



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**TEMA:**

“DESARROLLO DE UN ENTORNO IOT PARA LA PRODUCCIÓN INTERIOR DE FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO MEDIANTE EL CONTROL DE LUZ, CLIMA Y AGUA”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en  
Telecomunicaciones

**Línea de investigación:** Desarrollo, aplicación de software, Innovación Tecnológica y de Productos.

**AUTOR:**

Pablo Steven Ulcuango Necpas

**DIRECTOR:**

MSc. Jaime Roberto Michilena Calderón

**Ibarra – Ecuador 2026**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	<b>DE</b>	1751764430	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	<b>Y</b>	ULCUANGO NECPAS PABLO STEVEN	
<b>DIRECCIÓN:</b>		PICHINCHA-CAYAMBE-OLMEDO	
<b>EMAIL:</b>		<a href="mailto:psulcuangon@utn.edu.ec">psulcuangon@utn.edu.ec</a>	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>		<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0983987044

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	“Desarrollo de un entorno IoT para la producción interior de forraje verde hidropónico mediante el control de luz, clima y agua”
<b>AUTOR (ES):</b>	ULCUANGO NECPAS PABLO STEVEN
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	27/02/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Telecomunicaciones
<b>DIRECTOR:</b>	MSc. JAIME ROBERTO MICHILENA CALDERON
<b>ASESOR:</b>	MSc. LUIZ EDILBERTO SUÁREZ ZAMBRANO

## **2. CONSTANCIAS**

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 27 días del mes de febrero de 2026

**EL AUTOR:**

.....

Ulcuango Necpas Pablo Steveen



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CERTIFICACIÓN**

MAGISTER JAIME MICHILENA, DIRECTOR DEL PRESENTE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA:

Que el presente trabajo de Titulación “DESARROLLO DE UN ENTORNO IOT PARA LA PRODUCCIÓN INTERIOR DE FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO MEDIANTE EL CONTROL DE LUZ, CLIMA Y AGUA”, ha sido desarrollado por el señor Ulcuango Necpas Pablo Steven bajo mi supervisión.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

.....

MSc. Jaime Michilena Calderón

**DIRECTOR**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo con todo mi corazón a la memoria de mi amado padre, Vinicio Quilo, quien desde el cielo ha sido mi fuerza silenciosa, mi guía espiritual y mi mayor inspiración para no rendirme. Su recuerdo ha sido el motor que me impulsó en los momentos de mayor dificultad.*

*A mi querida madre, Maura Necpas, el ser que más adoro en este mundo, por su amor puro e incondicional, por su gran ejemplo de lucha y sacrificio, y por ser mi pilar constante en cada paso de este camino.*

*A mis hermanos, Maite y Sayani, que siempre están presentes en cada momento de tristeza y de felicidad.*

*A mis abuelitos, Pablo y Úrsula, por haber sembrado en mí los valores de la humildad, el respeto y el esfuerzo, y por su cariño inmenso que siempre ha sido refugio y motivación.*

*A mis compañeros más cercanos, con quienes compartí desvelos, aprendizajes y risas durante este proceso. Su amistad y compañía han sido fundamentales.*

*Y a todos quienes me apoyaron, de una u otra forma, en esta etapa tan importante de mi vida. Este logro también les pertenece.*

*Ulcuango Necpas Pablo Steven*



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**AGRADECIMIENTO**

*Agradezco profundamente a Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, por acompañarme en cada paso de este camino. En los momentos de duda, incertidumbre o cansancio, su presencia me dio consuelo y dirección. Sin Su guía y bendición, este logro no habría sido posible. A Él encomiendo cada fruto de mi esfuerzo, con humildad y gratitud.*

*A mis amados padres, Vinicio Quilo, a quien siempre llevo en mi corazón y memoria, y Maura Necpas, por ser el fundamento de mi vida. A mi padre, por enseñarme con su ejemplo de trabajo y nobleza que los grandes logros requieren sacrificios sinceros. A mi madre, por su amor incondicional, sus palabras de aliento, su apoyo en los momentos más difíciles y su incansable lucha para que yo pudiera cumplir mis sueños. Este triunfo también es suyo.*

*A la Universidad Técnica del Norte, por haberme acogido durante estos años de formación profesional. Agradezco profundamente a esta institución por proporcionarme las herramientas académicas necesarias para crecer y avanzar, así como por fomentar en mí el pensamiento crítico, el espíritu de superación y el compromiso con la sociedad. Aquí viví experiencias que marcaron mi vida personal y profesional de forma positiva y duradera.*

*Al Ing. Jaime Michilena, director de esta tesis, expreso mi sincero agradecimiento por su acompañamiento constante, su exigencia académica, su orientación clara y por compartir conmigo sus valiosos conocimientos con paciencia y dedicación. Su guía fue determinante para*

*dar forma a este trabajo y convertir una idea en un proyecto concreto y significativo. Su apoyo ha sido invaluable para alcanzar este resultado.*

*Al Ing. Luis Suárez, asesor de esta investigación, manifiesto mi profundo agradecimiento por su valiosa orientación técnica, su disposición permanente para atender cada consulta y sus acertadas observaciones que fortalecieron el rigor académico del trabajo. Su acompañamiento oportuno permitió consolidar este proyecto con mayor solidez y coherencia, aportando claridad en los momentos clave del proceso investigativo.*

*Ulcuango Necpas Pablo Steven*



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**RESUMEN**

El presente trabajo de titulación propone el diseño e implementación de un sistema automatizado basado en arquitectura IoT para la producción interior de forraje verde hidropónico, orientado al monitoreo y control de variables ambientales críticas como temperatura, humedad e iluminación. La propuesta surge ante la necesidad de optimizar la producción frente a las limitaciones del método tradicional, el cual presenta variabilidad en las condiciones de cultivo y menor eficiencia productiva.

La metodología aplicada comprendió el análisis de requerimientos, diseño del sistema, implementación de una red de adquisición de datos, desarrollo de lógica de control automatizada y validación experimental mediante pruebas comparativas entre el sistema tradicional y el sistema asistido por IoT. El entorno desarrollado integró monitoreo continuo, almacenamiento de datos y control automatizado del riego por microaspersión e iluminación, permitiendo mantener condiciones ambientales estables durante todo el ciclo productivo.

Los resultados experimentales evidenciaron una mejora significativa en el rendimiento del cultivo. El sistema IoT alcanzó un peso promedio de 5.70 kg por bandeja frente a los 4.45 kg obtenidos mediante el método tradicional, representando un incremento del 28.1% en la producción de biomasa. En términos de crecimiento longitudinal, se registró una altura de entre 26 y 30 cm en un periodo de 12 días, superando los 20 cm del sistema convencional. Estos resultados confirman que el control ambiental automatizado reduce el estrés hídrico y térmico, optimizando la conversión de la semilla en biomasa aprovechable.

En conclusión, el sistema implementado demuestra que la integración de tecnologías IoT en la producción de forraje verde hidropónico permite incrementar la eficiencia productiva, mejorar la uniformidad del cultivo y establecer una base tecnológica escalable para futuras ampliaciones en entornos de agricultura controlada.

**Palabras clave:**

Forraje verde hidropónico, Internet de las Cosas, sensores, agricultura inteligente, riego automatizado, microcontroladores, clima controlado, IoT, producción sostenible.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**ABSTRACT**

This degree project proposes the design and implementation of an automated system based on IoT architecture for the indoor production of hydroponic green forage, aimed at monitoring and controlling critical environmental variables such as temperature, humidity, and lighting. The proposal arises from the need to optimize production in response to the limitations of the traditional method, which exhibits variability in growing conditions and lower productive efficiency.

The applied methodology included requirements analysis, system design, implementation of a data acquisition network, development of automated control logic, and experimental validation through comparative tests between the traditional system and the IoT-assisted system. The developed environment integrated continuous monitoring, data storage, and automated control of micro-sprinkler irrigation and lighting, allowing for stable environmental conditions throughout the entire production cycle.

Experimental results showed a significant improvement in crop yield. The IoT system achieved an average weight of 5.70 kg per tray compared to the 4.45 kg obtained via the traditional method, representing a 28.1% increase in biomass production. In terms of longitudinal growth, a height between 26 and 30 cm was recorded over a 12-day period, surpassing the 20 cm achieved by the conventional system. These results confirm that automated environmental control reduces water and thermal stress, optimizing the conversion of seed into usable biomass.

In conclusion, the implemented system demonstrates that the integration of IoT technologies in hydroponic green forage production increases productive efficiency, improves crop uniformity, and establishes a scalable technological foundation for future expansions in controlled environment agriculture.

**Keywords:**

Hydroponic green fodder, Internet of Things, sensors, smart agriculture, automated irrigation, microcontrollers, controlled climate, IoT, sustainable production.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo I: Antecedentes.....	1
1.1. Tema .....	1
1.2. Problema .....	1
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4. Alcance .....	3
1.5. Justificación .....	6
Capítulo II: Estado del Arte .....	8
2.1. Pastos naturales .....	9
2.1.1. Tipos de pastos naturales .....	9
2.1.1.1. Pastizales templados .....	9
2.1.1.2. Pastizales tropicales y subtropicales .....	9
2.2. Hidroponía .....	9
2.2.1. Forraje verde Hidropónico (FVH) .....	10
2.2.2. Componentes de un sistema productor de FVH tecnificado.....	10
2.2.2.1. Estructura de Estantes .....	10
2.2.2.2. Bandejas de producción .....	10
2.2.2.3. Sistemas de Iluminación artificial.....	11
2.2.2.4. Dispositivos de Medida.....	11

2.2.2.5. Actuadores .....	11
2.3 Proceso de Producción de FVH .....	13
2.3.1 Selección de semillas .....	13
2.3.2 Lavado de las semillas .....	13
2.3.3 Pre-germinación.....	13
2.3.4 Siembra .....	14
2.3.5 Germinación.....	14
2.3.6 Crecimiento.....	14
2.3.7 Cosecha.....	14
2.3.8. Usos del FVH.....	15
2.4. Factores y Requerimientos determinantes del FVH.....	15
2.4.1. Adecuada selección de semillas .....	15
2.4.2 Temperatura .....	16
2.4.3 PH del agua de riego .....	16
2.4.4 Tipo de riego .....	16
2.4.5 Cantidad y tiempos de riego .....	17
2.4.6 Ventajas de la Producción de FVH.....	18
2.4.7 Desventajas de la Producción de FVH.....	19
2.5. Internet de las Cosas (IoT).....	20
2.5.1. Arquitectura IoT.....	20
2.5.2 Protocolos de comunicación IoT .....	22

