores se requiere un total de 4.3 L de agua a almacenar en el tanque, por lo que el tanque reservorio de la figura 30 es el seleccionado ya que su capacidad de 20 L es la más próxima.

Figura 30

Tanque B



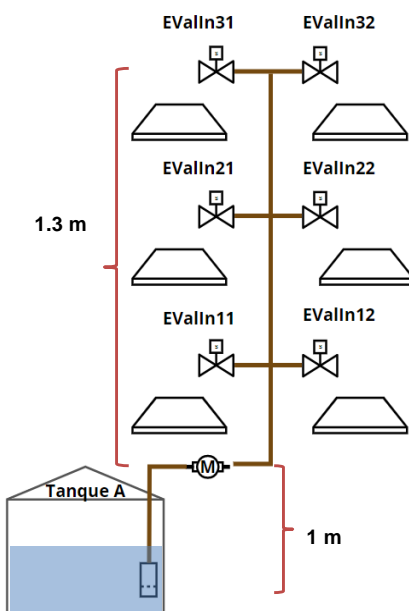
Material: Polietileno de alta densidad (HPDE)
 Capacidad: 5 galones
 Dimensiones: Altura: 376 mm
 Diámetro exterior: 135.5 mm
 Diámetro interior: 149.7 mm

3.3.2. Diseño de la Línea de Inundación

Esta línea está destinada para las etapas de desinfección y pregerminación, donde no se requiere un caudal ni presión específico, ya que simplemente una bomba absorberá agua del tanque A y la impulsará hasta llenar cada bandeja hasta la altura de su rejilla, es decir 3 cm. Su distribución se representa en la siguiente figura 31.

Figura 31

Esquema de línea de inundación



La tubería para esta línea será de PVC de ½” roscable, ya que es la tubería estándar para transporte de agua potable en sistemas sanitarios, sus características se presentan en la figura 32.

Figura 32

Tubería para la línea de inundación

ESPECIFICACIONES

- Unión tipo rosca
- Longitud L = 6m



DN (mm)	DENOMINACIÓN DE LA ROSCA	ESPESOR MÍNIMO (mm)	PRESIÓN DE TRABAJO	
			(MPa)	(PSI)
21,34	1/2	3,73	2,90	420
26,67	3/4	3,91	2,34	340
33,40	1	4,55	2,21	320
48,26	1 1/2	5,08	1,65	239
60,32	2	5,54	1,38	200

Nota. Tomado de (RIVAL, 2018).

El llenado se plantea realizar por niveles empleando electroválvulas para el ingreso del líquido a cada bandeja; su denominación de rosca es la misma de la tubería, es decir ½”, entre otras propiedades que se presentan en la figura 33

Figura 33

Electroválvulas de ingreso



Voltaje: 12V CC

Corriente: 315 mA

Potencia: 4,3 W

Presión: 0.02 - 0.8Mpa

Temperatura media: 0~90 °C / 0~194 °F

Método de conexión: ½ “rosca externa”

Función del filtro: filtro de limpieza extraíble

Modo de funcionamiento: normalmente abierto

Nota. Tomado de (Fankerba, 2021).

3.3.2.1. Requerimiento Hídrico de la Línea de Inundación. El agua requerida para para esta línea se calcula en la ecuación 21, multiplicando el volumen de trabajo de cada bandeja, calculado anteriormente en la ecuación 5, por el número de bandejas a usar.

$$Volumen_{agua\ inundación} = Volumen_{trabajo} * \#\ bandejas \quad (21)$$

$$Volumen_{agua\ inundación} = 14.9\ L * 6$$

$$Volumen_{agua\ inundación} = 89.4\ L \approx 90\ L$$

Este dato determine la capacidad del tanque, siendo el volumen comercial más aproximado de 250 litros, como se presenta en la siguiente figura 34.

Figura 34

Tanque A



**Tanque Cilíndrico
Vertical / Tipo botella**

CAPACIDAD	KIT
250 litros	1/2"
500 litros	1/2"
1100 litros	3/4"
2500 litros	3/4"

USO SUPERFICIAL

Nota. Tomado de (PLASTIGAMA, 2019).

3.3.2.2. Selección de Bomba Línea Inundación. De forma similar al cálculo de la bomba en la línea Irrigación para determinar la potencia real, se deben calcular ciertos datos.

Como indica (INTECH GmbH, 2022), la velocidad mínima para el transporte de agua por tubería es de 0.5 m/s para evitar la sedimentación y ruido, aplicando este dato en la ecuación 22, se encuentra el caudal del líquido a la salida de la electroválvula.

$$Q_{electroválvula} = \frac{\pi * D_{int}^2}{4} * V_2 \quad (22)$$

$$Q_{electroválvula} = \frac{\pi * (0.0166 \text{ m})^2}{4} * 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_{electroválvula} = 0.00007697 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El caudal total Q_T se obtiene aplicando la ecuación 23.

$$Q_T = Q_{electroválvula} * \# \text{ electroválvulas} \quad (23)$$

$$Q_T = 0.00007697 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 6$$

$$Q_T = 0,000461814 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se emplea la ecuación 14 para calcular el número de Reynolds, siendo:

$$N_R = \frac{0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.014 \text{ m} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.000891 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}^2} * \text{s}} \quad (24)$$

$$N_R = 7856,34119$$

Debido a que el número de Reynolds es mayor que 2000 el coeficiente de fricción se obtiene analizando el diagrama de Moody de la figura 35 para lo cual se calcula la rugosidad relativa R_R con la ecuación 25.

$$R_R = \frac{D_{int}}{E} \quad (25)$$

Donde la rugosidad absoluta para la tubería de PVC es $E = 0.0015 \text{ mm}$, reemplazando valores se obtiene:

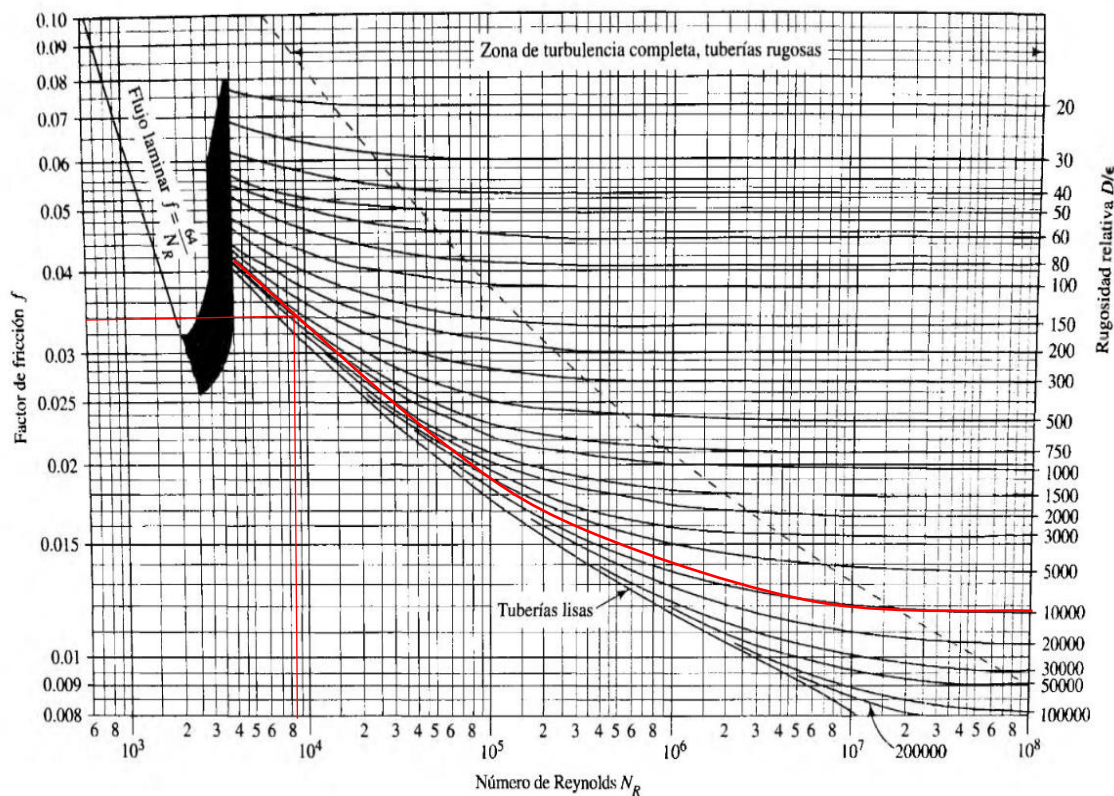
$$R_R = \frac{14 \text{ mm}}{0.0015 \text{ mm}}$$

$$R_R = 9333,33$$

Conociendo el número de Reynolds N_R y la rugosidad relativa R_R , el coeficiente de fricción es $f = 0.0340$.

Figura 35

Diagrama de Moody



Nota. Tomado del Diagrama de Moody (p. 237), por Pao, R. H. F., 1961, como se citó en Mott, Robert L., 2006.

Se calcula la pérdida de carga en el recorrido del agua por la tubería, empleando la ecuación 13, obteniendo:

$$h_f = \frac{0.0340 * 1.3 \text{ m} * \left(0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 0.014 \text{ m} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \quad (26)$$

$$h_f = 0.04023 \text{ m}$$

Conociendo:

Presión en el nivel en la toma de agua en el tanque $P_1 = 0 \text{ kg/cm}^2$

Velocidad de flujo de agua en el tanque $V_1 = 0 \text{ m/s}$

Altura de la toma de agua en tanque respecto a la bomba $Z_1 = -1 \text{ m}$

Presión de salida de la electroválvula $P_2 = 0.1 \text{ MPa} = 100000 \text{ N/m}^2$

Velocidad de salida de la electroválvula $V_2 = 0.5 \text{ m/s}$

Altura máxima de electroválvula respecto a la bomba $Z_2 = 1.30 \text{ m}$

Densidad del agua $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficiente de gravedad $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

Reemplazando los datos en la ecuación 9, se obtiene la altura dinámica H_B de la bomba para el tanque A.

$$H_B = 0.0402 \text{ m} + \left[\frac{100000 \frac{\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{m}^2}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + \frac{(0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1.30 \text{ m} \right] - \left[\frac{0}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + \frac{0}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + (-1 \text{ m}) \right] \quad (27)$$

$$H_B = 12,546 \text{ m}$$

Reemplazando los datos en la ecuación 7, se halla la potencia teórica de la ecuación 28:

$$P_{teórica} = 12,546 \text{ m} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,0004618 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (28)$$

$$P_{teórica} = 56.8413 \text{ kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3} = 56.8413 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 56.8413 \text{ W}$$

Considerando una eficiencia de la bomba del 85% se calcula su potencia real con la ecuación 29.

$$P_{real} = \frac{56.8413 \text{ W}}{0.85} \quad (29)$$

$$P_{real} = 66.872 \text{ W}$$

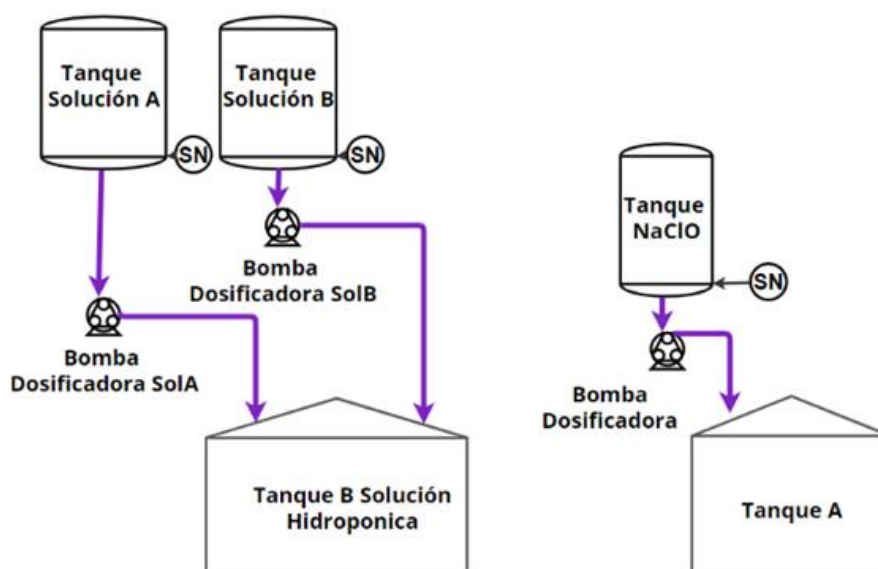
La bomba seleccionada para la línea de drenaje en base a los cálculos realizados es de 72 W, ya que es la más próxima. Las características son las mismas de la empleada para la línea de irrigación de la figura 29.

3.3.3. Diseño de la Línea de Dosificación

El proceso de dosificación se encarga de establecer la cantidad o dosis exacta de una sustancia, en este caso en el agua; el esquema presentado en la figura 36 plantea el diseño de tres tanques con sus respectivas bombas dosificadoras que serán empleados para el suministro de hipoclorito de sodio NaClO, solución A de macronutrientes y solución B de micronutrientes.

Figura 36

Esquema línea de dosificación



3.3.3.1. Selección de Bomba Dosificadora. En la tabla 26 se describen las posibles opciones de bombas dosificadoras a usar en esta línea.

Tabla 26

Alternativas de bombas dosificadoras

Riego	Características
Membrana	<ul style="list-style-type: none"> • Autoaspirante • Caudal regulable • Fácil mantenimiento • Permite trabajo en seco

Riego	Características
Pistón	<ul style="list-style-type: none"> • Trabaja a altas temperaturas • Gran tamaño • Fácil instalación • Permite trabajo en seco
Peristálticas	<ul style="list-style-type: none"> • Autoaspirante • Caudal regulable • Reversible • Permite trabajo en seco
Cavidad progresiva	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Alta capacidad de succión • Silenciosa • Resistente a la abrasión

Nota. Tomado de (Integrador WT, 2022).

En la tabla 27 se presentan los criterios que, según recomienda (Carbotecnia, 2021), deben ser evaluados al momento de seleccionar una bomba dosificadora de químicos.

Tabla 27

Evaluación de criterios para la selección de bombas de dosificación

Caudal regulable > Autoaspirante > Costo > Fácil mantenimiento > Instalación							
Criterio	Instal.	Autoasp.	Costo	Mante.	Caudal reg.	$\sum+1$	Pondera.
Fácil instalación		0	0	0	0	1	0,07
Autoaspirante	1		1	1	0	4	0,27
Costo	1	0		1	0	3	0,20
Fácil mantenimiento	1	0	0		0	2	0,13
Caudal regulable	1	1	1	1		5	0,33
					Suma	15	1,00

En las siguientes tablas se evalúan los pesos específicos para cada tipo de criterio, ordenando las posibles bombas dosificadoras según su importancia.

Tabla 28*Evaluación del criterio: Fácil instalación*

Pistón > Peristáltica > Membrana > Cavity progresiva						
Fácil instalación	Membrana	Pistón	Peristáltica	C. Progresiva	$\sum+1$	Pondera.
Membrana		0	0	1	2	0,20
Pistón	1		1	1	4	0,40
Peristáltica	1	0		1	3	0,30
Cavity progresiva	0	0	0		1	0,10
Suma					10	1,00

Tabla 29*Evaluación del criterio: Autoaspirante*

Peristáltica = Membrana > Pistón > Cavity progresiva						
Autoaspirante	Membrana	Pistón	Peristáltica	C. Progresiva	$\sum+1$	Pondera.
Membrana		1	0,5	1	3,5	0,35
Pistón	0		0	1	2	0,20
Peristáltica	0,5	1		1	3,5	0,35
Cavity progresiva	0	0	0		1	0,10
Suma					10	1,00

Tabla 30*Evaluación del criterio: Costo*

Cavity progresiva > Peristáltica > Membrana = Pistón						
Costo	Membrana	Pistón	Peristáltica	C. Progresiva	$\sum+1$	Pondera.
Membrana		0,5	0	0	1,5	0,15
Pistón	0,5		0	0	1,5	0,15
Peristáltica	0	1		1	3	0,30
Cavity progresiva	1	1	1		4	0,40
Suma					10	1,00

Tabla 31*Evaluación del criterio: Fácil mantenimiento*

Pistón > Cavidad progresiva > Membrana > Peristáltica						
Fácil mantenimiento	Membrana	Pistón	Peristáltica	C. Progresiva	$\sum+1$	Pondera.
Membrana		0	1	0	2	0,20
Pistón	1		1	1	4	0,40
Peristáltica	0	0		0	1	0,10
Cavidad progresiva	1	0	1		3	0,30
Suma					10	1,00

Tabla 32*Evaluación del criterio: Caudal regulable*

Peristáltica = Membrana > Cavidad progresiva > Pistón						
Caudal regulable	Membrana	Pistón	Peristáltica	C. Progresiva	$\sum+1$	Pondera.
Membrana		1	0,5	1	3,5	0,35
Pistón	0		0	0	1	0,10
Peristáltica	0,5	1		1	3,5	0,35
Cavidad progresiva	0	1	0		2	0,20
Suma					10	1,00

En la tabla 33 se analizan las conclusiones y la prioridad de cada alternativa de bomba.

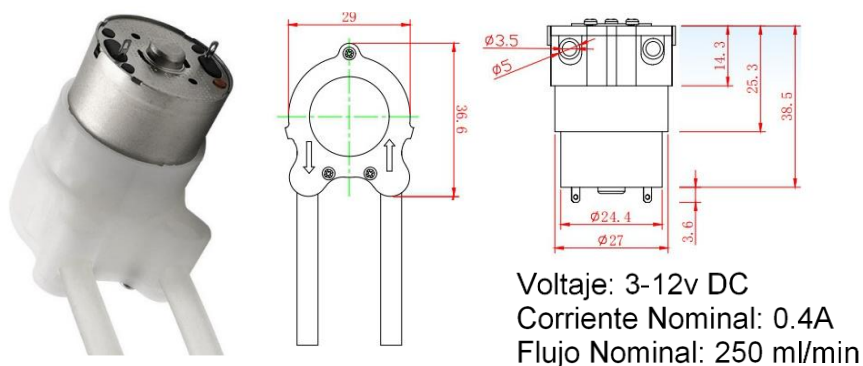
Tabla 33*Conclusiones selección material para estructura*

Conclusiones	Instal.	Autoasp.	Costo	Mante.	Caudal reg.	\sum	Prioridad
Membrana	0,07*0,2	0,27*0,35	0,2*0,15	0,13*0,2	0,33*0,35	0,6	3
Pistón	0,07*0,4	0,27*0,2	0,2*0,15	0,13*0,4	0,33*0,1	0,517	4
Peristáltica	0,07*0,3	0,27*0,35	0,2*0,3	0,13*0,1	0,33*0,35	0,744	1
C. Progresiva	0,07*0,1	0,27*0,1	0,2*0,4	0,13*0,3	0,33*0,2	0,739	2

La bomba peristáltica es la primera opción; durante el llenado del tanque A con 90 L de agua se dosifica 900 ml de hipoclorito de sodio para el proceso de desinfección, la bomba peristáltica de la figura 37 tiene un flujo nominal de 250 ml/min. Para el tanque B con 4.3 L de agua se administra 5.4 ml de solución A y 2.2 ml de solución B.