2.5.3 Algoritmos .....	24
2.5.4. Ventajas de IoT .....	25
2.5.5. Desventajas de IoT.....	26
2.5.6. IoT en la Agricultura 4.0.....	26
2.5.7. Cultivos hidropónicos como aplicaciones .....	28
2.5.7.1. Producción de Alimentos en Entornos Urbanos y Suburbanos .....	28
2.5.7.2. Sostenibilidad y Uso Eficiente de Recursos .....	28
2.5.7.3. Investigación y Desarrollo de Técnicas Agrícolas Avanzadas .....	28
2.6. Hardware .....	28
2.6.1. Microcontroladores .....	29
2.6.2. Sensores.....	30
2.7. Software Libre .....	30
2.7.1. Placas de desarrollo de software libre .....	31
2.7.2 Lenguajes de Programación.....	32
Capítulo III: Diseño del Sistema.....	33
3.1 Metodología .....	34
3.2 Etapa de Análisis.....	36
3.2.1 Situación Actual de la Producción de Forraje.....	36
3.3.1 Requerimientos de Stakeholders.....	38
3.3.2 Requerimientos Funcionales del Sistema .....	40
3.3.3 Requerimientos de Arquitectura .....	41

3.3.4 Diagrama de Arquitectura.....	43
3.4 Selección del Hardware y Software del Sistema .....	44
3.4.1 Selección de Hardware para nodo Sensor.....	44
3.4.2 Selección de Microcontrolador .....	45
3.4.3 Selección de Sensores .....	46
3.4.4 Selección de Sensor de Temperatura y humedad .....	47
3.4.5 Selección de Electroválvula.....	49
3.4.6 Selección del Software de Gestión para Nodos Sensores.....	49
3.4.7 Selección de Tecnología Inalámbrica de corto alcance .....	51
3.4.8 Selección de Hardware para Nodo Central (Gateway).....	52
3.4.9 Selección de Microcontrolador para Nodo Central .....	53
3.4.10 Selección del Software para la Nodo Central .....	54
3.4.11 Selección del Software para Microcontrolador Raspberry Pi 4.....	55
3.4.12 Selección del Software para Almacenamiento y Visualización de Datos	56
3.5 Etapa de Diseño .....	57
3.5.1 Construcción de Estructura para bandejas de FVH .....	59
3.5.2 Construcción del Entorno IoT para FVH.....	60
3.5.3 Diagrama de Conexiones en Nodo Sensor 1.....	61
3.5.4 Diagrama de Conexiones en Nodo Sensor 2.....	62
3.5.5 Diagrama de Conexiones del Nodo Central Gateway .....	63
3.5.6. Diagrama de flujo de nodo central Gateway.....	64

3.5.7. Diagrama de flujo de nodo sensor secundario .....	66
3.6 Calibración y lectura de datos mediante sensores.....	67
3.6.1 Adquisición de Datos de Temperatura y Humedad Ambiental .....	67
3.6.2 Adquisición de Datos de Luminosidad .....	68
3.7 Desarrollo de la Programación del Sistema .....	70
3.7.1 Lectura de datos de temperatura del sensor DHT22.....	70
3.7.2 Lectura de datos del sensor BH1750 .....	72
3.7.4 Programación de lógica para horarios de activación de luminosidad.....	78
3.7.5 Programación de Sincronización con el tiempo de ciclo .....	81
3.7.6 Plataforma de Gestión de Node-RED .....	83
3.7.4 Almacenamiento de datos mediante Node-RED .....	84
3.7.5 Recepción de datos mediante FIREBASE.....	87
3.7.6 Conexión de Node-RED con FIREBASE .....	91
3.7.7 Diseño de App Móvil mediante Firebase y Flutter .....	93
Capítulo IV: Pruebas de Funcionamiento .....	100
4.2. Implementación de bandejas para cultivo.....	101
4.3 Implementación del sistema de riego.....	103
4.4 Implementación Electrónica del sistema .....	107
4.4.1 Implementación del nodo 1 .....	108
4.4.2 Implementación del nodo 2.....	110
4.5 Verificación de configuración de nodos .....	112

4.5.1 Verificación nodo sensor 1 – Riego.....	113
4.5.2 Verificación nodo sensor 2 – Luz.....	115
4.5.3 Verificación nodo central Gateway .....	116
4.5.4 Validación del Sistema de Monitoreo en Tiempo Real .....	118
4.5.5 Validación del Sistema App Movil.....	120
4.6 Pruebas de Funcionamiento de los nodos .....	120
4.6.1 Prueba de Funcionamiento Nodo 1 .....	121
4.6.2 Prueba de funcionamiento Nodo 2.....	122
4.6.3 Prueba de funcionamiento Panel Led para cultivo .....	124
4.6.4 Medición de Parámetros del Estado del Cultivo Tradicional de FVH.....	126
4.7. Etapa de evaluación de resultados .....	127
4.7.1 Análisis de cultivo FVH tradicional .....	128
4.7.2 Análisis de cultivo FVH con arquitectura IoT.....	134
4.8 Comparativa del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT .....	140
4.8.1 Comparativa de Altura del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT .....	141
4.8.2 Comparativa del Peso del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT.....	142
4.8.3 Comparativa de Rendimiento del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT .....	144
4.8.4 Evolución de Altura del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT .....	145
4.8.4 Evolución de Peso del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT .....	147
4.9 Costos del sistema.....	149
4.9.1 Costos de Hardware .....	149

4.9.2 Costos de Infraestructura .....	150
4.9.3 Costos de Ingeniería.....	152
4.9.4 Costos de Software .....	153
4.9.5 Costo Global del Sistema.....	154
4.10 Beneficios del Sistema.....	154
Conclusiones y Recomendaciones .....	156
Conclusiones .....	156
Recomendaciones .....	157
Bibliografía .....	159
Anexos .....	162

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Arquitectura IoT.....	5
<b>Figura 2.</b> Arquitectura de capas de IoT.....	21
<b>Figura 3.</b> Metodología en cascada .....	34
<b>Figura 4.</b> Lugar de instalación de entorno FHV .....	37
<b>Figura 5</b> Diagrama de arquitectura del sistema .....	43
<b>Figura 6</b> Microcontrolador ESP32 de 38 pines.....	46
<b>Figura 7</b> Selección de sensor de temperatura y humedad ambiental .....	47
<b>Figura 8</b> Sensor de Temperatura y Humedad DHT 22 .....	48
<b>Figura 9</b> Electroválvula Solenoide 12v.....	49
<b>Figura 10</b> IDE de Arduino .....	51

<b>Figura 11</b> Selección de Raspberry Pi 4 para Nodo Central (Gateway) .....	54
<b>Figura 12</b> Interface del Sistema Operativo Raspberri Pi OS .....	55
<b>Figura 13</b> Selección de Plataforma para el Almacenamiento y Visualización de Datos .....	56
<b>Figura 14</b> Entorno IoT para producción FVH .....	58
<b>Figura 15</b> Diseño de Estructura Vista Frontal .....	60
<b>Figura 16</b> Diseño de Estructura Vista Lateral.....	60
<b>Figura 17</b> Diagrama de Conexiones del Nodo Sensor 1 .....	62
<b>Figura 18</b> Diagrama de Conexiones del Nodo Sensor 2.....	63
<b>Figura 19</b> Diagrama de Conexiones del Nodo Central Gateway.....	64
<b>Figura 20</b> Diagrama de flujo de Nodo Central .....	65
<b>Figura 21</b> Diagrama de flujo de nodo sensor secundario.....	66
<b>Figura 22</b> Conexión de esp32 y sensor DHT22.....	68
<b>Figura 23</b> Conexión de sensor de luz BH1750 .....	69
<b>Figura 24</b> Librerías del sensor DHT22 .....	71
<b>Figura 25</b> Lectura e impresión de datos del sensor DHT22 .....	71
<b>Figura 26</b> Tiempo de toma de datos (15 minutos).....	72
<b>Figura 27</b> Librerías del sensor BH1750.....	73
<b>Figura 28</b> Lectura e impresión de datos del sensor BH1750 .....	74
<b>Figura 29</b> Tiempo de toma de datos (15 min).....	75
<b>Figura 30</b> Estructura de datos para riego .....	76
<b>Figura 31</b> Calendario de horarios para el riego.....	76
<b>Figura 32</b> Selección de Programación de Riego.....	77
<b>Figura 33</b> Sincronización del día de ciclo.....	79
<b>Figura 34</b> Cronograma de activación de Luz artificial .....	80

<b>Figura 35</b>	Persistencia de datos del sistema.....	81
<b>Figura 36</b>	Protocolo NTP y registro.....	82
<b>Figura 37</b>	Referencia temporal del sistema.....	83
<b>Figura 38</b>	Flujo de Node-RED .....	84
<b>Figura 39</b>	Flujo para el almacenamiento de datos .....	85
<b>Figura 40</b>	Modelo de almacenamiento relacional.....	86
<b>Figura 41</b>	Base de datos en la nube Firebase .....	87
<b>Figura 42</b>	Establecimiento de reglas de permisos.....	88
<b>Figura 43</b>	Estructura de Datos .....	89
<b>Figura 44</b>	Árbol de Datos Nodo Sensor 1.....	90
<b>Figura 45</b>	Árbol de Datos Nodo Sensor 2.....	90
<b>Figura 46</b>	Estructurada las variables.....	91
<b>Figura 47</b>	Flujo para conexión con Firebase.....	92
<b>Figura 48</b>	Método "PATCH" .....	92
<b>Figura 49</b>	Método "POST" .....	93
<b>Figura 50</b>	Paquetes para main.dart.....	94
<b>Figura 51</b>	Método para servicios asíncronos .....	95
<b>Figura 52</b>	Estructura de ruta.....	95
<b>Figura 53</b>	Escucha permanentemente al nodo seleccionado.....	96
<b>Figura 54</b>	Conversión dinámica del objeto JSON .....	96
<b>Figura 55</b>	Interfaz App Móvil preliminar .....	98
<b>Figura 56</b>	Estructura metálica de Forraje Verde Hidropónico.....	101
<b>Figura 57</b>	Bandeja para cultivo FVH.....	102
<b>Figura 58</b>	Bomba de Agua de 1/2 hp .....	104
<b>Figura 59</b>	Sistema de activación de bomba de agua .....	105

<b>Figura 60</b> Distribución de nebulizadores.....	106
<b>Figura 61</b> Implementación de los nodos en el entorno IoT .....	108
<b>Figura 62</b> Implementación del Nodo Sensor 1 .....	109
<b>Figura 63</b> Elementos del circuito del Nodo Sensor 1 .....	110
<b>Figura 64</b> Implementación del Nodo Sensor 2 .....	111
<b>Figura 65</b> Elementos del circuito del Nodo Sensor 2 .....	112
<b>Figura 66</b> Modelo de esp32 y puerto .....	113
<b>Figura 67</b> Establecimiento de comunicación wifi.....	114
<b>Figura 68</b> Establecimiento de comunicación MQTT.....	114
<b>Figura 69</b> Inicialización de Nodo Sensor 1.....	115
<b>Figura 70</b> Establecimiento de comunicación WIFI y MQTT.....	115
<b>Figura 71</b> Inicialización del Nodo Sensor 2.....	116
<b>Figura 72</b> Recepción de datos en la Raspberry pi 4.....	117
<b>Figura 73</b> Estados de Actuadores y datos de Temperatura.....	118
<b>Figura 74</b> Datos de Luminosidad.....	119
<b>Figura 75</b> Datos de Humedad .....	119
<b>Figura 76</b> Interfaz de App Móvil para Monitoreo .....	120
<b>Figura 77</b> Captura de datos del Nodo Sensor 1 .....	122
<b>Figura 78</b> Captura de datos del Nodo Sensor 2 .....	123
<b>Figura 79</b> Registro de datos en la Base de datos de SQLITE.....	124
<b>Figura 80</b> Panel led para cultivo .....	125
<b>Figura 81</b> Vista lateral del Panel led para cultivo.....	126
<b>Figura 82</b> Longitud de FVH cumplido el ciclo (día 12) .....	130
<b>Figura 83</b> Coloración del FVH cumplido el ciclo (día 12).....	131
<b>Figura 84</b> Frondosidad del tapete de FVH.....	132