Figura 37

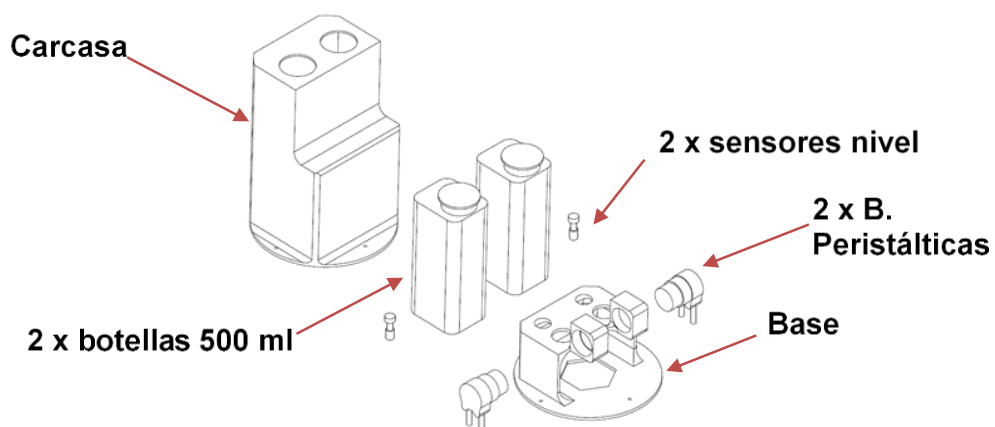
Válvula peristáltica



3.3.3.2. Diseño del Dosificador de Solución Hidropónica. El diseño constará de una carcasa y un base hecha a la medida en impresión 3D de material PLA para alojar a dos botellas de 500 ml, una para almacenar solución A y otra para solución B, con sus respectivas bombas peristálticas y sensores de nivel tipo flotador. El esquema de diseño se presenta en la figura 38 y sus planos en el anexo C.

Figura 38

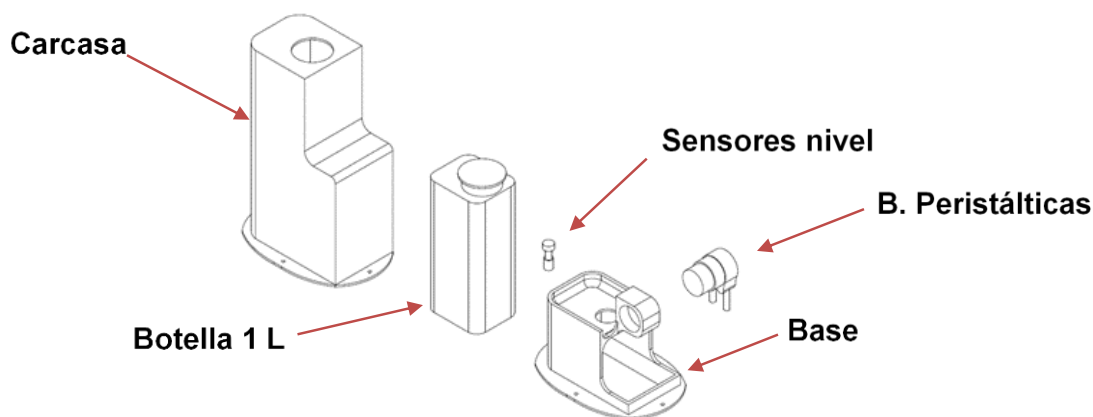
Estructura del dosificador de solución hidropónica



3.3.3.3. Diseño del Dosificador de Hipoclorito de Sodio. Al igual que el diseño anterior, constará de una carcasa y un base en impresión 3D de material PLA para alojar a una botella de 1 L, una bomba peristáltica y un sensor de nivel tipo flotador. El esquema del diseño se presenta en la figura 39 y sus respectivos planos en el anexo C.

Figura 39

Estructura del dosificador de hipoclorito de sodio



3.3.4. Línea de recirculación y drenaje

Cada bandeja se encuentra ligeramente inclinada y dispone de una electroválvula que permite el paso del agua, según sea la etapa de producción, al tanque A, otra al tanque B o al desagüe mediante tubería de PVC. Además, cada tanque cuenta con su respectiva válvula manual de drenaje empleada para realizar su mantenimiento. La selección de las nueve electroválvulas de estas líneas se basó en las recomendaciones de (Direct Industry, 2022):

- Material resistente al medio ambiente
- No requieran presión o caudal mínimo para funcionar, ya que el agua caerá por gravedad.
- Conexión 1/2"

En la figura 40 se presenta la electroválvula seleccionada junto a sus características.

Figura 40

Electroválvulas de recirculación y drenaje

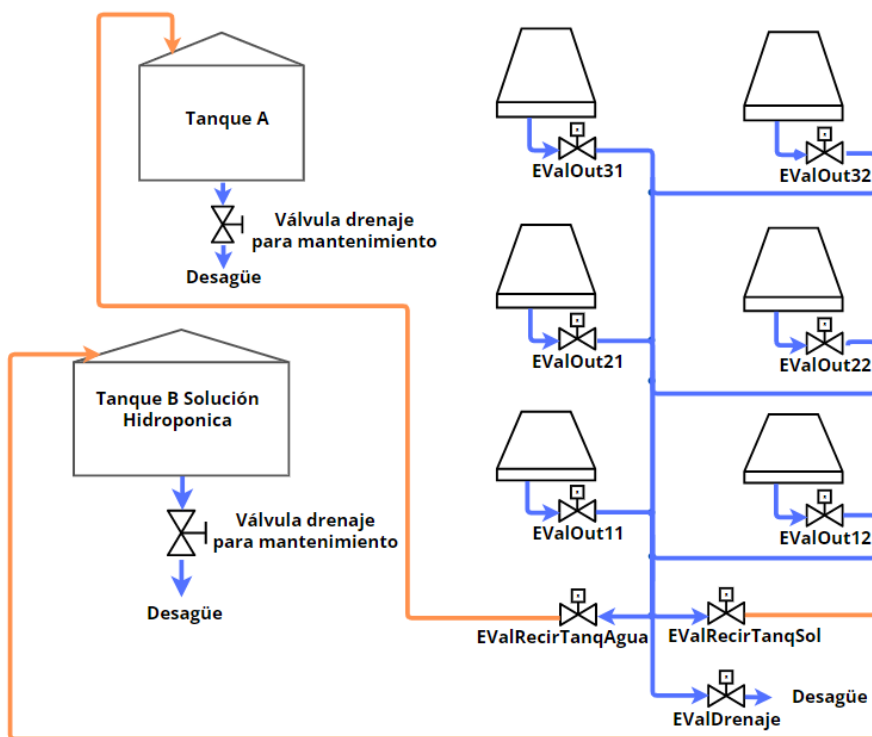


Grado IP: 67
Modo de operación: Normalmente

El esquema del diseño de las líneas se presenta en la figura 41.

Figura 41

Esquema de la línea de recirculación y drenaje

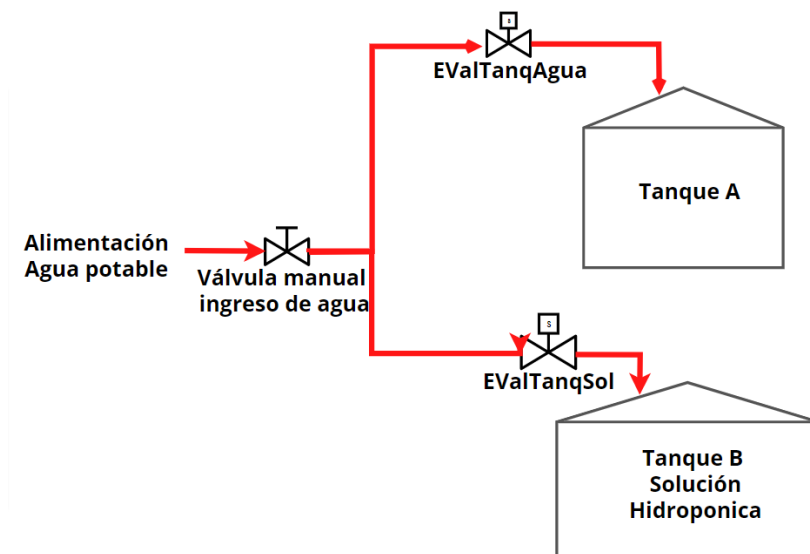


3.3.5. Línea de alimentación

Cada tanque requiere almacenar una cierta cantidad de agua, por lo que se emplean dos electroválvulas para alimentarlos a través de una manguera conectada a la llave de paso, como se indica la figura 42.

Figura 42

Esquema de la línea de alimentación



La selección de las dos electroválvulas de esta línea se basó en:

- Caudal a soportar: 5 - 10 L/min (caudal de salida de llave de paso)
- Presión a soportar: 100 – 500 kPa (presión de salida de llave de paso)
- Conexión ½"
- Resistencia al ambiente

En la figura 43 se presenta las características de la electroválvula seleccionada para esta línea.

Figura 43

Electroválvulas de alimentación



Modo de operación: Normalmente cerrado

Diámetro de entrada y salida: ½"

Flujo: 5 litros/min a 0.2 MPa

Presión de trabajo: 0.02 MPa – 0.8 MPa (3-116 psi)

Voltaje: 110V AC

Corriente: 30 mA

3.4. Diseño del Subsistema Electrónico

3.4.1. Sección de Control

En esta sección se establece la tarjeta a usar y la disposición de los elementos del tablero de control

3.4.1.1. Selección de la tarjeta electrónica. En base a la importancia de las características técnicas obtenidas de la matriz QFD de la tabla 8, para que el proceso productivo sea automático, eficiente, de fácil operación y con capacidad IoT es imprescindible seleccionar la mejor tarjeta electrónica que permita cumplir estos parámetros, a continuación, se describen las posibles alternativas:

Alternativa 1. Arduino MKR 1010. El Arduino de la figura 44, posee un microprocesador SAMD21 Cortex®-M0 + 32bit low power ARM MCU alimentado con 3.3 V por un puerto micro USB, capacidad de memoria de 448 KB ROM, 520KB SRAM, 2MB Flash. No posee sistema operativo, usa Arduino como IDE de programación, cuenta con 8 pines GPIO y 8 analógicos.

Conectividad Bluetooth – WiFi Nina W102 uBlox module y comunicación UART, I2C y SPI. (Arduino, 2022)

Figura 44

Arduino MKR 1010



Nota. Tomado de *Arduino MKR 1010*, por (Electrónica Embajadores, 2018).

Alternativa 2. Raspberry Pi 4. La tarjeta de la figura 45, posee un procesador Broadcom BCM2711, cuatro núcleos Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit a 1.5GHz, alimentado con 3.3 V por un puerto USB-C, capacidad de memoria de 2GB, 4GB o 8GB según el modelo, LPDDR4-3200 SDRAM con capacidad de memoria externa SD para almacenar el sistema operativo Raspberry Pi OS, llamado Raspbian.

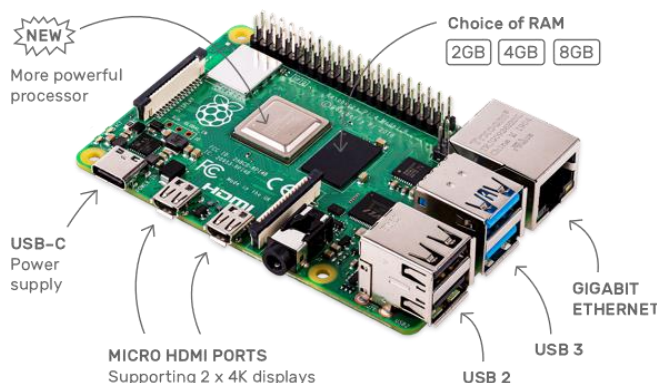
Programación en variedad de software, como Python, Node-Red, etc. Posee puertos de conexión: 2 USB 3.0, 2 USB 2.0 y 2 micro-HDMI.

Cuenta con 40 pines de los cuales 28 son GPIO, conectividad 2.4 GHz y 5.0 GHz IEEE 802.11ac Wireless, Bluetooth 5.0, comunicación UART, I2C y SPI.

(Raspberry Pi, 2022)

Figura 45

Raspberry Pi 4

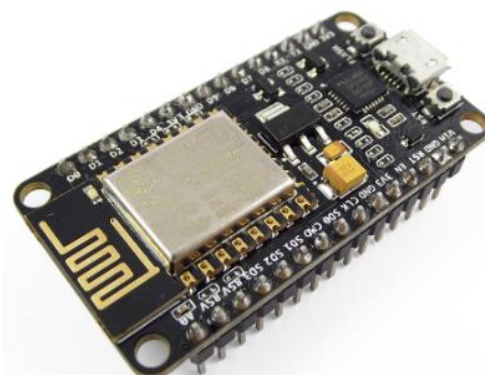


Nota. Tomado de *Raspberry 4*, por (Raspberry Pi, 2022)

Alternativa 3. NodeMCU ESP8266. La tarjeta de la figura 46, posee un microprocesador Tensilica 32-bit RISC CPU Xtensa LX106 alimentado con 3.3 V por un puerto USB-C, capacidad de memoria de 4MB y 64 KB SRAM.

No posee sistema operativo, su programación puede realizarse en Arduino IDE, Luam, MycroPython y C++.

Cuenta con 16 pines GPIO y un pin analógico, conectividad WiFi 802.11 b/g/n y comunicación UART, I2C y SPI. (Naylamp Mechatronics, 2021)

Figura 46*NodeMCU ESP8266*

Nota. Tomado de *NodeMCU ESP8266*, por (Naylamp Mechatronics, 2021)

La tabla 34 presenta los criterios de evaluación para analizarlos mediante el método ordinal corregido de criterios ponderados colocando en orden las preferencias de cada tarjeta según sus características.

Tabla 34

Evaluación de criterios para la selección de tarjetas electrónicas

Número puertos GPIO > Interfaz Gráfica > Capacidad > Costo						
Criterio	Puertos	Interfaz Gráfica	Capacidad	Costo	$\sum +1$	Pondera.
Número puertos GPIO		1	1	1	4	0,40
Interfaz Gráfica	0		1	1	3	0,30
Capacidad	0	0		1	2	0,20
Costo	0	0	0		1	0,10
Suma					10	1,00

Considerando las sugerencias de (Hacedores, 2014) al momento de seleccionar tarjetas de desarrollo, se evalúan los pesos específicos para cada criterio en las siguientes tablas.

Tabla 35*Evaluación del criterio: Número puertos GPIO*

Raspberry Pi 4 > NodeMCU > Arduino MKR 1010 > ESP8266						
Número de puertos	NodeMCU	ESP8266	RaspberryPi 4	MKR 1010	$\sum+1$	Pondera.
NodeMCU		1	0	1	3	0,30
ESP8266	0		0	0	1	0,10
Raspberry Pi 4	1	1		1	4	0,40
Arduino MKR 1010	0	1	0		2	0,20
Suma					10	1,00

Tabla 36*Evaluación del criterio: Interfaz Gráfica*

Raspberry Pi 4 = Arduino MKR 1010 > NodeMCU = ESP8266						
Interfaz Gráfica	NodeMCU	ESP8266	Raspberry Pi 4	MKR 1010	$\sum+1$	Pondera.
NodeMCU		0,5	0	0	1,5	0,15
ESP8266	0,5		0	0	1,5	0,15
Raspberry Pi 4	1	1		0,5	3,5	0,35
Arduino MKR 1010	1	1	0,5		3,5	0,35
Suma					10	1,00

Tabla 37*Evaluación del criterio: Capacidad*

Raspberry Pi 4 > NodeMCU > Arduino MKR 1010 > ESP8266						
Capacidad	NodeMCU	ESP8266	Raspberry Pi 4	MKR 1010	$\sum+1$	Pondera.
NodeMCU		1	0	1	3	0,30
ESP8266	0		0	0	1	0,10
Raspberry Pi 4	1	1		1	4	0,40
Arduino MKR 1010	0	1	0		2	0,20
Suma					10	1,00

Tabla 38*Evaluación del criterio: Costo*

ESP8266 > NodeMCU > Arduino MKR 1010 > Raspberry Pi 4						
Costo	NodeMCU	ESP8266	Raspberry Pi 4	MKR 1010	$\sum+1$	Pondera.
NodeMCU		0	1	1	3	0,30
ESP8266	1		1	1	4	0,40
Raspberry Pi 4	0	0		0	1	0,10
Arduino MKR 1010	0	0	1		2	0,20
				Suma	10	1,00

En la tabla 39 se determinan las conclusiones sobre la prioridad de cada alternativa de tarjeta de control.

Tabla 39*Conclusiones selección de tarjeta electrónica*

Conclusiones	Duración	R. frecuencia	Costo	Consumo	\sum	Prioridad
NodeMCU	0,4*0,3	0.3*0,15	0.2*0,3	0.1*0,3	0,255	2
Esp8266	0,4*0,1	0.3*0,15	0.2*0,1	0.1*0,4	0,145	4
Raspberry PI	0,4*0,4	0.3*0,35	0.2*0,4	0.1*0,1	0,355	1
Arduino	0,4*0,2	0.3*0,35	0.2*0,2	0.1*0,2	0,245	3

La mejor alternativa de solución es la Raspberry Pi gracias al número de puertos que dispone y su interfaz gráfica ya son una gran ayuda para proyectos de mayor complejidad.

3.4.1.2. Selección del sensor de temperatura y humedad. En la tabla 40 se establecen las principales características de las alternativas de sensores disponibles en el mercado que miden tanto humedad y temperatura ambiental, tomando en cuenta el análisis comparativo realizado por (KandRSmith.org, 2017).

Tabla 40*Alternativas del sensor de temperatura y humedad*

	SHT10	DHT11	DHT22
Repetibilidad	±0.1 % HR	±1 % HR	±0.3 % HR
	±0.1 °C	±1 °C	±0.2 °C
Rango de medición	0 a 100% HR	20 a 80% HR	0 a 100% HR
	-10 a 80 °C	-40 a 80 °C	-40 a 80 °C
Exactitud	±4.5% HR	±5% HR	±2% HR
	±0.5 °C	±2 °C	±0.5 °C
Costo promedio	40 USD	3.5 USD	7 USD
Compatible con Node-RED	No	Sí	Sí

Nota. Tomado de *varios datasheet*, por (Adafruit, 2021; Sparkfun, 2008)

A cada criterio de la tabla 40 se evalúan sus pesos específicos, como se indica en la tabla 41.

Tabla 41*Evaluación del peso específico de cada criterio*

Repetibilidad = Exactitud > Compatible > Rango de Medición > Costo							
Criterio	Repe.	R. Medición	Exactitud	Costo	Compatible	$\sum+1$	Pondera.
Repetibilidad		1	0,5	1	1	4,5	0,30
R. Medición	0		0	1	0	2	0,13
Exactitud	0,5	1		1	1	4,5	0,30
Costo	0	0	0		0	1	0,07
Compatible	0	1	0	1		3	0,20
Suma						15	1

En las siguientes tablas se evalúan las ponderaciones de cada alternativa en base a cada criterio.

Tabla 42*Evaluación del criterio: Repetibilidad*

SHT10 > DHT22 > DHT11					
Repetibilidad	SHT10	DHT11	DHT22	$\Sigma+1$	Pondera.
SHT10		1	1	3	0,500
DHT11	0		0	1	0,167
DHT22	0	1		2	0,333
			Suma	6	1,00

Tabla 43*Evaluación del criterio: Rango de medición*

DHT22 > SHT10 > DHT11					
Rango de Medición	SHT10	DHT11	DHT22	$\Sigma+1$	Pondera.
SHT10		1	0	2	0,333
DHT11	0		0	1	0,167
DHT22	1	1		3	0,500
			Suma	6	1,00

Tabla 44*Evaluación del criterio: Exactitud*

DHT22 > SHT10 > DHT11					
Exactitud	SHT10	DHT11	DHT22	$\Sigma+1$	Pondera.
SHT10		1	0	2	0,333
DHT11	0		0	1	0,167
DHT22	1	1		3	0,500
			Suma	6	1,00

Tabla 45*Evaluación del criterio: Costo promedio*

DHT11 > DHT22 > SHT10					
Costo promedio	SHT10	DHT11	DHT22	$\Sigma+1$	Pondera.
SHT10		0	0	1	0,167
DHT11	1		1	3	0,500
DHT22	1	0		2	0,333
			Suma	6	1,00

Tabla 46*Evaluación del criterio: Compatible con Node-RED*

DHT11 = DHT22 > SHT10					
Compatibilidad Node-RED	SHT10	DHT11	DHT22	$\Sigma+1$	Pondera.
SHT10		0	0	1	0,167
DHT11	1		0,5	2,5	0,417
DHT22	1	0,5		2,5	0,417
			Suma	6	1,00

Las conclusiones en la tabla 47 determinan que la mejor solución para el sensor de humedad y temperatura es el DHT22 de la figura 47; ya que a más de tener compatibilidad con Node-RED, tiene exactitud, buena repetibilidad, bajo costo y amplio rango de medición.

Tabla 47*Conclusiones selección de sensor temperatura humedad*

Conclus.	Repeti.	R. Medición	Exacto	Costo	Compati.	Σ	Prioridad
SHT10	0,5*0.3	0.33*0.13	0.33*0.3	0.167*0.067	0,167*0.2	0,339	2
DHT11	0,167*0.3	0.167*0.13	0.167*0.3	0.5*0.067	0,417*0.2	0,239	3
DHT22	0,33*0.3	0.5*0.13	0.5*0.3	0.33*0.067	0,417*0.2	0,422	1

Figura 47*Sensor DHT22*

3.4.1.3. Disposición del tablero de control. Basados en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN-ISO 12100 que determina los principios generales para el diseño de máquinas seguras, se dispone del tablero de control para la prevención de una puesta en marcha o paro de emergencia intempestiva.

El tablero de la figura 48, almacena en su interior los componentes electrónicos y en su exterior el sistema de mando que consta de un selector de energización, pulsadores para ejecutar o reiniciar el proceso de producción y un botón tipo hongo de paro de emergencia. Se dispone de tres señales tipo luz piloto, de color naranja que señala si se encuentra energizada la máquina, verde si el programa se encuentra ejecutándose y rojo si se activa el paro de emergencia.

Figura 48*Disposición del tablero de control*

Es necesario que las tarjetas de control se apaguen adecuadamente por lo que se incorpora un botón para realizar esta acción, el cual al igual que el botón reset, debe primero estar pulsado el paro de emergencia y mantenerlo presionado durante 5 segundos.

3.4.2. Sección de Iluminación

Existe diferentes tipos de iluminación para cultivar plantas con luz artificial siendo necesario seleccionarlos según el tipo de planta; por lo que a continuación se describe las posibles opciones para aplicar en el sistema de producción de FVH.

Tabla 48

Alternativas de iluminación

Iluminación	Características
Bombillas LED CFL (fluorescente compacta)	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo consumo energético • Amigables con el ambiente • Rango de frecuencia de colores
Bombillas de vapor de sodio a alta presión (HPS)	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo consumo energético • Larga duración • Uso en alta tensión • Bajo costo
Fluorescentes	<ul style="list-style-type: none"> • Rango de frecuencia de colores • Luz uniforme • Tonos verdaderos • Frío al tacto
Tiras o paneles LED	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo consumo energético • Larga duración • Amigables con el ambiente • Rango de frecuencia de colores

Nota. Recuperado de *Cómo elegir luces para cultivo de interior*, por (Casanovas, 2022).

Usando el método de criterios ponderados basados en los criterios de la tabla 49, se selecciona el tipo de sistema lumínico para cultivo.

Tabla 49*Evaluación de criterios para iluminación*

Duración > Costo > Longitud de onda > Eficiencia > Amigable con el ambiente							
Criterio	Duración	L. de onda	Costo	Eficiencia	A. ambiente	$\sum +1$	Pondera.
Duración		1	1	1	1	5	0,33
L. de onda	0		0	1	1	3	0,20
Costo	0	1		1	1	4	0,27
Eficiencia	0	0	0		1	2	0,13
A. ambiente	0	0	0	0		1	0,07
						Suma	15 1,00

En las siguientes tablas se evalúa cada alternativa según cada criterio y se determina sus ponderaciones.

Tabla 50*Evaluación del criterio: Duración*

LED > HPS > Fluorescente > CFL						
Duración	CFL	HPS	Fluorescente	LED	$\sum +1$	Pondera.
CFL		0	0	0	1	0,10
HPS	1		1	0	3	0,30
Fluorescente	1	0		0	2	0,20
LED	1	1	1		4	0,40
					Suma	10 1,00

Tabla 51*Evaluación del criterio: Longitud de onda*

LED = Fluorescente = CFL > HPS						
Longitud de onda	CFL	HPS	Fluorescente	LED	$\sum +1$	Pondera.
CFL		1	0,5	0,5	3	0,30
HPS	0		0	0	1	0,10
Fluorescente	0,5	1		0,5	3	0,30
LED	0,5	1	0,5		3	0,30
					Suma	10 1,00

Tabla 52*Evaluación del criterio: Costo*

LED > Fluorescente > HPS > CFL						
Costo	CFL	HPS	Fluorescente	LED	$\sum +1$	Pondera.
CFL		0	0	0	1	0,10
HPS	1		0	0	2	0,20
Fluorescente	1	1		0	3	0,30
LED	1	1	1		4	0,40
				Suma	10	1,00

Tabla 53*Evaluación del criterio: Eficiencia*

LED > Fluorescente > CFL > HPS						
Eficiencia	CFL	HPS	Fluorescente	LED	$\sum +1$	Pondera.
CFL		1	0	0	2	0,20
HPS	0		0	0	1	0,10
Fluorescente	1	1		0	3	0,30
LED	1	1	1		4	0,40
				Suma	10	1,00

Tabla 54*Evaluación del criterio: Amigable con el ambiente*

LED = CFL > Fluorescente > HPS						
A. Ambiente	CFL	HPS	Fluorescente	LED	$\sum +1$	Pondera.
CFL		1	1	0,5	3,5	0,35
HPS	0		0	0	1	0,10
Fluorescente	0	1		0	2	0,20
LED	0,5	1	1		3,5	0,35
				Suma	10	1,00

En base a la evaluación del peso específico de cada criterio se establece la tabla

55 de conclusiones.

Tabla 55*Conclusiones selección de iluminación*

Conclusiones	Duración	L. onda	Costo	Consumo	A. Ambiente	Σ	Prioridad
CFL	0,33*0,1	0.2*0,3	0.27*0,1	0.13*0,2	0.07*0,35	0,17	4
HPS	0,33*0,3	0.2*0,1	0.27*0,2	0.13*0,1	0.07*0,1	0,19	2
Fluorescente	0,33*0,2	0.2*0,3	0.27*0,3	0.13*0,3	0.07*0,2	0,26	3
LED	0,33*0,4	0.2*0,3	0.27*0,4	0.13*0,4	0.07*0,35	0,3765	1

La mejor alternativa de solución son las luces LED para el sistema de iluminación ya que su costo, duración y el rango de onda de luz que el FVH necesita para su crecimiento es el adecuado comparado con los otros métodos.

La figura 49 presenta las características de las luces LED seleccionadas, marca OxyLED, que incluye un control manual que será automatizado mediante relés para cambiar el tipo de luz, prenderlas o apagarlas.

Figura 49*Tira LED para iluminación*

Fomenta la floración, la fructificación y la producción de semillas.



Favorece el crecimiento y frondosidad de las plantas, ideal para germinación.



Ideal para plantas de hojas verdes.

Potencia: 15W

Voltaje: 12V DC

Proporción (rojo: azul): 81:27

Longitud de onda luz roja: 650-660nm

Longitud de onda luz azul: 450-460nm

Largo: 180 cm

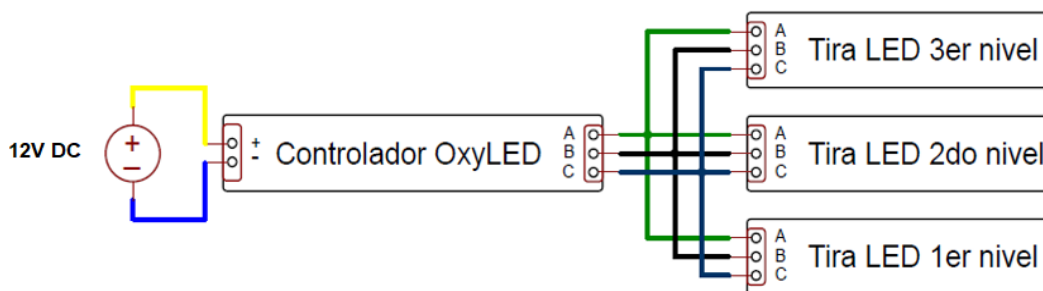
Control integrado



En la figura 50 se encuentra el esquema de conexión de tiras LED para cada nivel del estante.

Figura 50

Conexión tira LED para iluminación

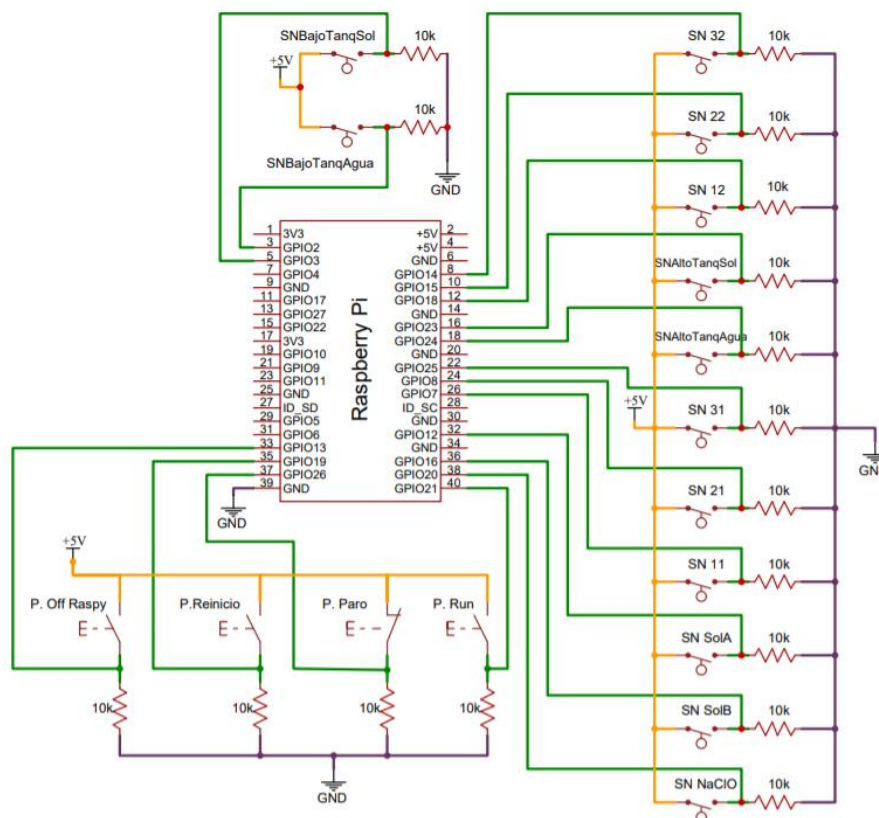


3.4.3. Sección de Entradas

En la figura 51 se encuentra el esquema eléctrico de las 17 entradas, 4 son de los pulsadores del tablero de control y 13 de sensores distribuidos para registrar el nivel de tanques, recipientes de dosificación y bandejas.

Figura 51

Sección de entradas



Para leer el estado lógico en cada pin de entrada es necesario aplicar resistencias pull up o pull down, para evitar falsos estados producidos por ruidos eléctricos, generalmente el valor de la resistencia es de 10 kΩ ya que se debe usar resistencias 10 veces menores a la impedancia del pin digital de la Raspberry que comúnmente es de 1MΩ.

La configuración adoptada es pull up; es decir, en estado de reposo la caída de tensión será de 5V obteniendo una lectura de entrada alta; mientras que, al pulsar cerrando el circuito, se obtiene 0 V con lectura de entrada baja. (Diosdado, 2014)

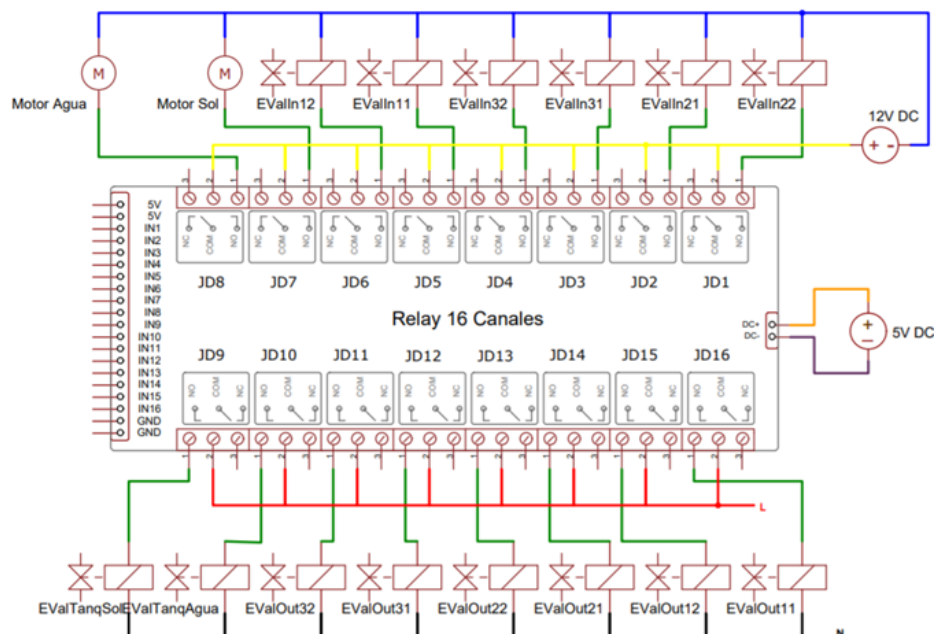
3.4.4. Sección de Salidas

Esta sección está compuesta por dos módulos relé que permiten accionar, mediante un circuito de pequeña potencia, actuadores de diferentes voltajes de trabajo.

En la figura 52 se encuentran conectados los módulos al relé A, por un lado, las bombas de agua y electroválvulas de entrada que funcionan con 12 V DC, y por otro las electroválvulas de salida y alimentación de agua a tanques con voltaje de 110V AC.

Figura 52

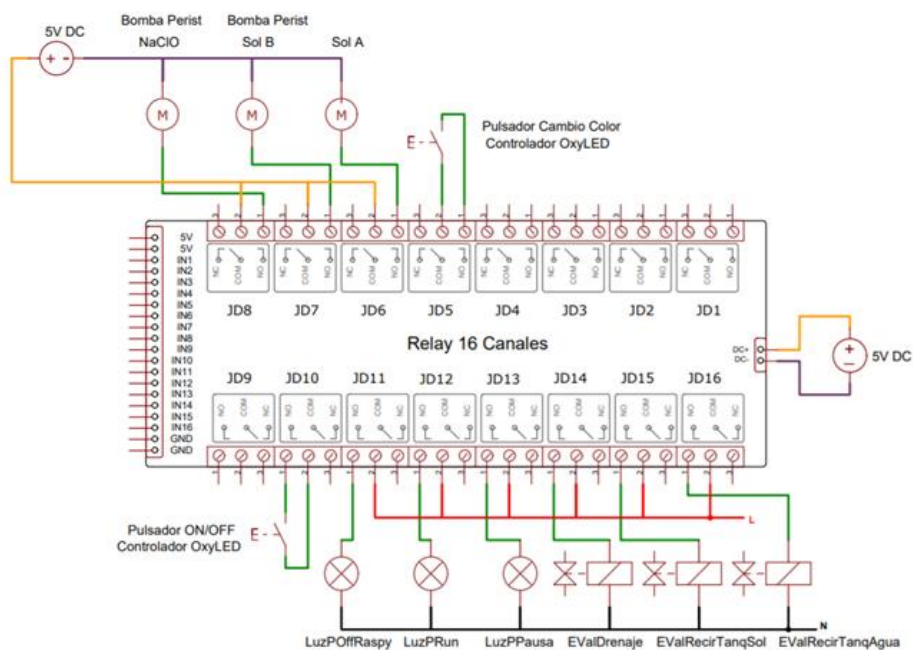
Circuito de salidas módulo relé A



Al relé B de la figura 53 se conecta las válvulas peristálticas de 5V DC, las electroválvulas de recirculación de 110V, las luces piloto del tablero y los pulsadores del control OxyLED para encendido-apagado y cambio de color de las tiras LED.

Figura 53

Circuito de salidas módulo relé B



3.4.5. Sección de protección eléctrica

Como protección eléctrica se usa un interruptor termomagnético que será dimensionado según la corriente que consumen los dispositivos de la máquina, cuyas propiedades se han especificado anteriormente; en la tabla 56 se presenta la potencia calculada que debe ser suministrada por la fuente de poder modelo ATX con capacidad de 600 W.

Tabla 56

Potencia suministrada por la fuente de poder

Lista de elementos	Cantidad	Potencia unitaria (W)	Potencia (W)
Raspberry Pi	2	6.4	12.8
Electroválvula de entrada	6	6.5	39

Lista de elementos	Cantidad	Potencia unitaria (W)	Potencia (W)
Tira LED	3	15	45
Válvula peristáltica	3	0.5	1.5
Bomba de tanque	2	72	144
		Suma	242.3

Mientras que en la tabla 57 se calcula la corriente total que consume la máquina.

Tabla 57

Corriente de la máquina

Lista de elementos	#	P Unitaria W	Potencia W	Voltaje V	Corriente A
Fuente de poder	1	242.3+1	243.3	110	2.21
Electroválvula de alimentación	2	3.3	6.6	110	0.06
Electroválvula salida, drenaje y recirculación	9	22	198	110	1.8
Luces piloto	4	2.2	8.8	110	0.08
				Suma	4.152

En base a la corriente de 4.152 amperios se selecciona el valor de un interruptor termomagnético más cercano, siendo 6 A. En la figura 54 se muestra el interruptor automático de dos polos marca SIEMENS a implementar.