<b>Figura 85</b> Peso del FVH tradicional .....	133
<b>Figura 86</b> Longitud del FVH con el sistema IoT .....	136
<b>Figura 87</b> Coloración del FVH con el sistema IoT.....	137
<b>Figura 88</b> Frondosidad del FVH con el sistema IoT.....	138
<b>Figura 89</b> Peso final del FVH con Arquitectura IoT .....	139
<b>Figura 90</b> Comparativa de altura del forraje entre cultivo tradicional y el sistema IoT .....	142
<b>Figura 91</b> Comparativa de peso del forraje entre cultivo tradicional y el sistema IoT .....	143
<b>Figura 92</b> Comparativa de eficiencia del forraje entre cultivo tradicional y el sistema IoT.....	145
<b>Figura 93</b> Comparativa de crecimiento del forraje entre cultivo tradicional y el sistema IoT.....	146
<b>Figura 94</b> Comparativa de cantidad de biomasa del forraje entre cultivo tradicional y el sistema IoT.....	147

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Tipos de Actuadores .....	12
<b>Tabla 2</b> Nomenclatura de Requerimientos.....	38
<b>Tabla 3</b> Funciones de Stakeholders.....	39
<b>Tabla 4</b> Requerimientos por parte de Stakeholders .....	39
<b>Tabla 5</b> Requerimientos del Sistema.....	40
<b>Tabla 6</b> Requerimientos de Arquitectura .....	42
<b>Tabla 7</b> Selección de Microcontrolador para Nodo Sensor .....	45
<b>Tabla 8</b> Selección de Software para Nodo Sensor .....	50
<b>Tabla 9</b> Selección de Tecnologías Inalámbricas .....	51
<b>Tabla 10</b> Rangos ambientales para cultivo de FVH.....	127
<b>Tabla 11</b> Costos de Hardware .....	149
<b>Tabla 12</b> Costos de Infraestructura .....	150
<b>Tabla 13</b> Costos de Ingeniería.....	152
<b>Tabla 14</b> Costos de Software .....	153
<b>Tabla 15</b> Costos Global del Sistema .....	154

## Capítulo I: Antecedentes

### 1.1. Tema

Desarrollo de un entorno IOT para la producción interior de forraje verde hidropónico mediante el control de luz, clima y agua.

### 1.2. Problema

El cambio climático es uno de los principales factores para que se genere el aumento de temperaturas en todo el globo terrestre, por lo que según (EpData, 2023) en el año 2022 terminó como el quinto más cálido a nivel mundial desde que hay registros y el octavo consecutivo en el que la temperatura media global supera en 1 grado centígrado (°C) el valor medio previo a la revolución industrial (1850).

La Organización Meteorológica Mundial predijo en julio de 2020 que la temperatura media anual mundial subirá al menos 1 grado centígrado (°C) hasta el año 2025 respecto a los niveles preindustriales. El mes de junio de 2020 fue uno de los más calurosos del siglo, casi igualando el récord marcado por el de 2019. La temperatura media global podría aumentar hasta 1,5°C entre los años 2030 y 2052 si el calentamiento global continúa avanzando a su ritmo actual, según el Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (EpData, 2023).

En Ecuador también se ve afectado por el cambio climático, al tener solo dos temporadas climáticas, estas se pueden prolongar o acortar las mismas. Según (Godoy & Amen, 2018) que hacia 2020 la temperatura media presentaría un incremento de alrededor 1°C en el 70% del Ecuador continental, sobre todo en la Sierra y la Amazonía. Hacia 2050, este aumento llegaría a 1,8°C en el promedio nacional y afectaría mayormente las regiones interiores (Sierra y Amazonía).

Se presenta el caso de los veranos que cada año se han ido prolongando, por lo cual genera que la ausencia de lluvia que es de suma importancia para el desarrollo de pastos de forraje. Lo que provoca la escasez de alimento, mala calidad del forraje y en el peor de los escenarios el forraje muere. La influencia de la insuficiente cantidad de forraje en animales de pastoreo está directamente ligada en su producción, ya que disminuyen su peso, son propensos a enfermedades, mala calidad de sus productos o por última instancia la muerte del mismo.

Entre 2016 y 2017, la extensión de pastos cultivados a nivel nacional experimentó un aumento del 6%. El tipo de pasto más comúnmente cultivado es el pasto Saboya, que abarca el 41.23% de la superficie total a nivel nacional.

Notablemente, la región Costa es donde se encuentra la mayoría de la superficie plantada de pasto Saboya, con una participación del 94.01% (Salazar et al., 2017).

Con el contexto mencionado se propone la implementación de un entorno IoT para la producción interior de forraje verde hidropónico. El mismo forraje que implica poner semillas que han germinado en bandejas ubicadas dentro de invernaderos con condiciones controladas. Estos entornos favorecen el crecimiento rápido de las plantas, lo que facilita la producción de forrajes con un alto contenido nutricional (León et al., 2018). El entorno se basa mediante el uso del control y monitorización de la cantidad lumínica óptima, la temperatura apropiada y el horario y la cantidad de agua que se debe suministrar al forraje. Dichas variables serán almacenadas y procesadas para la mejor toma de decisiones en beneficio del forraje y controlar adversidades en la producción.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo General***

Implementar un entorno IoT basado en redes de sensores, de forma que se pueda controlar aspectos de clima como luz, agua y temperatura para la producción interior de forraje verde hidropónico (FVH), con la finalidad de abastecer de alimento para animales de pastoreo.

#### ***1.3.2. Objetivos Específicos***

- Realizar un análisis teórico sobre las implicaciones de la falta del forraje para animales de pastoreo mediante una investigación bibliográfica, de modo que se pueda conseguir bases sólidas para el desarrollo del proyecto.
- Establecer los requerimientos tanto de hardware como de software para asegurar un eficiente funcionamiento del sistema a implementarse.
- Diseñar un sistema inteligente mediante tecnología IoT que permita el desarrollo y monitoreo de la germinación de forraje verde hidropónico.
- Realizar las pruebas de operatividad del sistema con el fin de presentar los resultados de manera que se pueda validar el propósito del proyecto.

### **1.4. Alcance**

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo principal el planteamiento de una solución factible a la falta de forrajes para la alimentación de animales de pastoreo, provocado por el calentamiento global haciendo que los veranos sean más extenso, por lo cual, el agua de lluvia sea escasa y de forma directa afecta a los forrajes y no tengan su mayor producción. Motivo por el cual se procede a implementar un entorno IoT para la producción interior de forraje verde hidropónico, mediante el control preciso de variables climáticas como la luz, el agua y la temperatura. El contexto de esta investigación se encuentra enmarcado por

la problemática global del cambio climático y sus consecuencias directas en la agricultura, especialmente en países como Ecuador, donde los largos veranos y la escasez de agua afectan negativamente el crecimiento de pastos necesarios para la alimentación de animales de pastoreo.

El enfoque del proyecto tiene características de procesos secuenciales. Por consiguiente, se hace el uso de la metodología en Cascada propuesta por Winston W. Royce en 1970. El modelo en cascada, también denominado modelo secuencial, representa una metodología de desarrollo de proyectos que surgió en el ámbito de la ingeniería civil. Este enfoque favorece el control detallado de los procesos y las tareas (Hadida & Troilo, 2020).

### **Fase I: Investigación y análisis**

En primera instancia se tendrá una fase de una investigación y análisis de manera profunda, en donde se pueda determinar todos los aspectos que conforma el correcto crecimiento del Forraje Verde Hidropónico, teniendo presente las variables de luminosidad, temperatura y cantidad de agua.

### **Fase II: Requerimientos**

El proceso de investigación permitirá tener bases sólidas del contexto a desarrollar, y así seleccionar de forma objetiva los materiales como los sensores, los mismos que serán los que ayuden con los datos de las variables ya mencionadas. Al ser un entorno cerrado se puede trabajar con tecnología 802.11. El cual permitirá la transmisión de datos del entorno IoT, que a posterior será almacenada y procesada en una plataforma de gestión en la nube.

### **Fase III: Diseño e implementación**

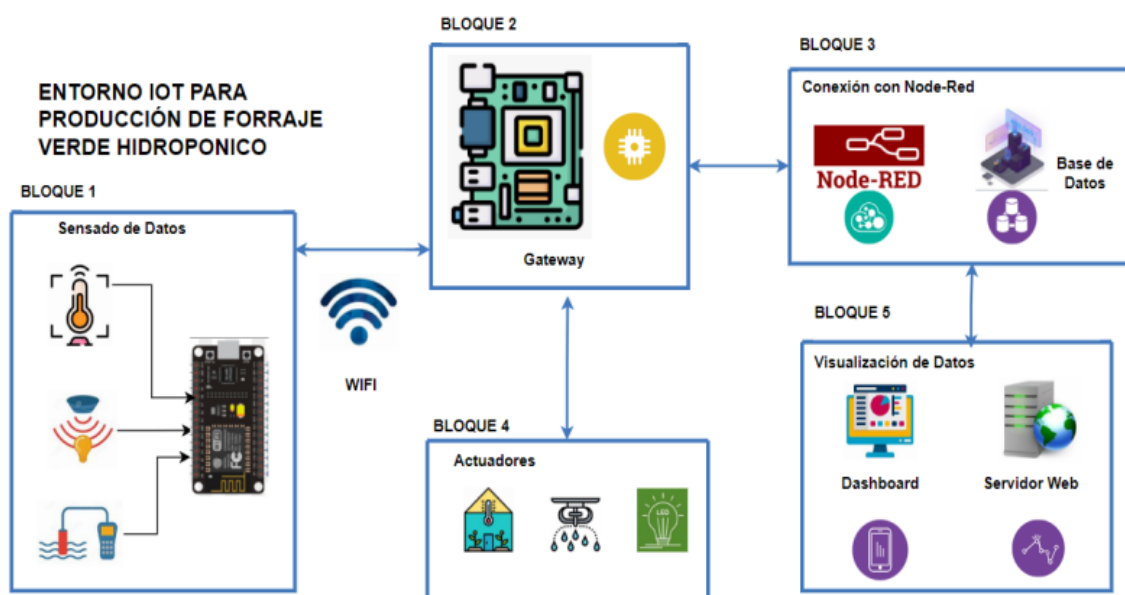
Después de reconocer la tecnología de comunicación 802.11 y los sensores encargados de recopilar información sobre la luminosidad, temperatura y agua a que son aspectos que influyen en los cultivos de FVH, se avanza en la creación de una red de sensores inalámbricos

(WSN) distribuida de manera estratégica dentro del entorno. Esto se hace con el objetivo de capturar datos relacionados con las variables mencionadas.