Figura 54

Interruptor termomagnético 6 A



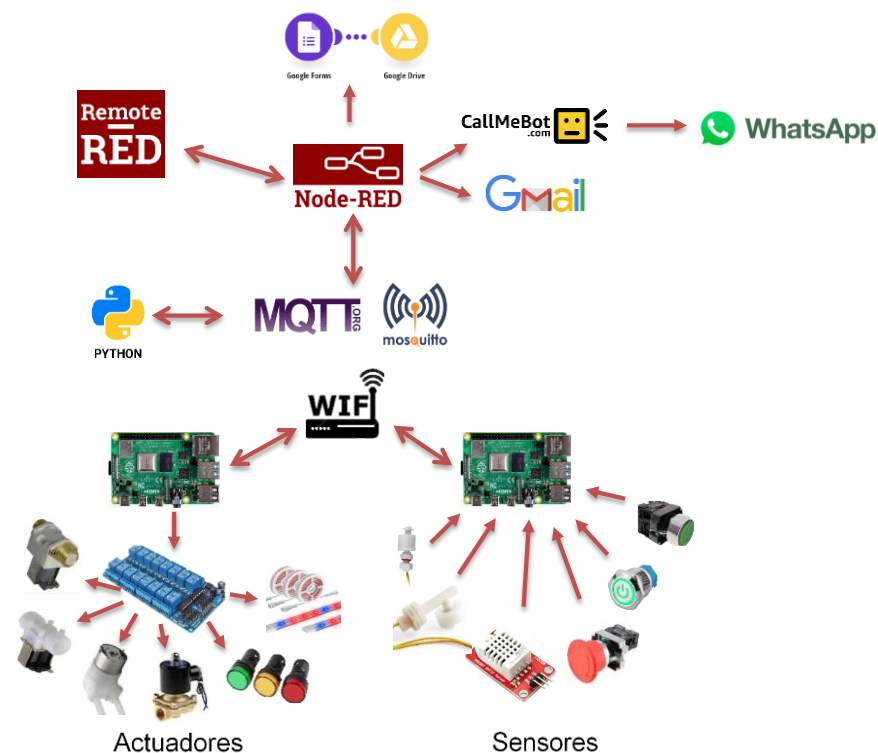
3.5. Diseño del Subsistema de Control e IoT

En la figura 55 se presenta la estructura IoT; la primera capa donde se encuentran las “cosas” o dispositivos, es la de percepción; consta de dos Raspberry Pi donde una se encarga de activar actuadores en base a relés y otra adquiere datos obtenidos mediante sensores.

En la segunda capa de punto de acceso, se emplea un router que facilitará la comunicación de las Raspberry Pi a través de un broker encargado de dirigir los mensajes utilizando el protocolo de tipo publicación–suscripción MQTT, que es la solución estándar en la industria IoT. El bróker empleado localmente será Mosquitto debido a que es ligero y open source.

Figura 55

Estructura IoT implementada



El proceso productivo es programado en Python y controlado desde tablero, sin embargo, se emplea Node RED para gestionar y procesar los datos en tiempo real.

Gracias a su sencillez, esta herramienta de programación gráfica por nodos permite desarrollar la capa aplicaciones. En base a ella se almacenan datos ambientales y de producción tanto de forma local como en la nube.

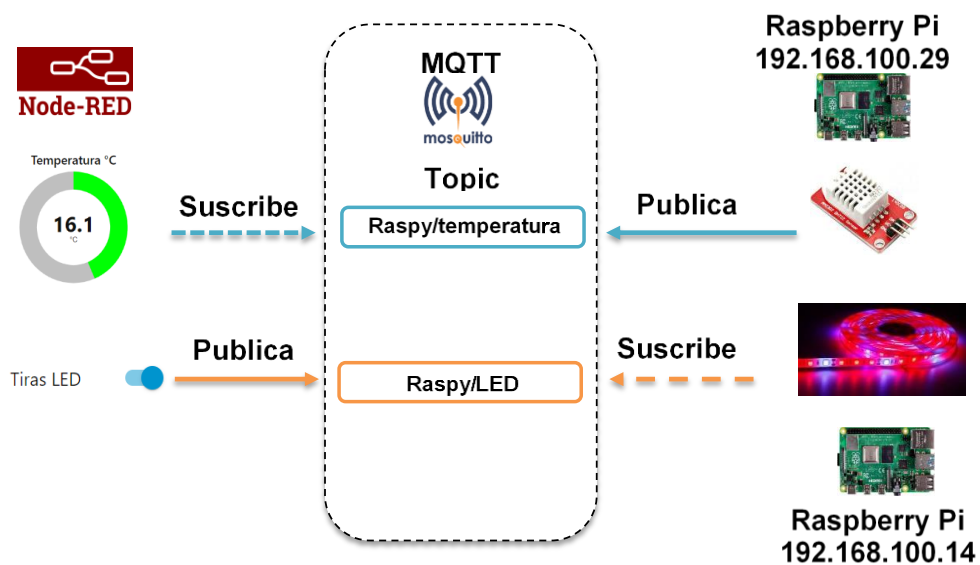
El dashboard desarrollado consiste en un control manual e históricos que a más de ser accesibles de forma local son accesible de forma remota desde cualquier parte del mundo mediante la aplicación "Remote RED" y cuenta con alertas automáticas vía WhatsApp y correo electrónico.

3.5.1. Protocolo MQTT Mosquitto Open Source

Para manejar el protocolo MQTT entre las dos Raspberry Pi, se usa el software Mosquitto, en una dirección IP 192.168.100.14 se establece el broker (servidor) que se encarga de administrar los mensajes; cada mensaje se encuentra compuesto por un "topic" que en sí es el tema a donde se suscribe un cliente para poder recibirlos. En la figura 56 se representa de forma gráfica cómo trabaja el protocolo MQTT y Mosquitto.

Figura 56

Esquema de comunicación MQTT



A través de la terminal de comandos se instala y configura el software, como lo realiza paso a paso el tutorial de (Vazquez Electronics, 2021).

3.5.2. Algoritmo de Control Python

El proceso de producción se encuentra programado y ejecutado en Python de la Raspberry con dirección IP 192.168.100.29 y junto con su programación en Node-RED controla los actuadores conectados a la Raspberry con dirección IP 192.168.100.14. El algoritmo de producción se presenta brevemente en la figura 57.

Figura 57

Algoritmo del proceso productivo

Desinfección	<ul style="list-style-type: none"> • 900 ml NaClO dosificados durante el llenado del tanque A con 90 litros de agua. • Las electroválvulas de salida NC permanecen cerradas. • Motor absorbe y bombea sustancia. • Se inunda las bandejas por niveles. • Las electroválvulas de entrada NA se cierran al activarse el sensor nivel. • Al inundarse todas las bandejas se apaga motor y espera 5 minutos. • Se activa electroválvula de dreña NC. • Se dreña el fluido piso por piso activando secuencialmente las electroválvulas NC de salida.
Pregerminación	<ul style="list-style-type: none"> • Se llena el tanque A 90 litros de agua. • Las electroválvulas de salida NC permanecen cerradas. • Motor absorbe y bombea agua. • Se inunda las bandejas por niveles. • Las electroválvulas de entrada NA se cierran al activarse el sensor nivel. • Al inundarse todas las bandejas se apaga motor y espera 12 horas. • Se activa electroválvula de recirculación NC • Se dreña el fluido piso por piso activando secuencialmente las electroválvulas NC de salida. • Seorean 1 hora las semillas y luego se repite una vez más el ciclo con la diferencia de que al final se desecha el agua por la electroválvula de drenaje.
Germinación y crecimiento	<p>Irrigación con agua cada 6 horas por 2 días.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se llena el tanque B con 13.4 L agua. • Se abren las electroválvulas de salida y drenaje. • Se activa la bomba de irrigación durante 2.4 min • Se espera 5 min para escurrimiento y se cierra las electroválvulas de salida. <p>Irrigación con solución hidropónica cada 4 horas por 5 días.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se llena el tanque B con 13.4 L agua. • Se dosifica 16.75 ml de solución A y 6.7 ml de solución B. • Se abren las electroválvulas de salida y recirculación del tanque B. • Se activa la bomba de irrigación durante 2.4 min • Se espera 5 min para escurrimiento y se cierra las electroválvulas. <p>Irrigación con solución hidropónica cada 6 horas por 5 días.</p> <p>Irrigación con agua cada 6 horas por 2 días</p>

El código de programación y un diagrama de flujo para una mejor comprensión se encuentra en el anexo D y E, respectivamente.

3.5.3. Programación Node-RED

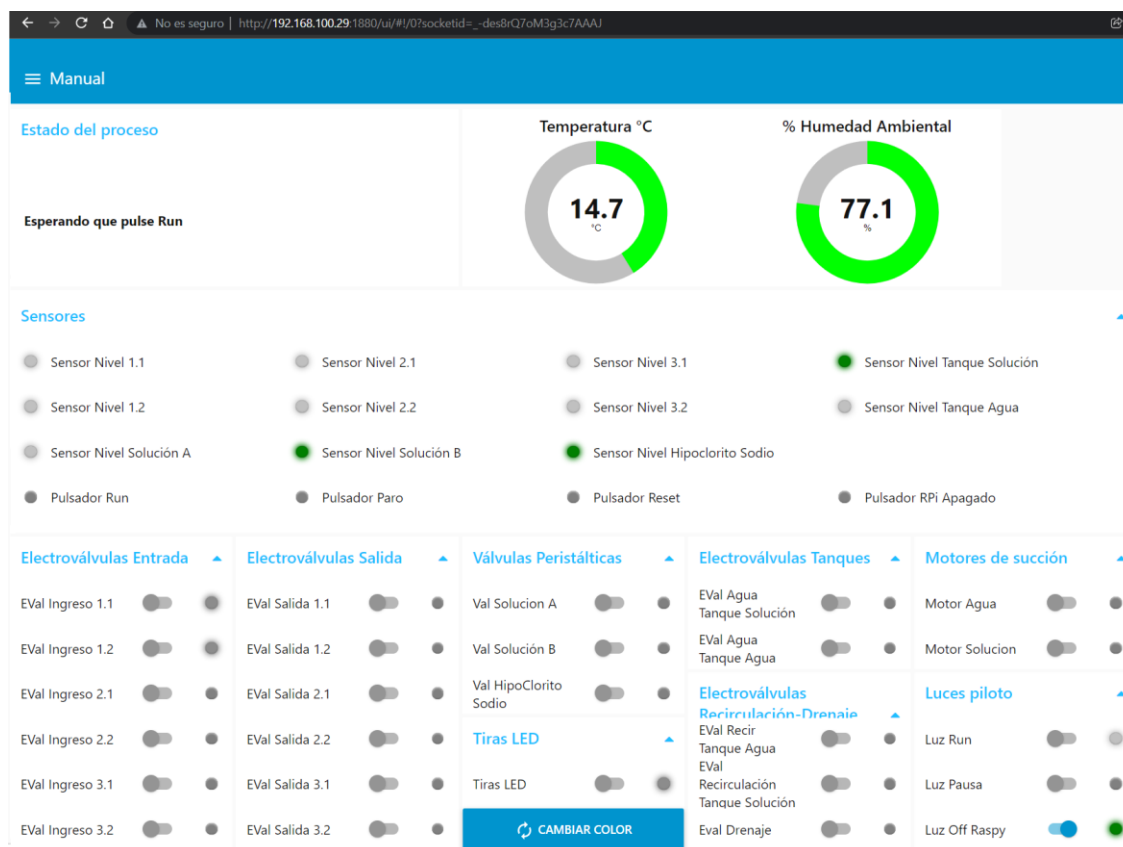
Node-RED presenta dos partes, el área de flujos donde se programa a través de nodos y el dashboard que presenta la interfaz gráfica de la ejecución de dichos flujos

3.5.3.1. Programación Node-RED Raspberry Pi IP 192.168.100.29. La programación de esta tarjeta en Node-RED tiene la finalidad de presentar tres dashboard:

- El dashboard de la figura 58 permite controlar de forma manual cada actuador de la máquina, muestra un panel de estado de sensores y el estado del proceso en el caso de que la máquina se encuentre en producción

Figura 58

Dashboard manual



- El dashboard de la figura 59 presenta los datos históricos de la máquina que son almacenados en la nube y de forma simultánea en el sistema de archivos de la tarjeta Raspberry Pi, por lo que a pesar de apagarla se mantienen en su memoria sin borrarse. Presenta los archivos diarios de los datos de temperatura y porcentaje de humedad relativa, permitiendo graficarlos; mientras que, en la parte inferior se registra el número de ciclos productivos completados, el gasto en litros de agua, solución A de macronutrientes, solución B de micronutrientes e hipoclorito de sodio.

Figura 59

Dashboard históricos



Los flujos programados se encuentran en el anexo F2.

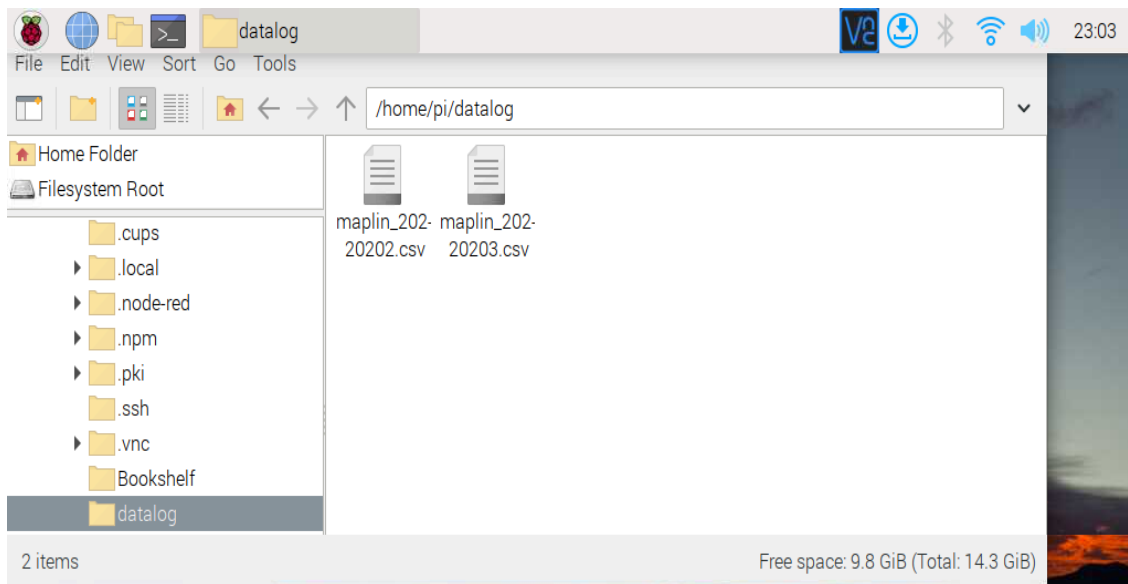
3.5.3.2. Programación Node-RED Raspberry Pi IP 192.168.100.14. Esta tarjeta no consta de dashboard y su flujo le permite suscribirse a los tópicos correspondientes a actuadores. Los flujos programados se encuentran en el anexo F1.

3.5.4. Almacenamiento de Datos Local

Los datos del dashboard históricos de la figura 59 se programaron para que se guarden en un archivo “.csv” generado cada día en la dirección /home/pi/datalog, como se presenta en la figura 60.

Figura 60

Archivos de históricos almacenados localmente



3.5.5. Almacenamiento de Datos en la Nube

A más de almacenar los datos de forma local, se programó para que envíen los datos de los históricos de humedad y temperatura a un formulario realizado en Google Forms, figura 61, y almacenados en un archivo de Google Sheets en la nube Google Drive como se presenta en la figura 62.

Figura 61

Formulario para adquirir mediciones de humedad y temperatura

The screenshot shows a Google Forms page titled 'Formulario sin título'. The form has three main sections: 'Mediciones Humedad Temperatura' (with a description field), 'Temperatura' (with a short-answer text field), and 'Humedad' (with a short-answer text field). The top navigation bar shows 'Preguntas', 'Respuestas' (842), and 'Configuración'.

Figura 62

Datos de humedad y temperatura almacenados

The screenshot shows a Google Sheets spreadsheet titled 'Temperatura_Humedad'. The data is organized into columns: 'Marca temporal', 'Temperatura', and 'Humedad'. The following table represents the data shown in the spreadsheet:

	A	B	C	D	E	F	G
1	Marca temporal	Temperatura	Humedad				
2	18/12/2021 13:55:41	26.30	64.20				
3	18/12/2021 14:55:21	26.50	61.00				
4	19/12/2021 18:20:23	18.80	77.50				
5	19/12/2021 19:20:23	17.40	81.90				
6	19/12/2021 20:20:23	17.60	82.90				
7	19/12/2021 21:20:24	17.30	83.60				
8	19/12/2021 22:20:23	16.80	86.20				
9	19/12/2021 23:20:23	16.60	87.50				
10	20/12/2021 0:20:23	16.40	88.30				
11	20/12/2021 1:20:23	15.90	88.80				
12	20/12/2021 2:20:23	15.80	89.60				

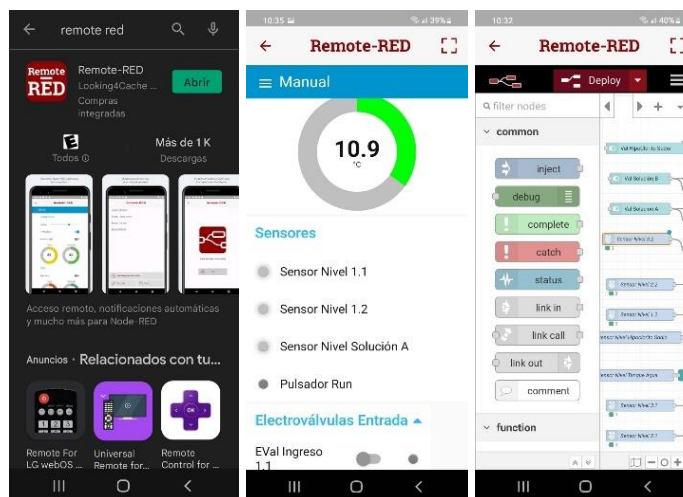
3.5.6. Acceso Remoto Node-RED

El acceso a los flujos de programación y dashboards comúnmente es local, ingresando a la misma red a través del router y digitando en el navegador la dirección IP asignada, en este caso `http://192.168.100.29:1880/ui/`; sin embargo, cuando no se puede conectar a la misma red se puede acceder vía internet de forma remota mediante

la aplicación Remote-RED disponible en Apple AppStore y en Google PlayStore, como se presenta en la siguiente figura 63.

Figura 63

Remote-RED

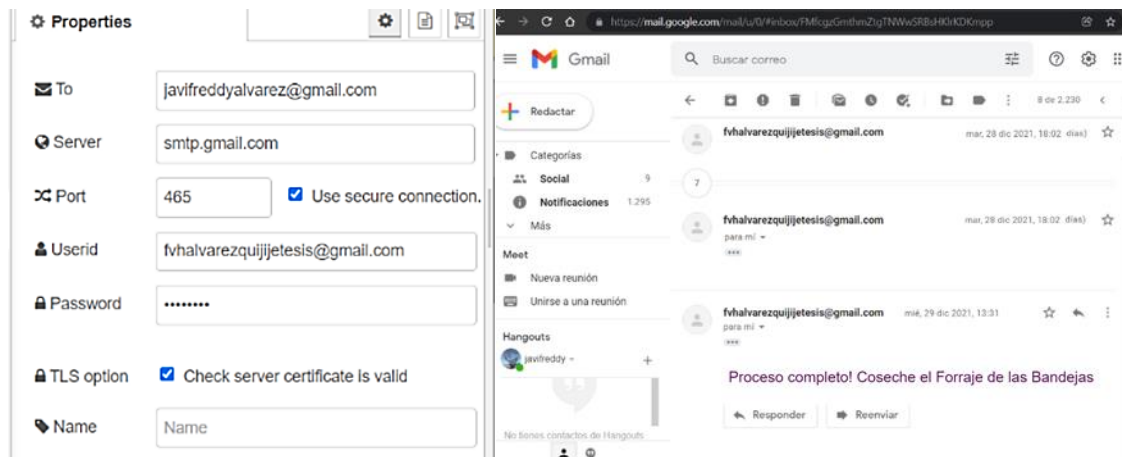


3.5.7. Alertas Correo Electrónico

Cuando se cumple cada etapa del proceso productivo o cuando se detecta baja cantidad de NaClO, solución A o B, se envían un email mediante el protocolo SMTP; se configura en Node-RED la dirección de correo y contraseña del emisor, el servidor y el puerto. En la figura 64 se presenta la configuración y la recepción del mensaje.