Una vez que se haya analizado y determinado la posición propicia para recopilar información sobre el forraje, se inicia el proceso de ajuste de los sensores elegidos para brindar una garantía en las mediciones exactas y fiables de las variables.

Después de analizar y confirmar las condiciones, así como haber elegido la tecnología inalámbrica a utilizar, se procede al desarrollo de un sistema de comunicación que emplea dicha tecnología. Este sistema tiene como objetivo transmitir los datos de las variables desde los nodos sensores hasta la estación central o Gateway. Posteriormente, transporta estos datos a la plataforma de gestión y los almacena en su base de datos. Este proceso permite procesar y visualizar los datos de manera inmediata a través de un Dashboard, facilitando así la gestión del sistema de monitoreo para el desarrollo del FVH.

**Figura 1**  
*Arquitectura IoT*



*Fuente: Autoría*

## **Fase VI: Evaluación y análisis**

La evaluación del rendimiento del sistema IoT implementado implica analizar indicadores clave, incluyendo el rendimiento de los cultivos, la eficiencia en el uso del agua, el impacto de la cantidad de luz necesaria, los costos de producción y la calidad de los forrajes. Esta evaluación se llevará a cabo mediante la comparación de los resultados obtenidos con un cultivo de Forraje Verde Hidropónico tradicional, sin la incorporación de tecnología.

El propósito es demostrar la factibilidad, los beneficios y la efectividad del sistema implementado. La evaluación se centrará en mejoras en la producción y el perfeccionamiento de la calidad de los forrajes. Se analizarán los datos obtenidos para determinar de manera cuantitativa y cualitativa el impacto del sistema IoT en estos aspectos clave, permitiendo así una evaluación comprehensiva de su desempeño

### **1.5. Justificación**

En Ecuador los cambios climáticos de los últimos tiempos han producido un efecto negativo en la duración extensa de los veranos, lo que aumenta la temperatura y la falta de precipitaciones de agua lluvia, factores que afectan directamente en el desarrollo de forrajes para la alimentación de los animales de pastoreo provocando la escasez del mismo.

Según (*Plan Nacional de Sequía En Ecuador | PDF | Sequía | Ecuador*, n.d.), en Ecuador, la sequía ha provocado una significativa disminución de la superficie destinada a la agricultura. Entre los años 2000 y 2017, se calcula que se perdió un total de 1,878,873 hectáreas en todo el país. La región costera fue la más afectada, perdiendo el 70.21% del total (1,319,105 hectáreas), seguida por la región sierra con el 23.13% (434,565 hectáreas).

Tomando en cuenta los datos según (Izquierdo Bonilla, 2012) durante la temporada de lluvias, se observa un aprovechamiento total de la producción de forrajes relativamente bajo. Esto se debe a que el 81% de la producción anual total de material seco se genera en este período, dejando únicamente un 19% para la temporada seca. Esta distribución desigual

impacta negativamente en la disponibilidad de materia seca para el ganado, afectando su rendimiento.

De forma que la necesidad de implementar un sistema de producción interior de forraje verde hidropónico surge como respuesta a los desafíos provocados por el cambio climático, que se manifiestan a través de veranos más largos y la escasez de agua lluvia en Ecuador.

El FVH, o Forraje Verde Hidropónico, se presenta como un sistema de producción de biomasa vegetal con elevados estándares de salud y calidad nutricional. Este método permite la rápida generación de biomasa, en un intervalo de 9 a 15 días, siendo viable durante todo el año y en cualquier ubicación geográfica, siempre y cuando se implementen las condiciones mínimas requeridas para su desarrollo (FAO, 2001).

Según (Juarez-Lopez et al., 2013) la técnica del FVH se destaca por su eficiencia hídrica, utilizando menos de dos litros de agua para producir un kilogramo de forraje, lo que equivale a ocho litros para generar un kilogramo de materia seca de FVH (considerando un 25% de contenido de materia seca en el FVH). Esta cantidad es notablemente inferior a los requerimientos de agua en la producción de avena, cebada, trigo, maíz y sorgo cultivados a campo abierto, que son 635, 521, 505, 372 y 271 litros por kilogramo de materia seca respectivamente.

La hidroponía, como método de producción agrícola, está estrechamente asociada al sistema invernadero. Esto se debe a que el desarrollo exitoso de la hidroponía requiere condiciones ambientales y protección que son proporcionadas por el invernadero. (Gamero, 2015).

Siendo el FVH un complemento para la escasez de forraje tradicional para la alimentación de animales de pastoreo se puede ir más allá con la ayuda de la tecnología. Desarrollando así un entorno IoT (Internet de las cosas) que proporcionará una solución tecnológica y sostenible para asegurar el suministro de alimento para animales de pastoreo,

contribuyendo así a la seguridad alimentaria y al bienestar de las comunidades agrícolas en la región.

La agricultura de precisión implica la utilización de tecnología de la información para ajustar de manera específica el manejo de suelos y cultivos en respuesta a la variabilidad que se presenta dentro de un área de cultivo (García & Flego, 2008).

En los últimos años, empresas tanto del sector privado como del público, en ámbitos industriales, agrícolas y de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), han colaborado con el objetivo de ofrecer soluciones en el contexto de la agricultura. Su meta principal es mejorar el rendimiento de los cultivos, optimizar la utilización de recursos, reducir el impacto ambiental y facilitar la toma de decisiones estratégicas y económicas en este sector (Sarasti & Ramírez, 2016).

Según (Cadena Chavarro & Pulido Feo, 2021) una de las tecnologías con mayor aplicación en la agricultura de precisión es la red inalámbrica de sensores (WSN), debido a su posibilidad de despliegue en zonas sin infraestructura. Los nodos sensores cuentan con una fuente de alimentación independiente, brindando así autonomía y bajo costo, lo que permite un fácil despliegue en la cosecha.

## **Capítulo II: Estado del Arte**

Este capítulo presenta una revisión profunda de la literatura y los desarrollos más recientes relacionados con el uso del Internet de las Cosas (IoT) en la producción interior de forraje verde hidropónico (FVH). Este capítulo tiene como objetivo proporcionar una comprensión sólida de las tecnologías y metodologías actuales que sustentan el uso del IoT en la producción hidropónica de forraje, destacando las innovaciones y desafíos que enfrenta este campo emergente.

## **2.1. Pastos naturales**

Los pastizales son ecosistemas naturales o de origen antrópico dominados por hierbas que sirven como pasto, es decir, son alimento para los herbívoros. Los pastos, que generalmente pertenecen a la familia de las gramíneas (Poaceae), representan aproximadamente la cuarta parte de la superficie del planeta (lifeder, 2019).

### ***2.1.1. Tipos de pastos naturales***

Los pastos naturales, también conocidos como pastos nativos, son especies vegetales que crecen de manera espontánea en diferentes ecosistemas. Estos pastos son esenciales para la alimentación del ganado, la conservación del suelo y la biodiversidad. A continuación, se presentan algunos de los tipos más comunes de pastos naturales:

#### ***2.1.1.1. Pastizales templados***

Las praderas de Estados Unidos se extienden desde los Montes Rocosos al oeste hasta los bosques caducifolios del Atlántico al este. Luego, en el cono sur de América del Sur, están las pampas y las estepas patagónicas.

#### ***2.1.1.2. Pastizales tropicales y subtropicales***

En las zonas tropicales y subtropicales se encuentran las sabanas que se diversifican en 50 ecorregiones. En África abarcan desde la costa atlántica hasta el océano Índico en una gran franja subsahariana, y luego hasta el sureste (lifeder, 2019).

## **2.2. Hidroponía**

La hidroponía es un conjunto de métodos que permiten que las plantas se cultiven sin suelo. La hidroponía permite la producción de plantas principalmente herbáceas en estructuras simples o complejas aprovechando sitios o áreas como azoteas, suelos infértiles, terrenos escabrosos, invernaderos climatizados o no, etc. Se crearon métodos basados en sustratos (medios que sostienen a la planta) o en sistemas con aportes de soluciones de nutrientes estáticas o circulantes, sin olvidar las necesidades de la planta como la temperatura, la

humedad, el agua y los nutrientes. La palabra hidroponía proviene de las palabras griegas HIDRO, que significa agua, y PONOS, que significa labor o trabajo, lo que significa literalmente trabajar en agua (Beltrano & Giménez, 2015).

### ***2.2.1. Forraje verde Hidropónico (FVH)***

El forraje verde hidropónico (FVH) es una tecnología que produce biomasa vegetal a partir de semillas viables durante el crecimiento temprano de las plántulas y el crecimiento inicial de las plantas. El FVH, también conocido como "fodder hidropónico verde", se encuentra en un pienso o forraje vivo y es de alta digestibilidad, calidad nutricional y muy apto para la alimentación animal (Juarez-Lopez et al., 2013).

### ***2.2.2. Componentes de un sistema productor de FVH tecnificado***

Los sistemas de FVH tecnificados son robustos y utilizan herramientas tecnológicas para facilitar el trabajo; pueden ser semi, o completamente automáticos.

#### ***2.2.2.1. Estructura de Estantes***

Comprende todas las estanterías que se utilizarán para sostener las bandejas donde se cultivará el forraje, ya sea de madera, metal o PVC. Su altura debe permitir realizar varias labores de cultivo. Para permitir el drenaje de la solución nutritiva en todos los sentidos, cada módulo tendrá pendientes longitudinales y transversales (Martínez, 2005).

#### ***2.2.2.2. Bandejas de producción***

Son contenedores donde se colocan las semillas para el cultivo. Pueden estar hechos de una variedad de materiales, como asbesto-cemento, lámina galvanizada, fibra de vidrio o formaleas de madera cubiertas de polietileno. Su ancho medio es de 40 a 60 cm y su largo de 80 a 120 cm, y su profundidad es de 2 a 5 cm (Canovas, 1993).

Actualmente, se utilizan las bandejas de material de plástico, las mismas que presentan agujeros en uno de sus extremos para que el cultivo de la bandeja tenga un drenaje adecuado, evitando que se generen hongos en los cultivos.

### ***2.2.2.3. Sistemas de Iluminación artificial***

Iluminación artificial hecha de tubos fluorescentes distribuidos uniformemente y encendidos durante al menos doce a quince horas. Para calcular la iluminación, el FVH solo necesita una intensidad lumínica de 1.000 a 1.500 microwatts/cm<sup>2</sup> en un período de 12 a 14 horas de luz diarias (FAO, 2001).

Una de las opciones para el sistema de iluminación artificial es usar luces tipo led, para ahorrar en el consumo energético y, por tanto, el sistema FVH tendrá menos emisiones de gases de carbono.