Figura 64

Configuración y recepción de correo



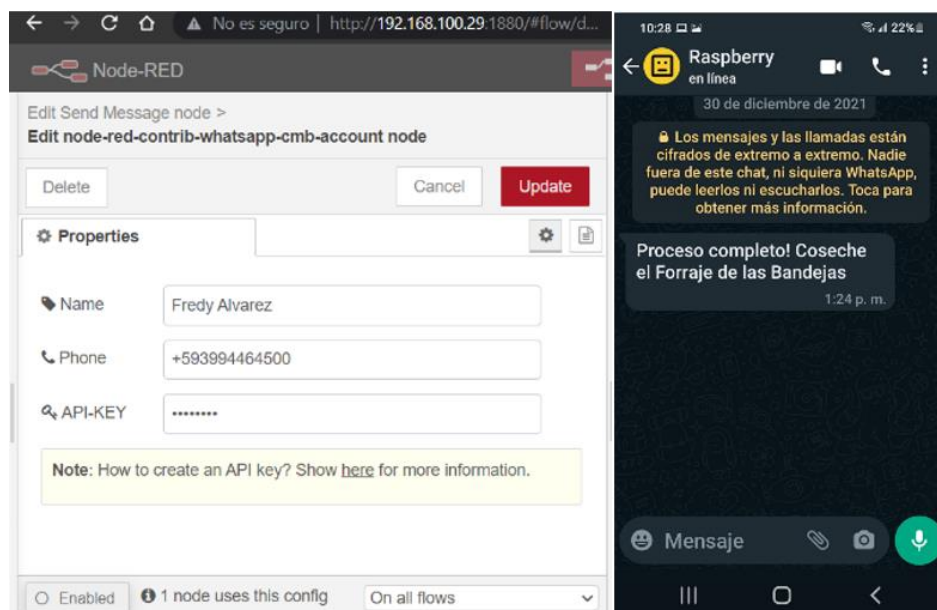
3.5.8. Alertas CallMeBot WhatsApp

A más de las alertas tradicionales por correo electrónico se implementa alertas vía WhatsApp mediante el servicio CallMeBot, para lo cual se configura el número de celular y la clave API-KEY que se obtiene como lo establece en su página oficial (CallMeBot, 2021).

Los mensajes se envían desde el número +34644537849 y se reciben al número de celular configurado, en la figura 65 se presenta dicha configuración y la recepción del mensaje, en este caso se indica que el proceso productivo se ha completado.

Figura 65

Configuración y recepción de mensajes WhatsApp



3.6. Construcción e Implementación del Sistema Mecatrónico

Una vez finalizada la etapa de diseño y selección de componentes se procede a la construcción e implementación del sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico de la figura 66.

Figura 66

Sistema mecatrónico productor de FVH

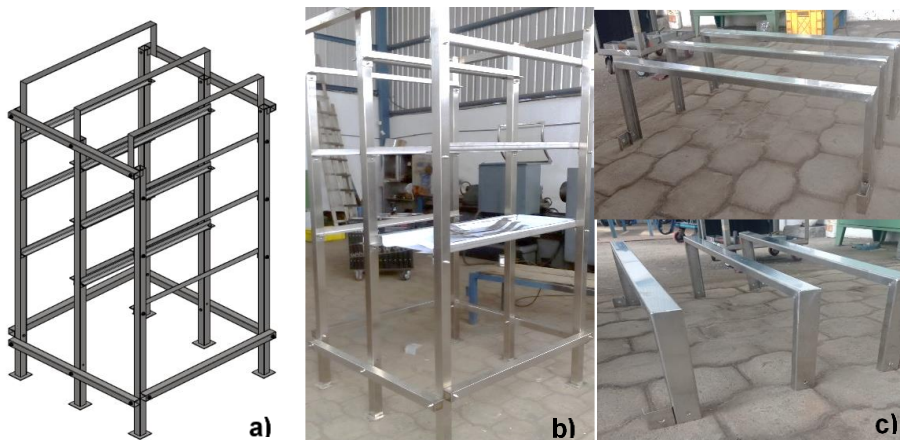


3.6.1. Estante

En la figura 67 b) y figura 67 c), se presenta la estructura del estante elaborado en acero inoxidable AISI 430 junto a su diseño CAD, figura 67 a).

Figura 67

Construcción del estante



Nota. Estructura CAD (a), estante ensamblado (b), travesaños superiores (c).

3.6.2. Bandeja

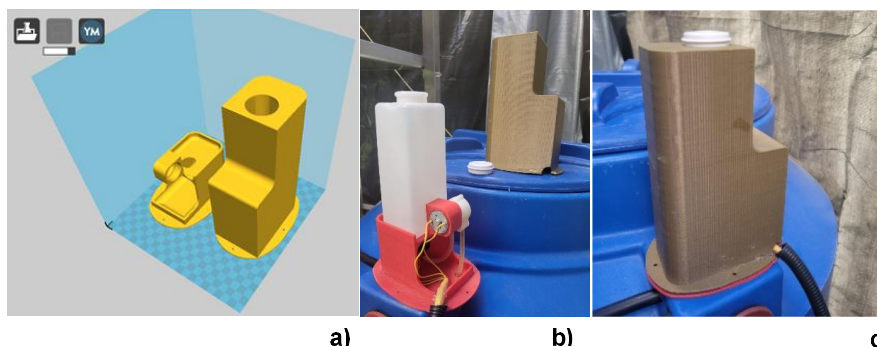
La figura 68 muestra el diseño CAD a), la construcción de la bandeja b), la implementación del sensor de nivel y la unión universal roscada de 1/2" c) d), mientras que en la sección f) se presenta la rejilla.

Figura 68*Construcción de bandejas*

Nota. Diseño CAD (a), construcción bandeja (b), bandeja con sensor y desagüe (c) (d) (e), rejilla (f).

3.6.3. Dosificador NaClO

El dosificador de hipoclorito de sodio de la figura 69 a) se diseñó en base a las medidas de los elementos que lo conforman y se imprimió en 3D empleando plástico PLA con una densidad del 100%, una calidad excelente con altura de capa de 0.1 mm y grosor de borde de 0.6 mm a una velocidad de 60 mm/s a 205°C de temperatura de extrusor y 80°C de temperatura de cama. En la figura 69 b) se presenta el modelo impreso y ensamblado con sus componentes, mientras que en c) se presenta la implementación del mismo sobre el tanque A.

Figura 69*Construcción e implementación del dosificador NaClO*

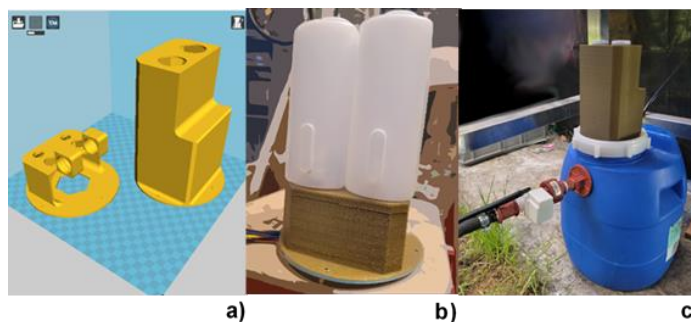
Nota. Diseño para impresión 3D (a), construcción del dosificador (b), implementación del dosificador (c).

3.6.4. Dosificador Solución A y B

Para preparar la solución hidropónica se emplea el dosificador de soluciones tipo A y B de la figura 70; de igual manera al de NaClO su construcción se llevó a cabo en PLA mediante impresión 3D. En la figura 70 a) se presenta el modelo 3D, mientras que en b) y c) se presenta la impresión, ensamblado e implementación sobre el tanque B.

Figura 70

Construcción e implementación del dosificador solución A y B



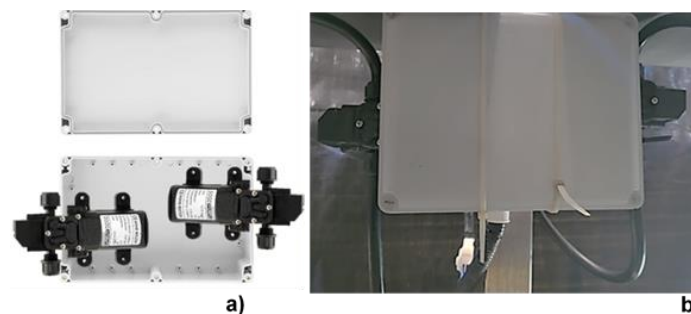
Nota. Diseño 3D (a), construcción del dosificador (b), implementación del dosificador (c).

3.6.5. Bombas

Tanto la bomba conectada al tanque A y la otra al tanque B se encuentran ubicadas dentro de una caja plástica impermeable como se presenta en la figura 71 a) y su implementación se llevó a cabo en la parte inferior de las bandejas del primer nivel como se muestra en la figura 71 b).

Figura 71

Implementación de las bombas para tanque A y B



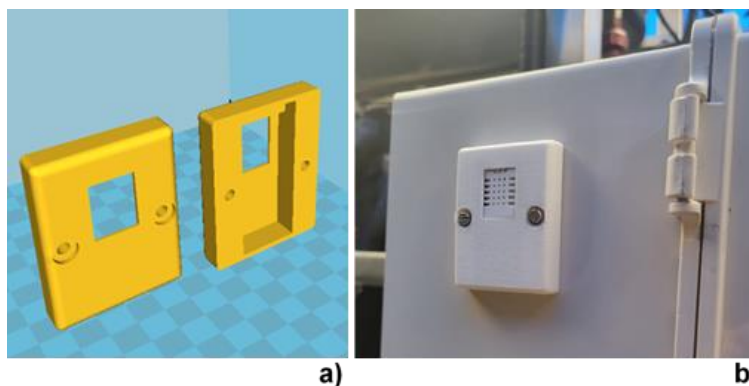
Nota. Instalación (a) e implementación (b) de bombas.

3.6.6. Sensor de Humedad y Temperatura

La figura 72 a) presenta la carcasa en donde se alojará el sensor DHT22; mientras que en la figura 72 b), su implementación a un costado del tablero de control.

Figura 72

Implementación del sensor DHT22



3.6.7. Válvulas solenoides de entrada

La figura 73 indica la implementación de las electroválvulas de entrada para la inundación de las bandejas de cada piso.

Figura 73

Implementación electroválvulas entrada de inundación



3.6.8. Válvulas solenoides de salida y recirculación

En la figura 74 se encuentra a las electroválvulas NC de salida de drenaje de las bandejas y las de recirculación.

Figura 74

Implementación de electroválvulas de salida y recirculación



3.6.9. Válvulas solenoides de alimentación de tanques

La figura 75 muestra la implementación de la electroválvula de alimentación que permite el abastecimiento de agua a cada tanque.

Figura 75

Implementación de electroválvulas de alimentación de tanques

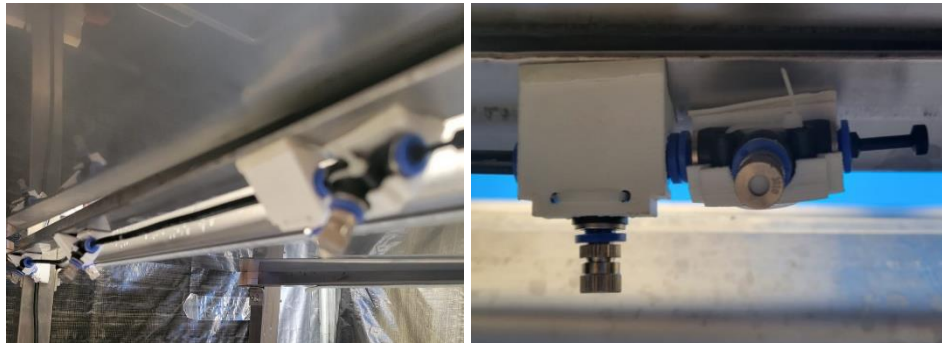


3.6.10. Aspersores de irrigación

Los aspersores se encuentran distribuidos para cada bandeja en los tres niveles del estante como lo indica la figura 76.

Figura 76

Implementación de aspersor tipo nebulizador

**3.6.11. Tira LED**

En la figura 77 se aprecia la implementación de las tiras LED colocadas por nivel para cubrir a todas las bandejas.

Figura 77

Implementación de tiras LED

**3.6.12. Tablero de Control**

El tablero de la figura 78 aloja tres luces piloto, cuatro pulsadores y un selector en la parte exterior, mientras que interiormente aloja de forma impermeable a toda la electrónica.

Figura 78

Implementación del tablero de control



Capítulo IV

4. Pruebas y Resultados

En este capítulo se realiza pruebas de funcionamiento eléctrico y de control IoT por parte de los fabricantes y usuarios. Se ejecuta ensayos de producción de forraje bajo el proceso manual empleado por la Asociación Míster Cuy y bajo el sistema mecatrónico implementado, analizando sus resultados. Con los resultados obtenidos se validará la hipótesis.

4.1. Pruebas de Funcionamiento

4.1.1. Prueba eléctrica

Esta prueba consiste en comprobar si la protección eléctrica implementada es la adecuada mediante la corriente requerida por la máquina, de forma que para los resultados de la tabla 58 se activó individual y en conjunto todos los dispositivos que la componen midiendo su corriente con una pinza amperimétrica.

Tabla 58

Corriente medida en la máquina

Dispositivos	Corriente (A)
2 Raspberry + fuente de alimentación	0.25
Tira LED	0.39
4 luces piloto	0.02
1 electroválvula drenaje	0.16
6 electroválvula salida	0.90
6 electroválvula entrada	0.48
Electroválvula recirculación tanque B	0.14
Electroválvula recirculación tanque A	0.14
Electroválvula alimentación tanque B	0.03
Electroválvula alimentación tanque A	0.03
Válvula peristáltica solución A	0.02
Válvula peristáltica solución B	0.02

Dispositivos	Corriente (A)
Válvula peristáltica solución NaClO	0.02
Bomba tanque B	0.40
Bomba tanque A	0.27
Todos los dispositivos activos:	3.2

De forma teórica en la tabla 47 se determinó una corriente de 4.152 A mientras que de forma práctica se obtuvo 3.2 A, por lo que la protección de 6 A como lo señala la sección 3.4.5 es la adecuada. El máximo consumo en el supuesto caso en que todos los dispositivos de la máquina se encuentren accionados es, 352 W a 110V.

4.1.2. Prueba Control IoT

Consiste en verificar si la máquina gestiona adecuadamente los diferentes dispositivos conectada a ella, se evalúa el control mediante el tablero físico y el virtual.


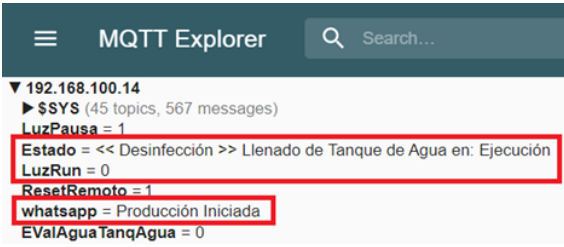



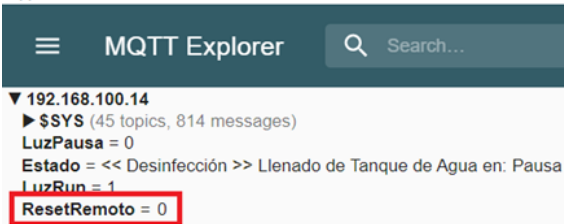


En la tabla 59 se evidencia que al presionar cada botón del tablero de control físico también se refleja en el tablero virtual y en el “topic” correspondiente.

Para la verificación de cada “topic” se usa el programa MQTT Explorer que muestra los estados de cada evento.

Tabla 59

Prueba de control IoT

Tablero físico	Tablero virtual	Verificación “topic”
<p>Estado Standby</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● Pulsador Run ● Pulsador Paro ● Pulsador Reset ● Pulsador RPi Apagado 	

Tablero físico	Tablero virtual	Verificación "topic"
<p data-bbox="298 264 451 296">Estado Run</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> Pulsador Run <input type="radio"/> Pulsador Paro <input type="radio"/> Pulsador Reset <input type="radio"/> Pulsador RPi Apagado 	
<p data-bbox="298 600 483 632">Estado Pausa</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Pulsador Run <input checked="" type="radio"/> Pulsador Paro <input type="radio"/> Pulsador Reset <input type="radio"/> Pulsador RPi Apagado 	
<p data-bbox="298 936 477 968">Estado Reset</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Pulsador Run <input type="radio"/> Pulsador Paro <input checked="" type="radio"/> Pulsador Reset <input type="radio"/> Pulsador RPi Apagado 	
<p data-bbox="298 1272 639 1304">Estado Apagar Raspberry</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Pulsador Run <input type="radio"/> Pulsador Paro <input type="radio"/> Pulsador Reset <input checked="" type="radio"/> Pulsador RPi Apagado 	

4.1.3. Prueba notificación IoT

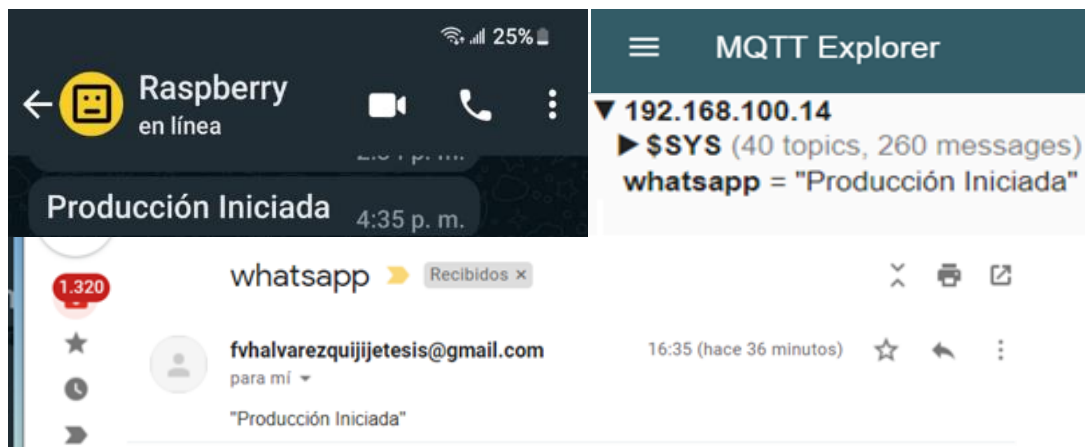
Esta prueba se realiza comprobando el envío y recepción de mensajes mediante el "topic: whatsapp" a través de MQTT Explorer, correo electrónico y WhatsApp; los datos de la tabla 60 fueron enviados y recibidos con éxito.

Tabla 60

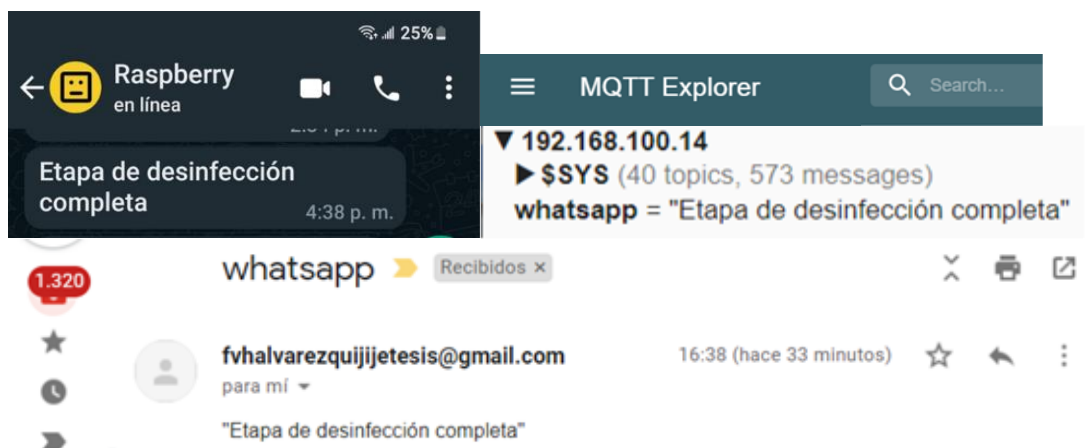
Prueba de notificación IoT

Prueba "topic" MQTT, mensaje WhatsApp y mensaje correo electrónico

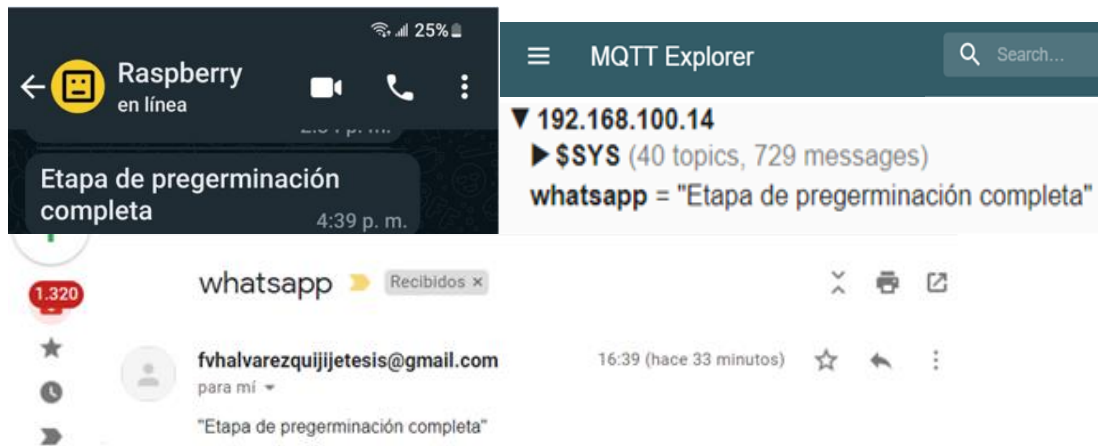
Notificación 1



Notificación 2



Notificación 3



Prueba "topic" MQTT, mensaje WhatsApp y mensaje correo electrónico

Notificación 4

The screenshot shows a mobile phone interface with a WhatsApp notification and an MQTT Explorer window. The WhatsApp notification is from 'Raspberry en línea' and says 'Etapa de cremiento completa' at 4:40 p. m. The MQTT Explorer window shows the IP address 192.168.100.14 and the topic \$SYS with 40 topics and 910 messages. The message content is 'whatsapp = "Etapa de cremiento completa"'. Below this, a WhatsApp message is shown from 'fvhalvarezquijjetesis@gmail.com' at 16:40 (hace 31 minutos) with the content 'Etapa de cremiento completa'.

Notificación 5

The screenshot shows a mobile phone interface with a WhatsApp notification and an MQTT Explorer window. The WhatsApp notification is from 'Raspberry en línea' and says 'Etapa de limpieza completa' at 4:41 p. m. The MQTT Explorer window shows the IP address 192.168.100.14 and the topic \$SYS with 40 topics and 1054 messages. The message content is 'whatsapp = "Etapa de limpieza completa"'. Below this, a WhatsApp message is shown from 'fvhalvarezquijjetesis@gmail.com' at 16:40 (hace 34 minutos) with the content 'Etapa de limpieza completa'.

Notificación 6

The screenshot shows a mobile phone interface with a WhatsApp notification and an MQTT Explorer window. The WhatsApp notification is from 'Raspberry en línea' and says 'Proceso completo! Coseche el Forraje de las Bandejas' at 4:41 p. m. The MQTT Explorer window shows the IP address 192.168.100.14 and the topic \$SYS with 40 topics and 1138 messages. The message content is 'whatsapp = "Proceso completol Coseche el Forraje de las Bandejas"'. Below this, a WhatsApp message is shown from 'fvhalvarezquijjetesis@gmail.com' at 16:41 (hace 33 minutos) with the content 'Proceso completol Coseche el Forraje de las Bandejas'.

Prueba "topic" MQTT, mensaje WhatsApp y mensaje correo electrónico

Notificación 7

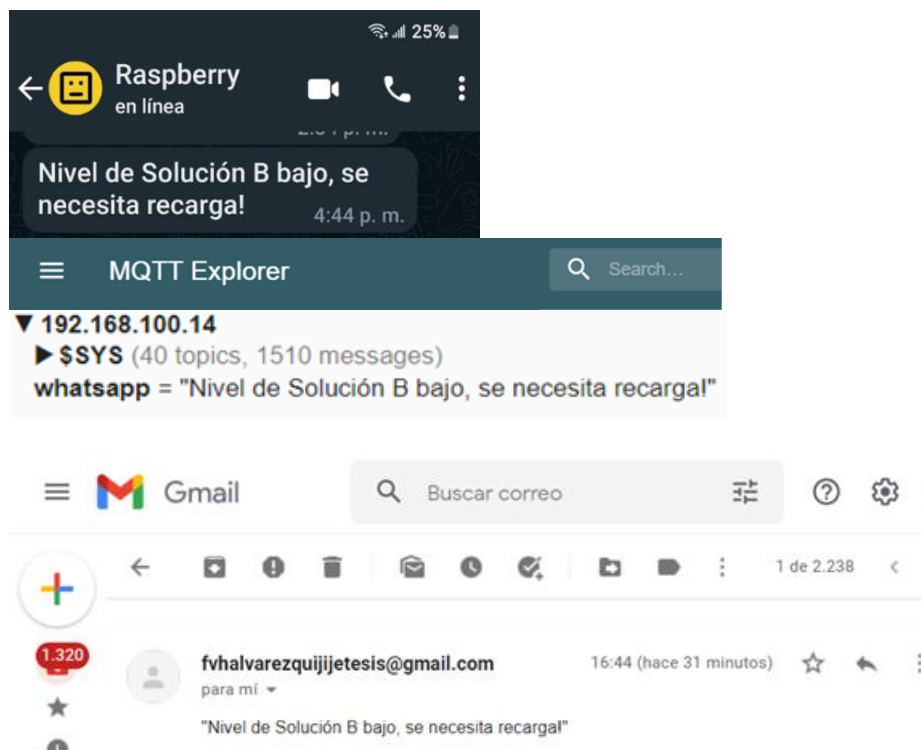
The image displays three screenshots illustrating the flow of information from a physical device to a cloud service and then to an email. The top screenshot shows a WhatsApp chat with 'Raspberry en línea' where a message is received: "Nivel de NaClO bajo, se necesita recarga!" at 4:42 p.m. The middle screenshot shows the MQTT Explorer interface, where a message is received on the 'whatsapp' topic from IP address 192.168.100.14. The bottom screenshot shows a Gmail inbox with an email from 'fvhalvarezquijjetesis@gmail.com' received at 16:42 (32 minutes ago), containing the same message text.

Notificación 8

The image displays three screenshots illustrating the flow of information from a physical device to a cloud service and then to an email. The top screenshot shows a WhatsApp chat with 'Raspberry en línea' where a message is received: "Nivel de Solución A bajo, se necesita recarga!" at 4:43 p.m. The middle screenshot shows the MQTT Explorer interface, where a message is received on the 'whatsapp' topic from IP address 192.168.100.14. The bottom screenshot shows a Gmail inbox with an email from 'fvhalvarezquijjetesis@gmail.com' received at 16:43 (31 minutes ago), containing the same message text.

Prueba “topic” MQTT, mensaje WhatsApp y mensaje correo electrónico

Notificación 9



4.1.4. Prueba Almacenamiento de Datos IoT

En la figura 79 se comprueba que los datos de humedad y temperatura censados por el DHT22 son los mismos, ya sea que se encuentren almacenados en la nube (izquierda) y de forma local (derecha) y almacenados cada hora.

Figura 79

Prueba de almacenamiento de datos

The image shows a Google Sheet titled 'Temperatura_Humedad' and a CSV file named 'maplin_20220205.csv'. The Google Sheet contains the following data:

1	A	B	C
Marca temporal	Temperatura	Humedad	
686	2/4/2022 16:52:22	11.7	75
687	2/4/2022 17:52:24	11.6	76.3
688	2/4/2022 18:52:24	10.8	76.5
689	2/4/2022 19:52:22	10.5	78.5
690	2/4/2022 20:52:22	10.1	79.3
691	2/4/2022 21:52:22	9	81.3
692	2/4/2022 22:52:22	8.3	82.4
693	2/4/2022 23:52:22	8.1	82.9
694	2/5/2022 0:52:22	8.9	84.7
695	2/5/2022 1:52:22	8.8	83.7

The CSV file contains the following data:

1	timestamp, Temperatura, humidity
2	1644040343011, 8.90, 84.70
3	1644043943035, 8.70, 83.70
4	1644047543011, 7.90, 82.90
5	1644051143011, 7.10, 83.10
6	1644054743011, 6.00, 83.50
7	1644058343011, 5.80, 85.40
8	1644061943011, 6.90, 85.90
9	1644065543012, 12.30, 73.20
10	1644069143012, 19.40, 52.10
11	1644072743012, 27.00, 38.20
12	1644076343013, 29.40, 32.90

4.1.5. Pruebas Bajo el Proceso Manual Empleado por la Asociación Míster Cuy

Se realiza pruebas a cuatro tipos de semillas: maíz duro amarillo, trigo, cebada forrajera y avena macho para determinar el rendimiento de forraje por cada kilogramo de semilla.

4.1.5.1. Condiciones del Tratamiento A. El tratamiento, por motivos sanitarios, se realizó en la ciudad de Latacunga, Cotopaxi, Ecuador, a una altura de 2750 m sobre el nivel del mar en condiciones similares a Ascázubi donde se encuentra instalada la Asociación Míster Cuy.

Según el (MAGAP, 2014) la cosecha del forraje a una altura mínima de 20 cm empleando solución hidropónica se realiza a los 13 a 15 días iniciado el proceso; sin embargo, para el tratamiento A se usó solo agua lo que prolonga el tiempo de cosecha, debido a esto se realizó tres repeticiones empleando la muestra calculada en el anexo H; en cada caso se usa bandejas de 60 x 40 x 3 cm que albergarán 1.2 Kg de semilla distribuidas uniformemente bajo las condiciones ambientales de la tabla 61.

Tabla 61

Condiciones ambientales durante las pruebas del tratamiento A

Repetición	Fecha inicio	Tem. Mín promedio °C	Temp. Máx promedio °C	%Humedad mínima	%Humedad máxima
1	14/11/21	7.58	26.08	67.63	87.24
2	29/11/21	7.6	26.26	66.32	84.57
3	11/12/21	8.49	26.86	60.05	87.20

Nota. Datos obtenidos del anexo G.

4.1.5.2. Metodología del Tratamiento A. El proceso manual empleado por la Asociación Míster Cuy se basa en el proceso productivo descrito en la tabla 3, con la diferencia de que no utiliza solución hidropónica.

La figura 80 presenta la metodología empleada hasta un día indeterminado "n" cuando cada tipo de cultivo alcancen por lo menos 20 cm.

Figura 80

Metodología del tratamiento A

Día	Etapa	Insumo	Cantidad	Duración	Observación	
1	Selección	Semilla	1,2 kg			
	Lavado y clasificación	Agua	10 L	20 min		
	Desinfección	Agua + NaClO	10 L	3 minutos	100 ml NaClO	
2	Pregerminación	Remojo	Agua	10 L	12 horas	
		Oreaje			1 hora	
		Remojo	Agua	10 L	12 horas	
3	Germinación	Semilla remojada		48 horas		
4						
5	Crecimiento	Riego	Agua	0,5 L * 8 = 4 L	10 s * 8 = 80 s	8 riegos al día
6						
7						
8						
9				0,5 L * 4 = 2 L	10 s * 4 = 40 s	4 riegos al día
10						
11						
12						
13						
14						
...	Crecimiento prolongado	Riego	Agua	0,5 L * 4 = 2 L	10 s * 4 = 40 s	4 riegos al día
n-1	Limpieza-	Limpieza	Agua	0,5 L * 4 = 2 L	10 s * 4 = 40 s	4 riegos al día
n	Cosecha	Oreaje			3 horas	

4.1.5.3. Resultados del Tratamiento A. La tabla 62 muestra los resultados por cada kilogramo de semilla de cebada, maíz, trigo y avena durante las tres pruebas del tratamiento. En la figura 81 se presenta el forraje obtenido usando el tratamiento A.

Figura 81

Forraje tratamiento A



Tabla 62*Resultados tratamiento A*

Tratamiento	Tipo de semilla	Altura Promedio (Día 14)	Altura Promedio (Día 15)	Día de cosecha	kg Forraje cosechado	% de germinación
Repetición 1	Cebada	16	16,4	20	3,63	72,5
	Maíz	9	9,5	32	3,00	60
	Trigo	14,5	14,9	22	3,26	65,1
	Avena	18,4	19,1	16	4,08	81,5
Repetición 2	Cebada	15,5	15,9	20	3,64	72,8
	Maíz	8,2	8,6	33	3,05	61
	Trigo	13,8	14	24	3,29	65,8
	Avena	18	18,2	17	4,12	82,4
Repetición 3	Cebada	16,2	16,7	19	3,65	73
	Maíz	9,3	9,7	31	2,98	59,5
	Trigo	15,2	15,6	21	3,28	65,5
	Avena	18,5	19	16	4,09	81,8

Nota. Altura, porcentaje de germinación, día y peso de cosecha obtenidos del anexo H.

4.1.6. Pruebas Bajo el Sistema Mecatrónico Implementado

De forma similar al tratamiento A, se emplea las mismas semillas y se inicia en las mismas fechas para tener iguales condiciones ambientales, con la diferencia que se usa luz artificial y riegos programados.

4.1.6.1. Condiciones del Tratamiento B. El tratamiento se realiza en el sistema mecatrónico implementando, cada bandeja que alberga las semillas es regada la mitad solo con agua mientras la otra parte con solución hidropónica.

4.1.6.2. Metodología Tratamiento B1 con Riego Solo Agua. La metodología empleada se presenta en la figura 82, el sistema implementado realiza su proceso automático como se estableció en la figura 57, sin incorporar solución nutritiva A y B.

La iluminación durante todo el proceso fue artificial, se empleó una longitud de luz azul durante la etapa de germinación y crecimiento, mientras que para la etapa de limpieza se empleó luz roja y azul a la vez; cada día se iluminó 15 horas.

Figura 82

Metodología del tratamiento B1 con riego solo agua

Etapa	Insumo	Cantidad	Duración	Observación	
Selección y clasificación	Semilla	1,2 kg		Manual	
Desinfección	Agua + NaClO	7,45 L	2 minutos	74,5 ml NaClO	
Pregerminación	Remojo	Agua en recirculación tanque A	7,45 L	12 horas	
	Oreaje			1 hora	
	Remojo	Agua en recirculación tanque A	7,45 L	12 horas	
Germinación	Semilla remojada		48 horas		
Crecimiento	Riego	Agua en recirculación tanque B	0,088 L * 8 = 0,71 L	30 s * 8 = 240 s	8 riegos al día a media bandeja
			0,53 L * 4 = 2,125 L	180 s * 4 = 720 s	4 riegos al día a media bandeja
Limpieza-Cosecha	Limpieza	Agua	0,53 L * 4 = 2,125 L	180 s * 4 = 720 s	4 riegos al día a media bandeja
	Oreaje			3 horas	

4.1.6.3. Resultados Tratamiento B1 con Riego Solo Agua. La tabla 63

muestra los resultados obtenidos en cada prueba del ensayo, por cada kilogramo de semilla empleada se obtiene la cantidad de forraje en kg, porcentaje de germinación y la altura promedio de las plantas.

Tabla 63

Resultados tratamiento B1 con riego solo agua

Tratamiento	Tipo de semilla	Altura Promedio (Día 14)	Altura Promedio (Día 15)	Día de cosecha	kg Forraje cosechado	% de germinación
B1 Solo Agua	Cebada	16,8	17,2	18	4,58	73,25
	Maíz	9,8	10,3	30	3,80	60,75

Tratamiento	Tipo de semilla	Altura Promedio (Día 14)	Altura Promedio (Día 15)	Día de cosecha	kg Forraje cosechado	% de germinación
B1 Solo Agua	Trigo	15,3	15,7	21	4,12	65,85
	Avena	19,2	19,9	15	5,14	82,25
Repetición 2	Cebada	16,3	16,7	19	4,60	73,55
	Maíz	9,3	9,6	31	3,86	61,75
	Trigo	14,6	14,8	22	4,16	66,55
	Avena	18,8	19	16	5,20	83,15
Repetición 3	Cebada	17	17,5	18	4,61	73,75
	Maíz	10,1	10,5	30	3,77	60,25
	Trigo	16	16,4	20	4,14	66,25
	Avena	19,3	19,8	15	5,16	82,55

Nota. Altura, porcentaje de germinación, día y peso de cosecha obtenidos del anexo I.

4.1.6.4. Metodología Tratamiento B2 Riego Agua y Solución Hidropónica.

Se produce FVH mediante el proceso descrito en la figura 57, con las propiedades químicas y rangos óptimos de la solución hidropónica de la tabla 64, preparada con los insumos e instrucciones de **(Hidroponía Ecuador, 2022)**.

Tabla 64

Propiedades de la solución hidropónica

Propiedades químicas	Rangos óptimos		
Nitrógeno (N) Total	68,70%	PH	5,5 - 6,5
Fósforo (P)	10,09%	EC	1,5 mS - 3mS
Potasio (K) Total	30,84%	TDS	750 ppm-1500 ppm
Amonio (NH4+) Total	4,22%	Temperatura	15°C - 25°C
Calcio (Ca) Total	33,65%		
Magnesio (Mg)	19,63%		
Boro (B)	0,17%		
Cobre (Cu)	0,03%		
Hierro Quelatado (EDOHA)	1,12%		

Propiedades químicas		Rangos óptimos
Manganeso (Mn)		0,20%
Zinc (Zn)		0,05%
Molibdeno (Mo)		0,01%

Al igual que el tratamiento B2, con riego solo agua, se emplea iluminación LED durante 15 horas diarias en la etapa de germinación, crecimiento y limpieza; la metodología usada en general, se describe en la figura 83.

Figura 83

Metodología del tratamiento B2 con riego agua y solución hidropónica

Etapa	Insumo	Cantidad	Duración	Observación	
Selección y clasificación	Semilla	1,2 kg		Manual	
Desinfección	Agua + NaClO	7,45 L	2 minutos	74,5 ml NaClO	
Pregerminación	Remojo	Agua en recirculación tanque A	7,45 L	12 horas	
	Oreaje			1 hora	
	Remojo	Agua en recirculación tanque A	7,45 L	12 horas	
Germinación	Semilla remojada		48 horas		
Crecimiento	Riego con recirculación tanque B	3,54 ml solución A 1,42 ml solución B en 2,835 L de agua	0,088 L * 8 = 0,71 L	30 s * 8 = 240 s	8 riegos al día a media bandeja
			0,53 L * 4 = 2,125 L	180 s * 4 = 720 s	4 riegos al día a media bandeja
Limpieza-Cosecha	Limpieza	Agua	0,53 L * 4 = 2,125 L	180 s * 4 = 720 s	4 riegos al día a media bandeja
	Oreaje			3 horas	

4.1.6.5. Resultados Tratamiento B2 Riego Agua y Solución Hidropónica. Los resultados de cantidad de masa fresca, % de germinación y altura promedio de las plantas por cada kilogramo de semilla empleada se presentan en la tabla 65 en base a los datos obtenidos del anexo J.