El cultivo debe permanecer en un sitio oscuro, pero con riego suficiente durante el proceso de germinación de 3 a 4 días. Después de eso, el cultivo necesita entre 2.800 y 40.000 luxes (Infopastosyforrajes, 2019).

### ***2.2.2.4. Dispositivos de Medida***

Según (Álvarez Noroña & Quijije Zambrano, 2022) los factores a medir son aquellos que alteran las condiciones ambientales del cultivo. Tradicionalmente se utilizaban instrumentos manuales para medir, pero para la automatización se utilizan sensores, como:

- 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.

### ***2.2.2.5. Actuadores***

Elemento capaz de transformar la energía en movimiento al responder a una señal eléctrica para cumplir una determinada función en un entorno específico (Corona et al., 2014). Como se especifica en la Tabla 1.

**El proceso de clasificación se lleva a cabo en dos grupos:**

- **La fuente de energía:**
  - **Neumática: es el aire.**
  - **Eléctrico: se activa utilizando electricidad.**
  - **El sistema hidráulico es activado por un fluido.**
- **Debido al movimiento que produce:**
  - **Rotacionales**
  - **Líneas**

**Tabla 1**  
*Tipos de Actuadores*

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
<b>Bombas de agua</b>	Dispositivos que mueven líquidos (como agua) de un lugar a otro, como en sistemas de riego o suministro de agua, mediante un actuador (normalmente un motor eléctrico).
<b>Válvulas</b>	Componentes que controlan el flujo de fluidos (líquidos o gases). Los actuadores, como motores eléctricos o neumáticos, abren o cierran las válvulas según el sistema.
<b>Motores</b>	Tipos de actuadores que convierten la energía eléctrica en movimiento mecánico, permitiendo que las máquinas realicen tareas como girar, moverse o generar potencia.
<b>Lámparas</b>	Consideradas como actuadores cuando un interruptor de luz las controla para encenderse o apagarse.
<b>Ventiladores</b>	Utilizan motores eléctricos como actuadores para producir flujo de aire en sistemas de ventilación y refrigeración

*Nota:* En la tabla anterior se especifica los diferentes tipos de actuadores (Corona et al., 2014).

## **2.3 Proceso de Producción de FVH**

El principio del sistema hidropónico de cultivo consiste en germinar y que crezcan cereales, sin tierra de ningún tipo, y que esto suceda en un corto periodo, con un día de humidificación, dos días de germinación y cinco días de crecimiento (Larrauri Quispe et al., 2022).

### ***2.3.1 Selección de semillas***

Se debe utilizar semilla de alta calidad, de origen conocido, disponible, adaptada a las condiciones locales, de probada germinación y rendimiento. Se pueden usar semillas de cereales locales. Es conveniente que las semillas estén limpias de piedras, paja, tierra, semillas partidas que puedan contaminar y semillas de otras plantas. Por último, es importante asegurarse de que las semillas no hayan sido tratadas con agroquímicos (Juarez-Lopez et al., 2013).

### ***2.3.2 Lavado de las semillas***

Para eliminar hongos y bacterias, las semillas se sumergen en una solución de hipoclorito de sodio al 1% por cada litro de agua (10 ml) durante menos de 30 segundos.

### ***2.3.3 Pre-germinación***

Esta etapa implica sumergir completamente las semillas por no más de 24 horas para lograr una imbibición completa. Esta cantidad de tiempo se divide en dos intervalos de 12 horas cada uno. A las 12 horas de estar sumergidas, se sacan las semillas y se escurren durante una hora. Después, se sumergen otra vez durante 12 horas antes de sacarlas por última vez. Este sencillo método acelera la germinación de la semilla. Esta pregerminación garantiza un crecimiento inicial uniformemente uniforme del FVH. El cambio de agua cada 12 horas facilita y mejora la oxigenación de las semillas.

### **2.3.4 Siembra**

La densidad ideal por metro cuadrado es de 2,2 a 3,4 kg de semillas. Para la siembra, se esparcirá una capa delgada de semillas previamente germinadas (no más de 1,5 cm de espesor).

### **2.3.5 Germinación**

Después de la siembra, las semillas se cubren con papel periódico para proporcionar condiciones semioscuras y se mojan para mantener las temperaturas y la humedad ideales para promover la germinación y el crecimiento inicial. El papel se elimina una vez que se detecta la germinación de las semillas.

### **2.3.6 Crecimiento**

El crecimiento de las diferentes partes de la planta suele determinarse por la altura, el área foliar o el peso seco, en relación con el tiempo transcurrido durante el ciclo de vida, y se puede definir como la síntesis del material vegetal (biomasa), que normalmente viene acompañada de un cambio de forma y un aumento irreversible de la masa del organismo, aumento de la longitud o de los diámetros del cuerpo del vegetal y su aumento en peso (Carballo Carlos, 2000) (Carballo, 2000).

Menciona (Carballo, 2000) que el proceso de formación y reproducción de diferentes clases de células se conoce como diferenciación. En una planta, el crecimiento y la diferenciación ocurren simultáneamente, por lo que parece que el desarrollo es un proceso único. La planta debe estar en condiciones ideales de luminosidad, oxigenación y nutrientes después de que surjan las raíces y las primeras hojas para que pueda realizar la fotosíntesis.

### **2.3.7 Cosecha**

Finalmente, se realiza la cosecha, desmenuzando el FVH manual o mecánicamente. Se debe cosechar el mismo número de bandejas en cada unidad de producción de FVH cada día

para permitir una producción constante durante todo el año. obteniendo un rendimiento forrajero de 1:8 a 10 kg de FVH (Tarrillo, 2008).

### ***2.3.8. Usos del FVH***

El forraje verde hidropónico ha demostrado ser altamente efectivo tanto en animales monogástricos como poligástricos, gracias a su contenido de vitaminas, enzimas, coenzimas y aminoácidos libres. Este forraje ofrece un valor nutritivo y proteico elevado, además de una alta digestibilidad, facilitando una rápida circulación a través del tracto digestivo de los animales debido a su naturaleza tierna y apetecible. Recalcando que el forraje estará libre de cualquier plaga, hongo o enfermedad que ponga en riesgo al mismo, de forma que, los animales que consumirían alimentos de muy alta calidad para su desarrollo (Ramírez Víquez et al., 2017).

La técnica de producción de FVH mejora significativamente la eficiencia en el uso del agua en comparación con los métodos convencionales de cultivo a campo abierto. Se requieren entre 2 y 3 litros de agua para producir un kilogramo de FVH con un contenido de materia seca del 12% al 18%, lo que se traduce en un consumo total de 15 a 20 litros de agua por kilogramo de materia seca en un periodo de 14 días (Ramírez Víquez et al., 2017).

## **2.4. Factores y Requerimientos determinantes del FVH**

Los factores y requerimientos determinantes del FVH abarcan varios aspectos clave que influyen en su producción y calidad. Estos factores y requerimientos son fundamentales para el éxito y la sostenibilidad del cultivo, contribuyendo a su eficiencia productiva y beneficios ambientales.

### ***2.4.1. Adecuada selección de semillas***

Investigaciones han demostrado que utilizar semillas de alta calidad puede incrementar notablemente tanto la eficiencia de producción como la calidad del forraje hidropónico (FAO, 2001; Rodríguez, 2002). Elegir variedades específicas, reconocidas por su alto rendimiento y

adaptabilidad, también puede hacer que el proceso de producción sea más eficiente y rentable (Ramírez, 2016).

#### ***2.4.2 Temperatura***

La germinación de semillas como cebada y trigo se realiza óptimamente a temperaturas entre 18 y 21 °C, mientras que la avena puede germinar en un rango más amplio de 10 a 28 °C. Por otro lado, el maíz requiere temperaturas más cálidas, entre 25 y 28 °C. Es crucial evitar temperaturas extremas, no superando los 32°C ni descendiendo por debajo de 4 °C, para garantizar un desarrollo saludable de los cultivos. Además, cabe recalcar que el cultivo no se debe exponer de forma directa al sol durante su proceso de crecimiento. En cuanto al agua utilizada, se sugiere mantenerla entre 21 y 24 °C para facilitar la rápida y efectiva disolución de sales necesarias para el crecimiento de las plantas (Acosta Tenelema, 2022).

#### ***2.4.3 PH del agua de riego***

El pH del agua de riego debe estar entre 5.5 y 6.0, con la excepción de las leguminosas, que pueden tolerar un pH cercano a 7.5 en condiciones especiales. Sin embargo, la mayoría de las semillas utilizadas para producir forraje verde hidropónico no tienen un rendimiento óptimo superior a un pH de 7. Para mejorar la disponibilidad y absorción de nutrientes, se aconseja mantener el pH del agua de riego entre 5.5 y 6.5 (Juarez Lopez et al., 2013).

#### ***2.4.4 Tipo de riego***

Según (Bekuma, A, 2019) el método de riego utilizado en un entorno de producción de forraje verde hidropónico varía según las necesidades específicas del cultivo y las condiciones del sistema de producción. Algunos métodos comunes incluyen el riego por goteo, el riego por nebulización, y el riego por microaspersión. Cada método se selecciona según el tipo de cultivo, el tamaño del sistema, la disponibilidad de agua y la eficiencia necesaria para la entrega de nutrientes al FVH

#### **2.4.4.1 Riego por Microaspersión**

Los microaspersores están diseñados para administrar riego a través de gotas extremadamente finas. Incorporan un deflector giratorio, conocido como rotor o bailarina, que amplía significativamente el área de cobertura, reduce la velocidad de precipitación en comparación con los difusores, produce gotas de mayor tamaño y mejora la uniformidad en la distribución del agua. Cada tipo de microaspersor puede contar con diversos tipos de rotores o bailarinas adaptados a sus especificaciones particulares (*Riego por Microaspersión / Sistemas de Riego por Difusión y Nebulización*, s. f.).

#### **2.4.4.2 Riego por Nebulización**

Los sistemas de nebulización generan una fina niebla mediante la expulsión de agua a presión a través de un pequeño orificio. Esta corriente de agua impacta contra una superficie cóncava que la dispersa en forma de neblina. Usualmente, estos sistemas operan con presiones relativamente altas, generalmente entre 2 y 4 bares (*Riego por Microaspersión / Sistemas de Riego por Difusión y Nebulización*, s. f.).

#### **2.4.4.3 Riego por Goteo**

El riego por goteo, también conocido como riego localizado, es un método de irrigación eficiente diseñado para aplicar agua y nutrientes de manera precisa en sistemas agrícolas ubicados en regiones áridas. El agua se distribuye a través de un sistema de tuberías equipado con emisores, permitiendo que se infiltre directamente en la zona radicular de las plantas, optimizando así el uso de recursos hídricos y fertilizantes (*Riego por Microaspersión / Sistemas de Riego por Difusión y Nebulización*, s. f.).

#### **2.4.5 Cantidad y tiempos de riego**

Determinar una cantidad precisa de riego para cada tipo de forraje resulta desafiante debido a las variaciones en la infraestructura y condiciones ambientales durante su desarrollo.