Tabla 65*Resultados tratamiento B2 riego agua y solución hidropónica*

Tratamiento	Tipo de semilla	Altura Promedio (Día 14)	Altura Promedio (Día 15)	Día de cosecha	kg Forraje cosechado	% de germinación
Repetición 1	Cebada	17,5	18,3	17	5,55	74
	Maíz	10,5	11,3	29	4,61	61,5
	Trigo	16	16,8	20	5,00	66,6
	Avena	19,8	20,6	14	6,23	83
Repetición 2	Cebada	17	17,8	18	5,57	74,3
	Maíz	9,7	10,5	30	4,69	62,5
	Trigo	15,3	16,1	21	5,05	67,3
	Avena	19,9	20,7	14	6,29	83,9
Repetición 3	Cebada	17,7	18,5	17	5,59	74,5
	Maíz	10,8	11,6	29	4,58	61
	Trigo	16,7	17,5	19	5,03	67
	Avena	20,2	21	14	6,25	83,3

Nota. Altura, porcentaje de germinación, día y peso de cosecha obtenidos del anexo J.

4.1.6.6. Resultados de tratamientos en cada fase de pruebas

En la tabla 66 se presenta el desarrollo del forraje de avena, trigo, maíz y cebada usando el sistema mecatrónico productor de forraje; como existe dos tratamientos y pruebas que se ejecutan al mismo tiempo para mantener las mismas condiciones ambientales se divide a cada bandeja en dos partes, una destinada para el tratamiento B1 con irrigación en base de agua y otra con tratamiento B2 a base de riegos con solución hidropónica.

Tabla 66

Desarrollo de forrajes con tratamiento B1 y B2

Colocación de semillas



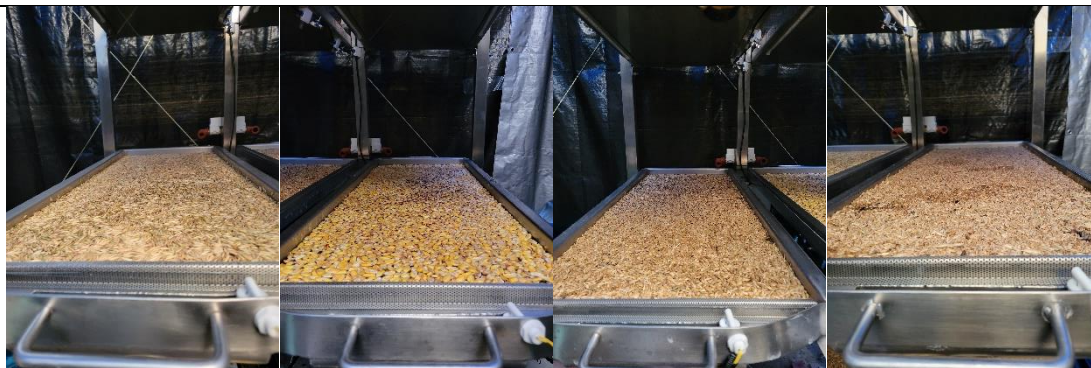
Cebada

Maíz

Trigo

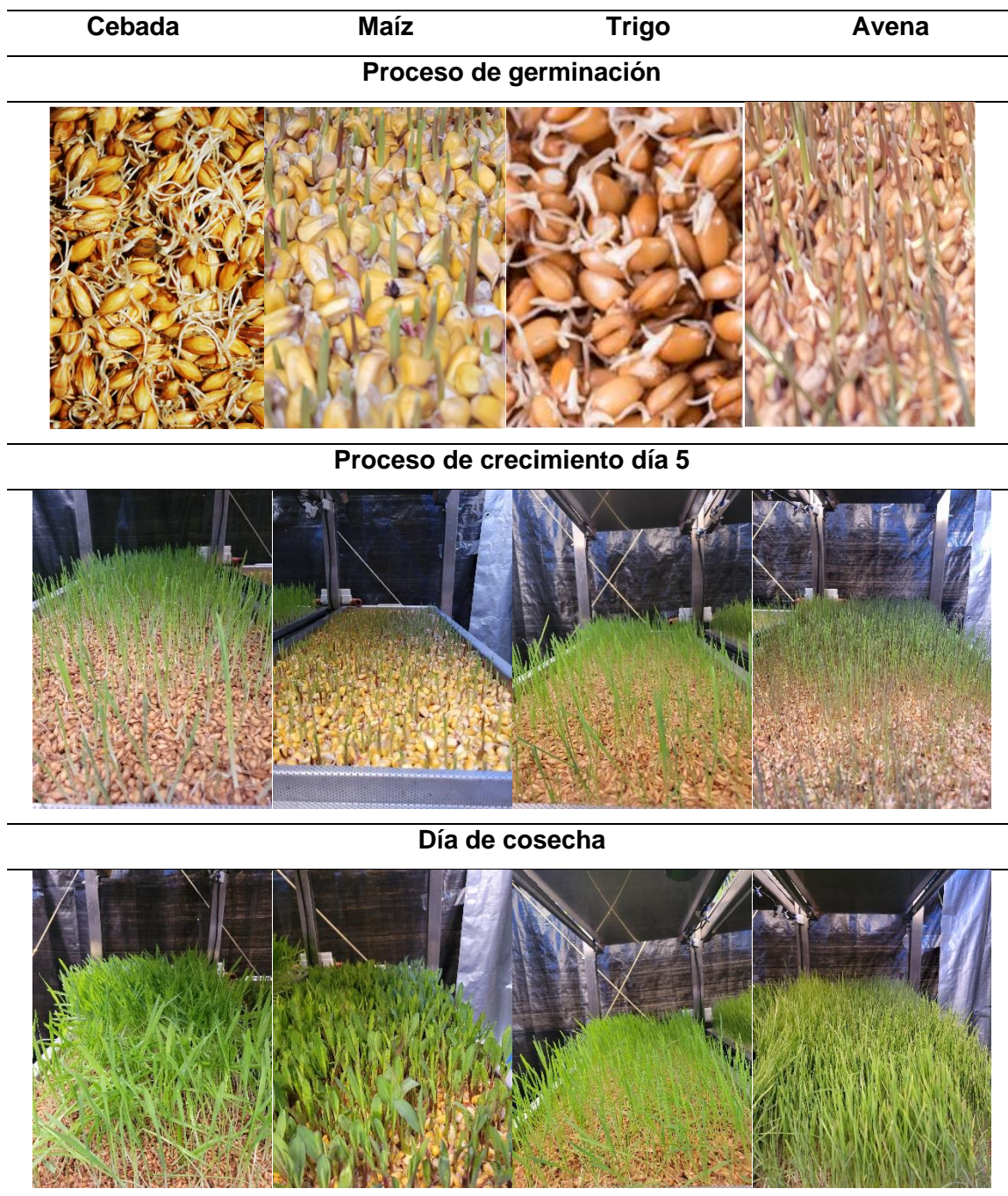
Avena

Proceso desinfección



Proceso de pregerminación





4.2. Pruebas Bromatológicas

Estas pruebas fueron realizadas por el laboratorio del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP, con el fin de conocer la química nutricional del forraje producido en la máquina implementada bajo los tratamientos solo agua y agua con solución hidropónica, se optó por realizar únicamente el estudio a la avena ya que

ésta es la única semilla que presenta un tiempo de cosecha menor o igual a los 15 días de producción establecidos por la FAO.

En la tabla 67 se encuentran los resultados del informe del análisis proximal, donde se describe el porcentaje de humedad, de material inorgánico o ceniza, grasa o extracto etéreo (EE), proteína, fibra y extracto libre de nitrógeno (ELN) como almidón, azúcares, etc.

Tabla 67

Resultados bromatológicos

	%Humedad	Cenizas	EE	Proteína	Fibra	ELN
Avena con riego	73,67	1,93	4,26	10,46	7,9	75,45
solo agua	71,05	2,11	4,66	10,84	8,19	74,2
	73,04	2,03	3,13	13,31	8,9	72,63
	63,77	3,61	2,55	11,33	13,8	68,7
Avena con riego	68,74	3,47	4,94	10,71	22,57	58,31
solución	67,09	3,23	4,63	10,58	24,09	57,8
hidropónica	76,79	3,05	3,5	16,74	14,12	62,59
	66,79	3,41	2,71	10,66	13,8	66,43

Nota. Datos obtenidos del anexo K

4.3. Validación de Hipótesis

La hipótesis planteada en la sección 1.6 tiene dos enfoques, uno a mejorar el tiempo de cultivo para lo cual se analiza la varianza del día de cosecha determinando si todos los tratamientos o semillas se cosechan al mismo día; para el otro enfoque se determina si existe una mejora en la calidad del forraje empleando pruebas bromatológicas.

4.3.1. Hipótesis de Mejora del Tiempo de Cultivo en cebada, maíz, trigo y avena

La mejora del tiempo de cultivo se determina con el día de cosecha cuando la planta llega por lo menos a los 20 cm de altura, con los resultados de las tablas 62, 63 y 65, se realiza el análisis de varianza para evaluar la hipótesis, usando el software estadístico InfoStat debido a su sencillez e interfaz intuitiva para el análisis y manejo de datos.

La hipótesis por contrastar es:

H_0 = El día de cosecha es el mismo para todos los tipos de semilla y tratamientos.

H_1 = El día de cosecha **no** es el mismo para todos los tipos de semilla y tratamientos.

En la figura 84 se evidencia que el p-valor tanto del tipo de tratamiento como del tipo de semilla son significantes, y al tener un valor menor al nivel de significación de 0.05 se rechaza la hipótesis H_0 .

Figura 84

Resultados análisis de la varianza del tiempo de cultivo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
DíaCosecha	36	0,99	0,98	3,48

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

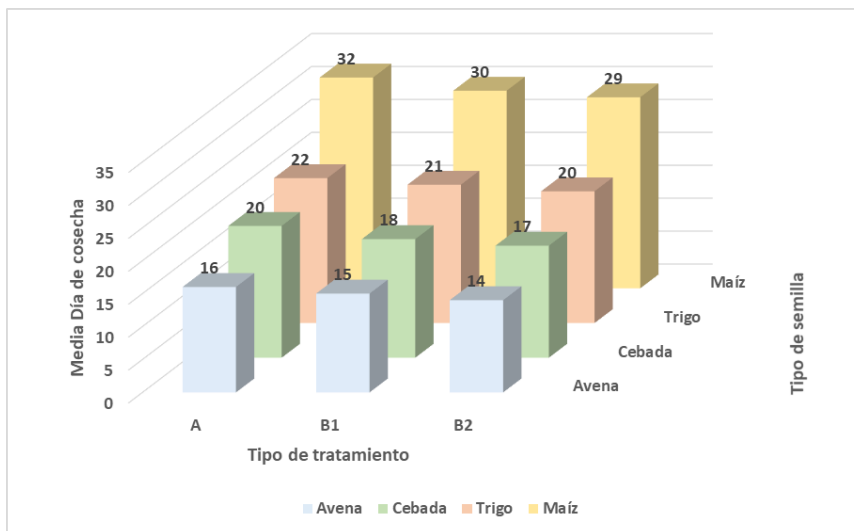
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1215,19	5	243,04	443,38	<0,0001
Semilla	1177,64	3	392,55	716,13	<0,0001
Tratamiento	37,56	2	18,78	34,26	<0,0001
Error	16,44	30	0,55		
Total	1231,64	35			

Además, en la figura 85 se evidencia que en todos los casos reduce el tiempo de cultivo, siendo el más significativo el de la avena de 16 días a 14 días, afirmando la hipótesis que el sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico aplicando

software libre e internet de las cosas sí mejora el tiempo de cultivo del forraje a comparación del proceso manual realizado por la Asociación.

Figura 85

Medias de día de cosecha según tratamientos y tipo de semillas



4.3.2. Hipótesis de Mejora de Calidad

La mejora de la calidad, según los estándares señalados por (Agronews, s.f.), se basan en los datos de análisis bromatológicos; para cada uno de ellos se valida la hipótesis analizando la varianza.

4.3.3. Porcentaje de humedad

Un indicador de calidad es el porcentaje de humedad para el que se plantea la siguiente hipótesis:

H_0 = El porcentaje de humedad obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 es igual al obtenido con el tratamiento B2.

H_1 = El porcentaje de humedad obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 **no** es igual al obtenido con el tratamiento B2.

En la figura 86 se presenta el análisis de varianza que determina un p-valor de 0.8766 mayor al de la significancia de 0.05, por lo que se acepta la hipótesis H_0 .

Figura 86

Análisis de varianza del % humedad de cada tratamiento aplicado

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
%Humedad	8	4,4E-03	0,00	6,60

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,56	1	0,56	0,03	0,8766
Tratamiento	0,56	1	0,56	0,03	0,8766
Error	128,42	6	21,40		
Total	128,98	7			

4.3.4. Porcentaje de ceniza

Para este indicador se validará la hipótesis:

H_0 = El porcentaje de ceniza obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 es igual al obtenido con el tratamiento B2.

H_1 = El porcentaje de ceniza obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 **no** es igual al obtenido con el tratamiento B2.

En la figura 87 se presenta el análisis de varianza.

Figura 87

Análisis de varianza de % ceniza de cada tratamiento aplicado

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Ceniza	8	0,43	0,33	20,29

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,51	1	1,51	4,51	0,0778
Tratamiento	1,51	1	1,51	4,51	0,0778
Error	2,01	6	0,34		
Total	3,53	7			

El p-valor calculado por software es 0.0778 mayor al de la significancia de 0.05, por lo que se acepta la hipótesis que establece que el porcentaje de ceniza obtenido del

análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 es igual al obtenido con el tratamiento B2.

4.3.5. Porcentaje de extracto etéreo

Este indicador define el porcentaje de grasa en el forraje, la hipótesis a validar es:

H_0 = El porcentaje de extracto etéreo obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 es igual al obtenido con el tratamiento B2.

H_1 = El porcentaje de extracto etéreo obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 **no** es igual al obtenido con el tratamiento B2.

El análisis de varianza se presenta en la figura 88 y determina que la hipótesis H_0 es aceptada ya que su p-valor de 0.6924 mayor al de la significancia de 0.05.

Figura 88

Análisis de varianza del % extracto etéreo de cada tratamiento aplicado

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
EE	8	0,03	0,00	26,45

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,17	1	0,17	0,17	0,6924
Tratamiento	0,17	1	0,17	0,17	0,6924
Error	6,06	6	1,01		
Total	6,23	7			

4.3.6. Porcentaje de proteína

Para este indicador se validará la hipótesis:

H_0 = El porcentaje de proteína obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 es igual al obtenido con el tratamiento B2.

H_1 = El porcentaje de proteína obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 **no** es igual al obtenido con el tratamiento B2.

En la figura 89 se presenta el análisis de varianza.

Figura 89

Análisis de varianza del % proteína de cada tratamiento aplicado

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Proteína	8	0,03	0,00	19,72

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,95	1	0,95	0,17	0,6913
Tratamiento	0,95	1	0,95	0,17	0,6913
Error	32,65	6	5,44		
Total	33,59	7			

Se acepta la hipótesis H_0 debido a que el p-valor calculado es 0.6913 mayor al de la significancia de 0.05.

4.3.7. Porcentaje de fibra

Para este indicador se plantea la hipótesis:

H_0 = El porcentaje de fibra obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 es igual al obtenido con el tratamiento B2.

H_1 = El porcentaje de fibra obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 **no** es igual al obtenido con el tratamiento B2.

En la figura 90 se analizó la varianza donde el p-valor de 0.0263 es menor al de la significancia de 0.05, por lo que la hipótesis H_0 es rechazada. Como se rechazó la hipótesis, se emplea una estratificación de Tukey con un nivel de significación de 0.05; obteniéndose que el tratamiento B1 y B2 estadísticamente no pertenecen al mismo grupo, siendo B2 el que presenta mayor porcentaje de fibra con una media de 18.65%.

Figura 90

Análisis de varianza del % fibra de cada tratamiento aplicado

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	160,12	1	160,12	8,58	0,0263
Tratamiento	160,12	1	160,12	8,58	0,0263
Error	111,97	6	18,66		
Total	272,09	7			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=7,47455					
Error: 18,6622 gl: 6					
Tratamiento	Medias	n	E.E.		
Avena B2	18,65	4	2,16	A	
Avena B1	9,70	4	2,16	B	

4.3.6. Porcentaje de ELN

La hipótesis a validar para el extracto libre de nitrógeno es:

H_0 = El porcentaje de ELN obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 es igual al obtenido con el tratamiento B2.

H_1 = El porcentaje de ELN obtenido del análisis bromatológico de la avena producida con el tratamiento B1 **no** es igual al obtenido con el tratamiento B2.

En la figura 91 se presenta el análisis de varianza y Tukey.

Figura 91

Análisis de varianza del % ELN de cada tratamiento aplicado

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ELN	8	0,78	0,74	5,28

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	262,78	1	262,78	21,03	0,0037
Tratamiento	262,78	1	262,78	21,03	0,0037
Error	74,98	6	12,50		
Total	337,76	7			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=6,11643

Error: 12,4965 gl: 6

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
Avena B1	72,75	4	1,77	A	
Avena B2	61,28	4	1,77	B	

Se rechaza la hipótesis H_0 debido a que el p-valor calculado es 0.0037 menor al de la significancia de 0.05, con un análisis de comparación Tukey a 0.05 de significación se establece que el tratamiento B1 presenta mayor porcentaje de extracto libre de nitrógeno con una media de 72.75, ambos tratamientos B1 y B2 pertenecen a grupos separados.

4.3.9. Validación de la Hipótesis de Mejora de Calidad Para el Forraje de Avena

Una vez realizado el análisis de varianza para cada indicador bromatológico se afirma la hipótesis: el sistema mecatrónico productor de forraje verde hidropónico aplicando software libre e internet de las cosas, permite mejorar la calidad del forraje en fibra y en extractos libres de nitrógeno para la alimentación de cuyes (*cavia porcellus*) de la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy de la parroquia Ascázubi, provincia de Pichincha.

Capítulo V

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Se construyó, en base al diseño mecatrónico, un sistema productor de forraje verde hidropónico para la alimentación de cuyes (*cavia porcellus*) aplicando software libre e internet de las cosas e implementándolo en la Asociación de productores agropecuarios Míster Cuy de la parroquia Ascázubi, provincia de Pichincha.
- Se identificó la situación actual del proceso de producción de forraje verde que realiza manualmente la Asociación y desarrollando la función de calidad QFD se determinó las necesidades y requerimientos de los usuarios.
- Se investigó los sistemas de riego y de control de variables ambientales de temperatura, iluminación, humedad, entre otros; presentes en maquinaria industrial y en proyectos similares que permiten la integración de la agricultura de precisión.
- Se dividió al sistema mecatrónico en cuatro módulos para su diseño, el módulo estructural, de riego, electrónico e IoT, los cuales integrados permitieron supervisar la germinación y desarrollo de forraje verde por medio del Internet de las Cosas IoT.
- Se determinó que la potencia de la máquina la mayor parte del proceso y en modo standby es 27,5 Watts a 110 voltios, sin embargo, en el caso hipotético que se activen todos los actuadores de la máquina su potencia máxima es de 242.3 Watts.
- Con el uso de software libre e IoT a través del protocolo MQTT, el broker Mosquitto, Node-RED y Python se realizó a más del tablero de control físico una

interfaz de control y monitoreo remoto del sistema permitiendo accionar cada actuador del sistema, guardar datos de humedad - temperatura de forma local y en la nube de Google Drive, alarmas por medio de correo electrónico y WhatsApp para mantener informado al agricultor sobre el estado del proceso que se esté realizando

- El sistema implementado integra en una sola máquina el proceso de desinfección, pregerminación, germinación y crecimiento de diferentes tipos de semilla de manera eficiente ya que es fácil de manejar, escalable y modular.
- La estantería y bandejas están construidas en acero inoxidable AISI 430; siendo de grado alimenticio, ayuda a mantener la inocuidad de los alimentos, evita el envenenamiento de los cuyes por el alimento; además, es de fácil limpieza a más de ser resistente física y químicamente.
- Los componentes usados como sensores, actuadores y el sistema de control han sido seleccionados y protegidos de tal forma para ser resistentes a los cambios de temperatura, exposición a líquidos y presión.
- La tarjeta controladora Raspberry Pi 4 B+ es integrable a la complejidad de cada proyecto y prototipo mecatrónico; debido a sus 40 pines multiusos, su sistema operativo e interfaz gráfica.
- Se evaluó el funcionamiento eléctrico, de control, de notificación y almacenamiento de datos IoT del sistema permitiendo depurar errores y satisfaciendo los requerimientos provistos por la Asociación Mister Cuy.
- Se validó la hipótesis de mejora del tiempo de cultivo en base al día de cosecha cuando la planta llega por lo menos a 20 cm de altura, analizando la varianza según el tratamiento aplicado a cuatro tipos de cultivo (maíz, avena, cebada y

trigo) se determinó que en todos los casos se reduce el tiempo de cultivo al usar el sistema implementado.

- La avena es la mejor semilla para producir forraje verde hidropónico según este estudio, ya que presenta un rendimiento de 6.26 kg por cada kg de semilla y su tiempo de cosecha de forma manual en el día 16 se redujo a 14 días empleando el sistema mecatrónico.
- Se efectuó un análisis nutricional de tipo proximal del forraje verde hidropónico de cuatro muestras de avena producida con el tratamiento B1 y cuatro mediante el tratamiento B2, que fueron enviadas al laboratorio especializado del INIAP estación Santa Catalina, con los resultados se validó la hipótesis de mejora de calidad siendo significativo el porcentaje de fibra con una media de 18.65 y en extractos libres de nitrógeno con una media de 61.2.

5.2. Recomendaciones

- Como su nombre lo indica, IoT requiere de internet para realizar varios procesos, en este caso el control y monitoreo remoto, guardar información en la nube, enviar alertas por correo electrónico y WhatsApp, por lo que se recomienda tener un módem con buena conexión a internet.
- Realizar periódicamente el mantenimiento de filtros, tanques, dosificadores y bandeja.
- Llenar los dosificadores de NaClO, solución A y B antes de cada proceso o cuando la máquina lo notifique.
- No mezclar las soluciones A y B sin agua, almacenarlas en un lugar fresco y alejado de la luz para evitar la formación de algas, antes de colocar en los dosificadores agitar bien.

- A pesar de que las medidas de dosificación son las adecuadas según el procedimiento estándar del MAGAP, el PH y la conductividad eléctrica EC de la solución hidropónica preparada pueden variar según el proveedor de las mismas, por lo que, se recomienda usar rangos de PH entre 5.5 a 6.5, EC entre 1.5 mS a 3 mS y total de sólidos disueltos TDS entre 750 ppm a 1500 ppm.
- Se recomienda ubicar la máquina en un ambiente cerrado y de preferencia obscuro para favorecer la germinación y evitar cambios de temperatura, humedad y luz.
- Usar 2.4 kg de semilla por cada bandeja y distribuirla uniformemente, usar semillas de calidad con un alto porcentaje de germinación.
- A pesar que el FVH proviene de varios tipos de semillas, se recomienda usar avena para obtener un máximo rendimiento por cada kilogramo de semilla ya que se desarrolla mejor en climas fríos.
- El sistema implementado a los 14 días genera cosecha de 75 kg de forraje aproximadamente; por lo que para alimentar diariamente a los cuyes se recomienda implementar 13 módulos más.

Bibliografía

- Abarca y otros. (2016). Producción de forraje verde hidropónico para la pequeña agricultura. (J. Carrasco, Ed.) *Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias. s. Boletín INIA N° 321.*
- Adafruit. (13 de Diciembre de 2021). *DHT11, DHT22 and AM2302 Sensors*. Recuperado el 31 de Diciembre de 2021, de cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/dht.pdf
- Agronews. (s.f.). *"Parámetros para evaluar la calidad de los distintos forrajes en la granja" Agropal*. Recuperado el 15 de Junio de 2021, de Agronews Castilla y León: <https://www.agronewscastillayleon.com/parametros-para-evaluar-la-calidad-de-los-distintos-forrajes-en-la-granja-agropal>
- Amazon. (2021). Lámparas para crecimiento. Recuperado el 29 de Diciembre de 2021, de https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/71Yzc4gYTgL._AC_SL1500_.jpg
- Arduino. (2022). *MKR WiFi 1010*. Recuperado el 15 de Enero de 2022, de [docs.arduino.cc: https://docs.arduino.cc/hardware/mkr-wifi-1010](https://docs.arduino.cc/hardware/mkr-wifi-1010)
- Asociación de Productores Agropecuarios Mister Cuy Ascazubi. (10 de Junio de 2019). *Balanceado pelletizado [sic] para cuyes, con ingredientes 100% naturales, no altera el sabor de la carne del cuy*. Obtenido de Facebook: [https://www.facebook.com/permalink.php?story_fbid=2480097975357774&id=2479442008756704&__cft__\[0\]=AZXFNmXos05bPr3m3EUpnJY8P7QEeqEDxuQ0wSw84slvJjgWxv0s8RTtw6Vpt0dIUyISFoD51RVRjPX0kvwJdtisll1NWUG_PfVn78uHEcu5jmr1B-wvrDJuuOp4o-wMzkbuncz_W53M8wNqwES1hHVQ&__tn](https://www.facebook.com/permalink.php?story_fbid=2480097975357774&id=2479442008756704&__cft__[0]=AZXFNmXos05bPr3m3EUpnJY8P7QEeqEDxuQ0wSw84slvJjgWxv0s8RTtw6Vpt0dIUyISFoD51RVRjPX0kvwJdtisll1NWUG_PfVn78uHEcu5jmr1B-wvrDJuuOp4o-wMzkbuncz_W53M8wNqwES1hHVQ&__tn)
- Beltrano, J., & Gimenez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía*. La Plata, Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
Recuperado el 09 de Enero de 2021, de

http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Brito, G. (2019). *Equipos Industriales para Procesar Alimentos: ¿Qué Debes Considerar Antes de Comprarlos?* Obtenido de MetalBoss:

<https://www.metalboss.com.mx/blog/equipos-industriales#:~:text=Caracter%C3%ADsticas%20de%20los%20equipos%20industriales%20para%20alimentos&text=Generalmente%20los%20equipos%20industriales%20se,disponibilidad%20y%20precio%20de%20costo.>

CallMeBot. (20 de Marzo de 2021). *Free API to Send Whatsapp Messages*. Obtenido de callmebot.com: <https://www.callmebot.com/blog/free-api-whatsapp-messages/>

Carámbula, M. (2000). *Las sequías: antes, durante y después*. (H. Sur, Ed.) Montevideo, Uruguay: INIA.

Carbotecnia. (2021). *Bombas dosificadoras*. Recuperado el 1 de Julio de 2021, de Carbotecnia.info: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/bombas-de-agua/bombas-dosificadoras/>

Cardona, J. (26 de Mayo de 2020). *agronet.gov.co*. Obtenido de Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano: <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/La-alimentaci%C3%B3n-estrat%C3%A9gica-promueve-la-sostenibilidad-del-sistema-productivo-del-cuy.aspx#:~:text=La%20poblaci%C3%B3n%20de%20cuyes%20en,47%20millones%20de%20cuyes%20respectivamente.>

Cardona, J. L., Portillo, P. A., Carlosama, L. D., Vargas, J., Avellaneda, Y., Burgos, W. O., & Patiño, R. E. (2020). *Importancia de la alimentación en el sistema productivo del cuy* (1ra ed.). Mosquera, Colombia: AGROSAVIA. Recuperado el 24 de 05 de 2021, de

<http://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/download/54/53/673-2?inline=1>

Casanovas, E. (2022). *Cómo elegir luces para cultivo de interior*. Obtenido de ManoMano: <https://www.manomano.es/consejos/como-elegir-luces-para-cultivo-de-interior-4667>

Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural. (29 de Septiembre de 2020). Agropecuario del Ecuador lidera un modelo participativo validado por una diversidad de actores. Recuperado el 10 de Febrero de 2021, de <https://www.agricultura.gob.ec/seis-ejes-de-politica-convertiran-al-agro-en-el-motor-de-la-economia/>

De Clercq, M., Vats, A., & Biel, A. (2018). *Agriculture 4.0: The future of farming technology*. Dubai: World Government Summit.

Demin, P. (2014). *Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego : métodos de riego: fundamentos, usos y adaptaciones* (1ra ed.). Catamarca: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA.

Diosdado, R. (13 de Abril de 2014). *Resistencias de Pull-Up y Pull-Down*. Obtenido de ZonaMaker: <https://www.zonamaker.com/electronica/intro-electronica/teoria/resistencias-de-pull-up-y-pull-down>

Direct Industry. (2022). *¿Cómo elegir una electroválvula?* Recuperado el 25 de Junio de 2021, de [guide.directindustry: https://guide.directindustry.com/es/que-electrovalvula-elegir/#:~:text=A%20la%20hora%20de%20elegir,en%20un%20%C3%A1rea%20menos%20h%C3%BAmeda](https://guide.directindustry.com/es/que-electrovalvula-elegir/#:~:text=A%20la%20hora%20de%20elegir,en%20un%20%C3%A1rea%20menos%20h%C3%BAmeda).

Electrónica Embajadores. (2018). *Arduino MKR WiFi 1010*. Recuperado el 28 de Junio de 2021, de Electrónica Embajadores: <https://www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/LCA3105/modulo>

s-electronicos/arduino-mkr/arduino-mkr-wifi-1010-modulo-conectividad-wifi-y-autenticacion-criptografica-abx00023

Espinal, J., & Del Castillo, C. (2018). Uso de las luces led en la producción agrícola.

Revista Estudiantil AGRO – VET, 273-276.

Fankerba. (2021). *Solenoid Water Valve*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2021, de

Amazon: https://m.media-amazon.com/images/I/51SSFAQHsiL._SL1001_.jpg

FAO. (2002). *Manual técnico Forraje Verde Hidropónico*. Santiago de Chile:

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO. (2003). *Manual técnico La Huerta Hidropónica Popular* (3ra ed.). Santiago de

Chile: Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Obtenido de

<http://www.fao.org/3/ah501s/ah501s.pdf>

FAO. (2008). *El desarrollo del microrriego en América Central. Oportunidades,*

limitaciones y desafíos. Santiago, Chile: FAO. Obtenido de

<https://www.fao.org/3/aj470s/aj470s00.htm>

FAO. (2016). *ALIMENTACIÓN DE CUYES*. Obtenido de

<http://www.fao.org/3/V5290S/v5290s45.htm>

FAO. (30 de Octubre de 2020). El rol de los gobiernos locales en los procesos de

recuperación económica en el sector agropecuario en un escenario de

pandemia. FAO en Ecuador. Recuperado el 07 de Febrero de 2021, de

<http://www.fao.org/ecuador/noticias/detail-events/es/c/1320388/>

Free Software Foundation. (03 de abril de 2021). *Qué es el software libre*. Obtenido de

<https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html>

Hacedores. (2014). *¿Qué tarjeta de desarrollo elegir?* Recuperado el 19 de Junio de

2021, de Hacedores: [https://hacedores.com/que-tarjeta-de-desarrollo-elegir-](https://hacedores.com/que-tarjeta-de-desarrollo-elegir)

[parte-1/](https://hacedores.com/que-tarjeta-de-desarrollo-elegir)

- Hernández y otros. (2017). Caracterización de arreglos de luces LED como fuentes de iluminación para producción de plántula de *Lactuca sativa* L. en un sistema hidropónico en ambiente controlado. *XLVII Ciclo de seminarios de posgrado* (págs. 80-87). Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León. Obtenido de <http://www.agronomia.uanl.mx/wp-content/uploads/2018/06/XLVII-Ciclo-de-Seminarios-Posgrado-Oto%C3%B1o-2017-MPCA-001856.pdf#page=90>
- Hidroponía Ecuador. (2022). *Soluciones Nutritivas*. Obtenido de HidroponiaEC: <https://hidroponiaec.com/categoria-producto/hidroponia/soluciones-nutritivas/>
- HYDRO ENVIRONMENT S.A. (2021). *Guía: ¿Qué es el riego por nebulización?* Recuperado el 25 de Diciembre de 2021
- HydroEnviroment. (2021). Riego por nebulización. Obtenido de https://hydroenv.com.mx/catalogo/images/00/sistemas_de_riego/riego_por_nebulizacion/Nebulizadores/nebulizador_ht_en_linea_de_riego_fvh_esquema.jpg
- INEC. (2019). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC)*. Quito: Instituto Nacional de Estadística y Censos. Recuperado el 06 de Enero de 2021, de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2019/Boletin%20Tecnico%20ESPAC_2019.pdf
- INIA. (2020). *Manual de crianza de cuyes*. Lima: Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA Perú. Recuperado el 24 de 05 de 2021
- INIAP. (2022). *INFORME DE ENSAYO No: 22-013*. Quito.
- INTECH GmbH. (2022). *Cálculos y selección de tuberías. Diámetro óptimo de tubería*. Recuperado el 1 de Enero de 2022, de intech-gmbh.es: https://intech-gmbh.es/pipelines_calc_and_select/#pipelines_design

- Integrador WT. (2022). *¿Qué es una bomba dosificadora? y ¿Cómo seleccionarla?*
Recuperado el 18 de Junio de 2021, de Integrador WT:
<https://integradorwt.com/que-es-un-bomba-dosificadora-y-como-seleccionarla/>
- KandRSmith.org. (2017). *Compare DHT22, DHT11 and Sensirion SHT71*. Recuperado el 15 de Enero de 2022, de kandrsmith.org:
https://www.kandrsmith.org/RJS/Misc/Hygrometers/calib_dht22_dht11_sht71.htm
|
- López, L. Á. (2005). *Producción de forraje verde hidropónico. (Tesis de especialización)*. Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo. Obtenido de
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/403/1/Luis%20Angel%20Lopez%20Martinez.pdf>
- MAGAP. (2014). *Manual de crianza y producción de cuyes con estándares de calidad*. Quito: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.
- MascotaModa. (2021). *Hidroponicos [sic] y Acuaponicos [sic] [Fotografía]*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2021, de MascotaModa:
<https://www.mascotamoda.com/jardinmoda/hidroponicos-acuaponicos>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (Marzo de 2016). *Cotopaxi: incentivan plan piloto para sistema de cultivo hidropónico de pasto*. Obtenido de
<https://www.agricultura.gob.ec/cotopaxi-incentivan-plan-piloto-para-sistema-de-cultivo-hidroponico-de-pasto/#>
- Mipanelinox. (Marzo de 2018). *¿Qué espesor escoger para mi placa en inox?*
Recuperado el 25 de Junio de 2021, de mipanelinox:
<https://www.mipanelinox.com/blog/que-espesor-escoger-para-mi-placa-en-inox-n32>
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos* (Sexta ed.). Pearson Educación.

- Naylamp Mechatronics. (2021). *NODEMCU V2 ESP8266 WIFI*. Obtenido de naylampmechatronics: [https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/153-nodemcu-v2-esp8266-wifi.html#:~:text=NodeMCU%20ESP8266%20es%20una%20plataforma,de%20las%20cosas%20\(loT\).&text=NodeMCU%20viene%20con%20un%20firmware,el%20puerto%20serial%20\(CP2102\)](https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/153-nodemcu-v2-esp8266-wifi.html#:~:text=NodeMCU%20ESP8266%20es%20una%20plataforma,de%20las%20cosas%20(loT).&text=NodeMCU%20viene%20con%20un%20firmware,el%20puerto%20serial%20(CP2102)).
- NOVAGRIC. (2016). Microaspersores [Fotografía]. Recuperado el 28 de Diciembre de 2021, de <https://www.novagric.com/images/riego/aspersion/micro1.jpg>
- Ortiz, W. (2012). *Crianza de cuyes con forraje verde hidropónico [Diapositiva de PowerPoint]*. Obtenido de SliderShare: <https://pt.slideshare.net/alfvigo/crianza-de-cuyes-con-forraje-verde-hidropnico/12>
- PLASTIGAMA. (2019). *Tanques Plastigama*. Obtenido de Wavin: <https://www.wavin.com/es-ec/-/media/project/fluent/mexichem-wavin/wavin-corporate/ecuador/images/predial/tanques.pdf>
- Portilla, I. (31 de 01 de 2021). Datos Asociación de productores agropecuarios mister cuy Ascazubi. (F. Álvarez, & E. Quijije, Entrevistadores) Pichincha, Ecuador.
- Quispe, S. A. (2015). *Manejo técnico de la crianza de cuyes en la sierra del Perú*. Arequipa: Programa PRA Buenaventura. Recuperado el 24 de 05 de 2021
- Raspberry Pi. (2022). *Raspberry Pi 4*. Recuperado el 25 de Enero de 2022, de raspberrypi.com: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- RIVAL. (2018). *Tuberías PVC para presión tipo roscable*. Obtenido de Plásticos RIVAL: https://www.plasticosrival.com/files/products/pvc/catalogues/PR_PVC_PresionTipoRoscaable.pdf
- Rivero, N. (2018). *Mantenimiento y Manejo de Invernaderos*. AGAH0108 (2da ed.). Antequera: IC Editorial.

- Rocha Vargas, M. E. (s.f.). *Software libre*. Obtenido de Tecnicatura en Gestión Universitaria FCE UNC: <https://oftgu.eco.catedras.unc.edu.ar/unidad-1/software-libre-y-propietario/software-libre/>
- Romero y otros. (2009). Producción de Forraje Verde Hidropónico y su Aceptación en Ganado Lechero. *Redalyc, IX*, 11-19. doi:10.15174/au.2009.93
- Romeva, C. R. (2002). *Diseño concurrente*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Romeva, C. R. (2008). *Selección de materiales en el diseño de máquinas* (Primera ed.). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Rose, K. (2015). *La internet de las cosas*. octubre.
- Sinchiguano, M. M. (2008). *Producción de forraje verde hidropónico de diferentes cereales (avena, cebada, maíz, trigo y vicia) y su efecto en la alimentación de cuyes*. Riobamba: ESPOCH.
- Sparkfun. (Julio de 2008). *Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15) Humidity and Temperature Sensor*. Recuperado el 26 de Julio de 2021, de Sparkfun.com: https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/SHT1x_datasheet.pdf
- Vazquez Electronics. (10 de junio de 2021). COMO INSTALAR MOSQUITTO MQTT EN UN RASPBERRY PI 4 !!!! [video]. Youtube. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=j37TQfRjktc>
- Winecta. (12 de Diciembre de 2019). *Internet de las Cosas*. Obtenido de <https://www.winecta.com/internet-de-las-cosas-ventajas-desventajas/>
- Zaldívar, L. C. (1997). *Producción de cuyes (Cavia porcellus)*. La Molina, Perú: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado el 24 de 05 de 2021

Anexos