No obstante, según el manual técnico, se aconseja dividir el volumen diario de riego en 6 o 9 sesiones a lo largo del día, cada una con una duración menor a 2 minutos (Noroña et al., 2022).

#### ***2.4.6 Ventajas de la Producción de FVH***

El Forraje Verde Hidropónico es una técnica muy aceptada en la producción de pastos para alimentar animales, gracias a que ayuda en su mayoría a reducir el calentamiento global y su baja cantidad de su huella de carbono en su desarrollo. A continuación, se presenta varias ventajas que mantiene en continuidad esta técnica de cultivo:

**Uso Eficiente del Agua:** El FVH utiliza una cantidad mínima de agua que los métodos tradicionales de cultivo en suelo. (Ramírez Viquez et al., 2017), se necesitan solo de 2 a 3 litros de agua para producir un kilogramo de FVH, en comparación con los 270 a 635 litros que se requieren en sistemas convencionales. Y mediante con los sistemas de riego revisados con anterioridad se puede optimizar el gran recurso vital que es el agua.

**Producción Todo el Año:** Una gran ventaja del FVH es su capacidad de producción continua, sin depender de las condiciones climáticas, ya que está dentro de un ambiente controlado. Esto asegura un suministro constante de forraje fresco y nutritivo para los animales durante los 365 días del año (Juarez Lopez et al., 2013).

**Alto Valor Nutricional:** El FVH es rico en vitaminas, enzimas y aminoácidos, lo que mejora la salud y el rendimiento de los animales, que, por consecuencia, se tendrá productos de alta calidad para un mercado competitivo. La (FAO, 2002) destaca su alta digestibilidad y contenido proteico, convirtiéndolo en una excelente opción para la alimentación de animales de corral.

**Menor Uso de Tierra y Fertilizantes:** La producción de FVH en sistemas hidropónicos requiere menos tierra y reduce la necesidad de fertilizantes y productos químicos, lo que hace que sea una opción más sostenible y económica.

Los métodos tradicionales de cultivo requieren una gran cantidad de tierra para producir forraje, con una hectárea generando aproximadamente 10 toneladas al año. En cambio, la producción de FVH emplea mucho menos espacio. Un solo metro cuadrado en un sistema hidropónico puede producir entre 6 y 10 kg de forraje en un ciclo de 7 a 10 días, lo que significa una reducción del uso de tierra de hasta un 95% en comparación con los métodos convencionales. Gracias al cultivo modular y de forma vertical presenta un gran aprovechamiento de espacio para la producción (Ramírez Víquez et al., 2017).

**Solución para Problemas de Suelo y Agua:** En áreas con suelos degradados o donde el agua es escasa, el FVH es una alternativa viable para la producción de forraje. No depende del suelo y utiliza mucha menos agua que los métodos tradicionales (Lomelí, 2000).

#### ***2.4.7 Desventajas de la Producción de FVH***

**Altos Costos Iniciales:** Montar un sistema de FVH implica una inversión considerable en infraestructura como invernaderos, sistemas de riego, iluminación artificial y equipos de control climático. Este costo inicial puede ser demasiado alto para pequeños agricultores, convirtiéndose en una barrera significativa en comparación con los métodos tradicionales de cultivo (FAO, 2015).

**Dependencia de la Tecnología:** La producción de FVH depende en gran medida de la tecnología para controlar variables ambientales como la temperatura, la humedad y la luz. Cualquier fallo en el sistema puede afectar gravemente al rendimiento del cultivo, y el mantenimiento constante de los equipos técnicos puede incrementar los costos operativos (Rodríguez, 2002).

**Riesgo de Enfermedades y Plagas:** Aunque los sistemas hidropónicos minimizan el contacto con patógenos, el riesgo de enfermedades y plagas persiste. El ambiente controlado y denso puede facilitar la propagación rápida de infecciones si no se implementan medidas de control adecuadas (FAO, 2001).

**Necesidad de Conocimiento Especializado:** Manejar eficazmente un sistema de FVH requiere un alto nivel de conocimientos técnicos y habilidades específicas en hidroponía y gestión de cultivos. Esto puede ser un desafío para los agricultores que no tienen acceso a formación o recursos educativos adecuados (FAO, 2021).

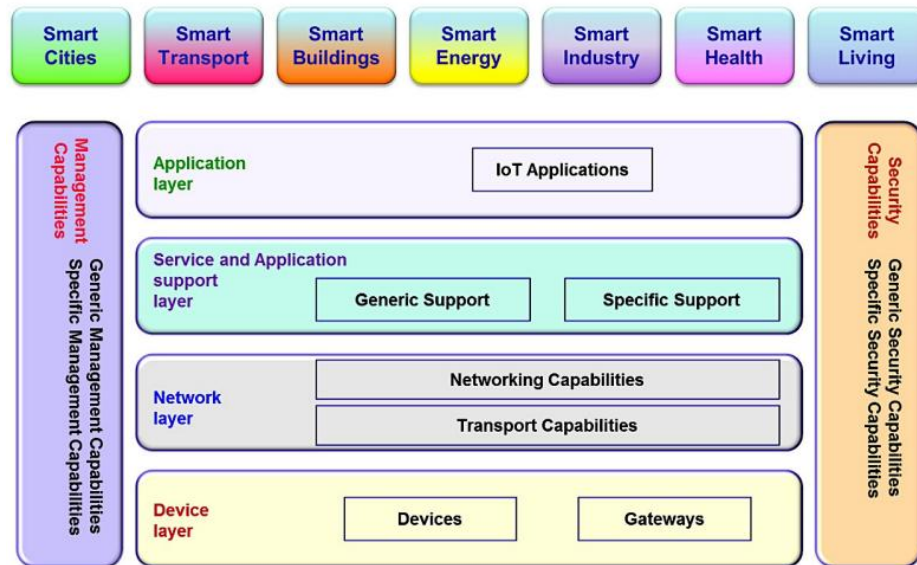
## **2.5. Internet de las Cosas (IoT)**

El Internet de las Cosas se refiere a un entorno donde los dispositivos pueden ser identificados en la red y cada día aumentan y se están conectando a un ritmo cada vez mayor. Las redes de sensores inalámbricos son fundamentales en este crecimiento, ya que permiten aumentar la ubicuidad de las redes a través de dispositivos inteligentes que son económicos y fáciles de implementar. Estándares como IEEE 802.15.4 en la capa física, 6LoWPAN en la capa de red y el protocolo de enrutamiento RPL se integran en el IoT, ofreciendo nuevas experiencias en diversas actividades cotidianas, tales como aplicaciones en hogares y oficinas inteligentes, salud, agricultura, monitoreo ambiental y ciudades inteligentes, (Cama-Pinto et al., 2012).

### **2.5.1. Arquitectura IoT**

La arquitectura del IoT se organiza en capas y niveles de forma jerárquica, similar a los modelos OSI y TCP/IP. Aunque no existen modelos estándar específicos para IoT, se suele utilizar una estructura que varía entre 5 y 7 capas. Estas capas agrupan elementos como objetos físicos, sensores, servicios en la nube, actuadores, usuarios, comunicaciones, capacidades y protocolos IoT (Acosta Tenelema, 2022).

**Figura 2.**  
*Arquitectura de capas de IoT*



Fuente: Adaptado de (Liñán Colina et al., 2015)

Según (Gubbi et al., 2013) la arquitectura facilita la interconexión y comunicación de dispositivos inteligentes. Estas capas también se encargan de gestionar y procesar los datos generados por estos dispositivos, asegurando una transmisión eficiente y un análisis adecuado de la información. Esta distribución de en capas permite que los diferentes componentes del IoT trabajen en conjunto de manera coherente y eficiente, optimizando tanto la funcionalidad de los dispositivos como la utilidad de los datos recopilados.

A continuación, se presentan las capas de la arquitectura IoT:

#### **2.5.1.1 Capa de Dispositivos (Sensores y Actuadores)**

Los sensores son dispositivos que capturan datos del entorno, como temperatura, humedad, luz y movimiento, transformando estas señales físicas en datos digitales que pueden ser procesados. Los actuadores, por su parte, ejecutan acciones físicas en respuesta a comandos, como encender o apagar luces, o abrir y cerrar válvulas (Bandyopadhyay, D., & Sen, J, 2011).

#### **2.5.1.2 Capa de Conectividad**

Esta capa incluye los protocolos de comunicación, como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, Z-Wave, LoRaWAN y NB-IoT, que permiten la transmisión de datos entre dispositivos y redes.

Los gateways actúan como intermediarios entre los dispositivos IoT y la nube, gestionando la comunicación y a menudo preprocesando los datos antes de su envío (Bandyopadhyay & Sen, 2011).

### **2.5.1.3 Capa de Procesamiento y Almacenamiento en la Nube**

En esta capa, los datos recolectados son almacenados en bases de datos en la nube para un acceso y análisis eficientes. El procesamiento de datos utiliza técnicas de análisis de big data, aprendizaje automático e inteligencia artificial para extraer información útil de los datos recolectados (*Define IoT - IEEE Internet of Things*, s. f.).

### **2.5.1.4 Capa de Gestión y Aplicación**

Esta capa se encarga de la gestión de dispositivos mediante herramientas y plataformas que permiten configurar, monitorear y actualizar los dispositivos IoT. Además, incluye aplicaciones y servicios que permiten a los usuarios interactuar con el sistema IoT, como aplicaciones móviles, paneles de monitoreo y sistemas de control automático (Whitmore et al., 2015).

## **2.5.2 Protocolos de comunicación IoT**

En el ámbito del Internet de las Cosas (IoT), se utilizan diversos protocolos de comunicación para permitir la conexión y el intercambio de datos entre dispositivos inteligentes. Cada protocolo tiene características específicas que lo hacen adecuado para diferentes aplicaciones. A continuación, se describen algunos de los protocolos más importantes:

### **2.5.2.1 Wi-Fi (viñetas)**

Es una tecnología de red inalámbrica basada en los estándares IEEE 802.11. Es muy utilizada en hogares y oficinas debido a su alta velocidad de transmisión de datos y su capacidad para conectar múltiples dispositivos. Sin embargo, su consumo de energía es relativamente

alto, lo que puede ser una limitación para dispositivos IoT que funcionan con baterías (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016).

#### **2.5.2.2 Bluetooth**

Bluetooth, especialmente en su versión Low Energy (BLE), es ideal para aplicaciones IoT que requieren comunicación de corto alcance y bajo consumo de energía. BLE se suele usar en dispositivos portátiles y sensores médicos por su eficiencia energética (Bluetooth SIG, 2021).

#### **2.5.2.3 Zigbee**

Es un protocolo de comunicación basado en el estándar IEEE 802.15.4, diseñado para aplicaciones de baja potencia y bajo ancho de banda. Es popular en sistemas de automatización del hogar, monitoreo ambiental y control industrial debido a su capacidad para formar redes de malla, lo que mejora la cobertura y la fiabilidad de la red (Zigbee Alliance, 2021).

#### **2.5.2.4 Z-Wave**

Es otro protocolo de baja potencia usado en la automatización del hogar. Funciona en frecuencias específicas (908 MHz en América del Norte y 868 MHz en Europa), evitando la congestión de las frecuencias usadas por Wi-Fi y Bluetooth (Z-Wave Alliance, 2021).

#### **2.5.2.5 LoRaWAN**

Long Range Wide Area Network es un protocolo diseñado para redes de área amplia de baja potencia (LPWAN). Ofrece comunicación a largas distancias (hasta 15 km en áreas rurales) con un consumo de energía muy bajo, siendo ideal para aplicaciones como el monitoreo agrícola y la gestión de ciudades inteligentes (LoRa Alliance, 2021).

#### **2.5.2.6 NB-IoT**

Narrowband IoT es un estándar de comunicación desarrollado por 3GPP para redes celulares. Ofrece una amplia cobertura y bajo consumo de energía, adecuado para aplicaciones

como el monitoreo de contadores de servicios públicos y el seguimiento de activos (3GPP, 2021).

### **2.5.2.7 MQTT**

Message Queuing Telemetry Transport es un protocolo de mensajería ligero que utiliza un modelo de publicación/suscripción. Es ideal para aplicaciones IoT donde se requiere una comunicación eficiente y confiable entre dispositivos y servidores, como en la telemetría y la automatización del hogar (MQTT.org, 2021).

### **2.5.2.8 CoAP**

El Protocolo de Aplicación de Restricciones (CoAP) es un protocolo de aplicación de Internet estandarizado que permite la interacción entre dispositivos en redes restringidas. Es similar a HTTP, pero más adecuado para aplicaciones IoT debido a su menor sobrecarga y capacidad para funcionar en redes con limitaciones de recursos (IETF, 2021).

## **2.5.3 Algoritmos**

En el ámbito del Internet de las Cosas (IoT), los algoritmos son fundamentales para gestionar, procesar y analizar los datos que los dispositivos inteligentes generan. A continuación, se presenta una visión general de los algoritmos más comunes utilizados en IoT:

### **2.5.3.1 Algoritmos de Enrutamiento**

- RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks): Este protocolo de enrutamiento está diseñado específicamente para redes de sensores y dispositivos IoT, optimizando el uso de energía y la eficiencia en la transmisión de datos, crucial en entornos con recursos limitados.
- Dijkstra y AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector): Dijkstra se utiliza principalmente en redes fijas para encontrar las rutas más cortas, mientras que AODV es más adecuado para redes ad hoc donde los nodos están en constante movimiento.

### **2.5.3.2 Algoritmos de Compresión de Datos**

LZW (Lempel-Ziv-Welch) y Huffman: Son esenciales para reducir el volumen de datos transmitidos en las redes IoT, optimizando el uso del ancho de banda y minimizando los costos de transmisión. La compresión de datos permite una transmisión más eficiente y rápida (Jara, A. J., Genoud, D., & Bocchi, Y, 2014).

### **2.5.3.3 Algoritmos de Seguridad**

AES (Advanced Encryption Standard) y RSA: Estos algoritmos de cifrado protegen los datos transmitidos en las redes IoT. AES es un algoritmo de cifrado simétrico que protege los datos, mientras que RSA es un algoritmo de cifrado asimétrico utilizado para la autenticación y el intercambio seguro de claves.

### **2.5.3.4 Algoritmos de Procesamiento de Datos**

MapReduce y Hadoop: Son herramientas clave para procesar y analizar grandes volúmenes de datos generados por dispositivos IoT. MapReduce divide las tareas de procesamiento en partes más pequeñas para ejecutarlas en paralelo, mientras que Hadoop proporciona una infraestructura para almacenar y procesar grandes conjuntos de datos distribuidos.

### **2.5.3.5 Algoritmos de Aprendizaje Automático**

K-Means y Redes Neuronales Convolucionales (CNN): En el análisis de datos de IoT, los algoritmos de aprendizaje automático son utilizados para identificar patrones y hacer predicciones. K-Means clasifica datos en grupos similares, mientras que las CNN se utilizan para tareas de reconocimiento de imágenes y procesamiento de señales.

## **2.5.4. Ventajas de IoT**

El Internet de las Cosas (IoT) está revolucionando cómo interactuamos con el mundo y cómo operan las empresas. Una de las principales ventajas es la mejora en la eficiencia operativa, ya que IoT permite la automatización de tareas y el control remoto de dispositivos,

lo que reduce el consumo de energía y optimiza el uso de recursos. Además, la capacidad de recopilar y analizar datos en tiempo real facilita la toma de decisiones informadas, mejorando tanto la planificación estratégica como la gestión de recursos. En el ámbito doméstico, IoT contribuye a una mejor calidad de vida a través de hogares inteligentes que aumentan la seguridad y la comodidad. También permite reducir costos operativos en empresas mediante el monitoreo continuo y el mantenimiento predictivo, que anticipa problemas antes de que ocurran. Por último, IoT abre nuevas oportunidades de negocio, permitiendo el desarrollo de servicios personalizados y modelos de negocio innovadores basados en datos. Estas ventajas están transformando industrias y estilos de vida, demostrando el vasto potencial de IoT en diversos sectores (Rose, Eldridge, & Chapin, 2015).

#### ***2.5.5. Desventajas de IoT***

Las desventajas del Internet de las Cosas (IoT) incluyen preocupaciones de seguridad, ya que cada dispositivo conectado puede ser una puerta de entrada para ciberataques, comprometiendo datos sensibles y la privacidad de los usuarios. La interoperabilidad entre dispositivos y plataformas de IoT sigue siendo un desafío, limitando su integración y funcionalidad. Los costos iniciales de implementación pueden ser elevados, y la dependencia de la conectividad a Internet puede afectar el funcionamiento de los dispositivos si hay interrupciones en el servicio. Además, la gestión del gran volumen de datos generados requiere soluciones robustas, y la rápida evolución de la tecnología puede llevar a la obsolescencia de los dispositivos, implicando costos adicionales para mantenerse actualizado (Rose, Eldridge, & Chapin, 2015).

#### ***2.5.6. IoT en la Agricultura 4.0***

La integración del Internet de las Cosas (IoT) en la Agricultura 4.0 ha transformado significativamente las prácticas agrícolas al incorporar tecnología avanzada que optimiza tanto

la producción como la gestión. IoT ofrece múltiples aplicaciones que mejoran la eficiencia y la productividad en la agricultura moderna.

#### **2.5.6.1. Monitoreo de Cultivos y Suelo**

Mediante el uso de sensores IoT, es posible monitorear las condiciones del suelo y los cultivos en tiempo real, recolectando datos sobre humedad, temperatura y niveles de nutrientes. Esta información permite a los agricultores ajustar el riego y la fertilización de manera precisa, optimizando el crecimiento de las plantas y minimizando el uso excesivo de recursos. Según la FAO, la implementación de IoT en la agricultura puede aumentar la eficiencia del uso del agua en un 25% (FAO, 2021).

#### **2.5.6.2. Gestión de Agua y Riego**

Según (Nunes et al., 2020). los sistemas de riego automatizados controlados por IoT ajustan el suministro de agua basándose en datos en tiempo real proporcionados por sensores de humedad del suelo. Esto no solo ahorra agua sino que también mejora la salud de las plantas. Estudios han demostrado que los sistemas de riego con IoT pueden reducir el consumo de agua hasta en un 30%.

#### **2.5.6.3. Control de Plagas y Enfermedades**

Sensores IoT y cámaras de vigilancia ayudan en la detección temprana de plagas y enfermedades. Al identificar estos problemas antes de que se propaguen, los agricultores pueden tomar medidas preventivas, reduciendo el uso de pesticidas y minimizando las pérdidas. Un informe de la IEEE indica que la agricultura de precisión puede reducir el uso de pesticidas en un 20% (IEEE, 2019).

#### **2.5.6.4. Gestión de Inventario y Maquinaria**

(Verdouw et al., 2020) menciona que IoT permite un seguimiento y gestión eficiente de la maquinaria agrícola y los recursos de inventario. Los sensores instalados en tractores y

otros equipos proporcionan datos sobre el rendimiento y las necesidades de mantenimiento, evitando tiempos de inactividad y optimizando las operaciones agrícolas.

### ***2.5.7. Cultivos hidropónicos como aplicaciones***

La hidroponía es una forma innovadora de cultivar plantas sin usar tierra, utilizando soluciones minerales disueltas en agua. Esta técnica tiene muchas aplicaciones prácticas y beneficios tanto para grandes agricultores como para productores más pequeños (FAO, 2001).

#### ***2.5.7.1. Producción de Alimentos en Entornos Urbanos y Suburbanos***

La hidroponía es ideal para áreas urbanas donde el espacio agrícola es limitado. Permite cultivar verticalmente, aprovechando el espacio en horizontal y en vertical, ideal para ciudades con alta densidad poblacional (Rodríguez, S, 2002).

#### ***2.5.7.2. Sostenibilidad y Uso Eficiente de Recursos***

Esta técnica utiliza mucha menos agua que la agricultura tradicional y reduce la necesidad de pesticidas y herbicidas, haciéndola una opción más ecológica y sostenible. Además, al controlar cuidadosamente las condiciones de crecimiento, se pueden obtener cosechas más rápidas y frecuentes (Savvas, D., & Passam, H. C, 2002).

#### ***2.5.7.3. Investigación y Desarrollo de Técnicas Agrícolas Avanzadas***

La hidroponía también se utiliza en la investigación para desarrollar y mejorar nuevas técnicas agrícolas, contribuyendo al avance de la agricultura sostenible y precisa (FAO, 2021).

## **2.6. Hardware**

Incluye todos los dispositivos y equipos necesarios para la operación y el control de sistemas, desde computadoras y microcontroladores hasta sensores y actuadores. El hardware es fundamental para la implementación y funcionamiento de sistemas embebidos y soluciones tecnológicas que interactúan con el entorno físico a través de la recopilación, procesamiento y transmisión de datos.

### 2.6.1. *Microcontroladores*

Los microcontroladores son pequeños chips que contienen un procesador, memoria y periféricos de entrada/salida. Son fundamentales para los dispositivos IoT porque permiten realizar tareas específicas con bajo consumo de energía y a un costo reducido. Los microcontroladores recopilan y procesan datos, y facilitan la comunicación con otros dispositivos y sistemas (Barrett, S. F., & Pack, J. D, 2020).

- **Arquitectura:** Estos microcontroladores suelen estar basados en arquitecturas de computación RISC (Reduced Instruction Set Computing), como ARM Cortex-M, conocidas por su buen rendimiento y eficiencia energética.
- **Conectividad:** Los microcontroladores en IoT suelen integrar módulos de comunicación como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, y LoRa para facilitar la conexión a redes y otros dispositivos.
- **Periféricos integrados:** Incluyen GPIO (General Purpose Input/Output), ADC (Analog-to-Digital Converter), UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), timers, PWM (Pulse Width Modulation), entre otros. Estos periféricos permiten la conexión y control de sensores, actuadores y otros componentes externos.
- **Programación:** Se programan en lenguajes como C/C++ o en entornos específicos de desarrollo (IDEs) proporcionados por los fabricantes. También se pueden programar utilizando lenguajes de alto nivel como Python en algunos casos (Barrett, S. F., & Pack, J. D, 2020)..
- **Aplicaciones:** Son ampliamente utilizados en sistemas embebidos, control de dispositivos industriales, automóviles, electrodomésticos inteligentes, sistemas de control de acceso, entre otros.

### 2.6.2. *Sensores*

Los sensores son dispositivos que detectan cambios en el entorno físico y convierten esa información en señales eléctricas procesables por microcontroladores. Son esenciales para el IoT porque permiten la recopilación de datos en tiempo real del entorno (Paradiso, J. A., & Starner, T, 2005).

#### 2.6.2.1 Clasificación de Sensores

Existen varios tipos de sensores utilizados en aplicaciones IoT, como:

- **Sensores de temperatura y humedad:** Usados para monitorear el clima y las condiciones ambientales.
- **Sensores de movimiento:** Incluyen acelerómetros y giroscopios, y se utilizan en dispositivos portátiles y aplicaciones de seguimiento.
- **Sensores de luz:** Como fotodiodos y fototransistores, empleados en sistemas de iluminación inteligentes.
- **Sensores de gas y calidad del aire:** Utilizados para monitorear la contaminación del aire y detectar gases específicos.

### 2.7. Software Libre

El modelo de desarrollo de software libre puede involucrar desde pequeños grupos de programadores hasta grandes comunidades que contribuyen con código, pruebas, documentación y otros recursos. Las plataformas como GitHub facilitan esta colaboración global, albergando millones de proyectos y desarrolladores (IBM, 2024).

El software libre es esencial para el desarrollo de aplicaciones en el Internet de las Cosas (IoT) debido a su accesibilidad, flexibilidad y bajo costo. Utilizando software libre, los desarrolladores pueden acceder a diversas herramientas y plataformas que facilitan la creación, personalización y escalabilidad de soluciones IoT. A continuación, se describe algunas aplicaciones y se presenta bibliografía relevante sobre el uso de software libre en IoT.

### **2.7.1. Placas de desarrollo de software libre**

Las placas de desarrollo de software libre son esenciales para crear proyectos de IoT por su accesibilidad y flexibilidad. Estas placas permiten a los desarrolladores experimentar y crear prototipos de dispositivos conectados sin las limitaciones del hardware propietario (Intuz, 2023). A continuación, se presentan algunas de las placas de desarrollo más destacadas:

#### **2.7.1.1 Arduino**

Arduino es una plataforma de hardware y software de código abierto que es fácil de usar. Las placas Arduino cuentan con un microcontrolador y un entorno de desarrollo integrado (IDE) que simplifica la programación. Son utilizadas en proyectos educativos, prototipos rápidos y aplicaciones IoT, como sensores ambientales, automatización del hogar y control de dispositivos (*Arduino Docs / Arduino Documentation*, s. f.).

#### **2.7.1.2 Raspberry Pi**

Una computadora de placa única de bajo costo que ejecuta un sistema operativo basado en Linux. La Raspberry Pi es ideal para proyectos IoT debido a su capacidad de procesamiento y conectividad. Es usada en proyectos como servidores web, estaciones meteorológicas, cámaras de seguridad y controladores de robots (*Raspberry Pi Documentation*, s. f.).

#### **2.7.1.3 ESP8266/ESP32**

Módulos Wi-Fi de bajo costo que se pueden programar utilizando el entorno de Arduino IDE. El ESP32 también incluye Bluetooth, lo que lo hace más versátil. Muy populares en aplicaciones IoT debido a su capacidad de conectividad Wi-Fi, como sensores remotos, controladores de dispositivos y proyectos de domótica (*ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC / Espressif Systems*, s. f.).

#### **2.7.1.4 BeagleBone**

Un sistema de placa única similar a Raspberry Pi, pero con más capacidades de entrada/salida y un enfoque en aplicaciones industriales y educativas. Utilizada en proyectos

de robótica, automatización industrial y controladores avanzados («BeagleBone® Black», s. f.).

### ***2.7.2 Lenguajes de Programación***

En el mundo de la programación, existen numerosos lenguajes diseñados para diferentes propósitos y aplicaciones. Cada lenguaje tiene sus propias características y ventajas, lo que los hace más adecuados para ciertos tipos de proyectos. A continuación, se describen algunos de los lenguajes de programación más utilizados y sus aplicaciones.

#### **2.7.2.1. Python**

Python es un lenguaje de alto nivel, conocido por su sintaxis clara y fácil de leer. Es muy versátil y se utiliza en diversas áreas de desarrollo. Tiene gran variedad de aplicaciones como: desarrollo web, ciencia de datos, aprendizaje automático, automatización de tareas y desarrollo de software, entre otros (VanderPlas, J, 2016).

#### **2.7.2.2. Java**

Java es un lenguaje de programación de propósito general, orientado a objetos y basado en clases. Es muy utilizado en aplicaciones empresariales. Se enfoca en el desarrollo de aplicaciones de escritorio, móviles (Android), empresariales y sistemas integrados (Sierra, K., & Bates, B, 2005).

#### **2.7.2.3. C++**

Es un lenguaje de programación de alto rendimiento, basado en C. Es conocido por su eficiencia y control sobre el hardware. Se caracteriza por aplicaciones en desarrollo de sistemas operativos, motores de videojuegos y software de alto rendimiento (Stroustrup, B, 2013).

### **Capítulo III: Diseño del Sistema**

Este capítulo describe cada una de las etapas involucradas en la implementación del entorno IoT, desde la arquitectura conceptual hasta la integración física y lógica del sistema, permitiendo validar su funcionalidad y aplicabilidad en entornos reales.

Se contempla la aplicación de la metodología en cascada para el diseño e implementación de un sistema inteligente basado en Internet de las Cosas (IoT), orientado a la producción interior de forraje verde hidropónico (FVH). Este sistema se enfoca en la automatización y control de variables ambientales clave como la temperatura, la luminosidad y la humedad, dentro de un entorno cerrado y controlado, facilitando así el desarrollo eficiente de cultivos para la alimentación de animales de pastoreo.

Se abordan aspectos fundamentales como la selección e integración estratégica de sensores y actuadores, así como la configuración de una red de sensores soportada por la tecnología Wi-Fi (IEEE 802.11). A través de este despliegue tecnológico, se busca recopilar datos precisos que permitan tomar decisiones automatizadas en función de las condiciones del cultivo.

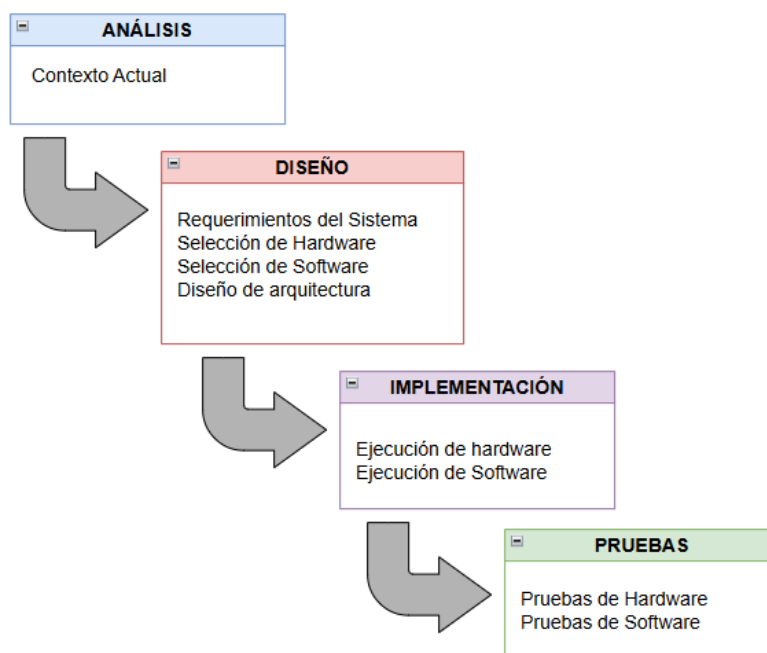
Asimismo, se detalla el proceso de análisis y selección del hardware y software adecuado, priorizando el uso de tecnologías de código abierto como Node-RED para la gestión lógica del sistema, InfluxDB para el almacenamiento de datos y Grafana para la visualización gráfica e interactiva de las variables monitoreadas. El diseño considera la implementación de una arquitectura escalable y de fácil mantenimiento, que permite optimizar el uso de recursos hídricos y energéticos, garantizando la sostenibilidad del sistema de producción.

Este capítulo describe cada una de las etapas involucradas en la implementación del entorno IoT, desde la arquitectura conceptual hasta la integración física y lógica del sistema, permitiendo validar su funcionalidad y aplicabilidad en entornos reales.

### 3.1 Metodología

Se adopta la metodología de desarrollo en cascada como base para el diseño e implementación del sistema propuesto. La elección de esta metodología responde a la necesidad de establecer un proceso ordenado, que permita garantizar el cumplimiento de los objetivos del proyecto a través de etapas bien definidas y secuenciales. Este enfoque facilita la identificación temprana de posibles fallos y la toma de decisiones correctivas antes de avanzar a la siguiente fase. El modelo en cascada estructura el proyecto en etapas consecutivas, comenzando por la recopilación de requerimientos, seguida del análisis, diseño, desarrollo, pruebas y, finalmente, la implementación. Cada fase debe completarse antes de pasar a la siguiente, permitiendo así una construcción progresiva del sistema con un mayor control sobre la planificación y resultados esperados.

**Figura 3.**  
*Metodología en cascada*



*Fuente: Autoría*

La metodología adoptada para el desarrollo del sistema se basa en el modelo en cascada, el cual estructura el proceso en una secuencia lineal de etapas, donde cada fase depende

directamente del resultado de la anterior. Este enfoque permite avanzar de manera ordenada y controlada en la construcción del entorno IoT para la producción interior de forraje verde hidropónico, garantizando coherencia y trazabilidad en cada paso del proyecto.

La primera fase corresponde al Análisis, donde se estudia el contexto actual, identificando las condiciones ambientales necesarias para el crecimiento óptimo del FVH, así como las necesidades funcionales y operativas del sistema. Esta etapa permite definir los parámetros críticos a controlar y delimitar el alcance del proyecto con base en criterios técnicos y de sostenibilidad.

Seguidamente, en la etapa de Diseño, se establecen los requerimientos específicos del sistema. Aquí se definen las características técnicas que guiarán la selección de sensores, módulos de comunicación y dispositivos de procesamiento. Se realiza la elección del hardware y software apropiado, además del diseño de la arquitectura general del sistema, considerando eficiencia, escalabilidad y facilidad de implementación.

La fase de Implementación abarca la ejecución física y lógica del sistema, donde se ensamblan los componentes seleccionados, se configuran los dispositivos, y se integran los elementos de hardware con el software desarrollado. En esta etapa se materializan las decisiones tomadas previamente y se da forma al prototipo funcional del entorno de cultivo inteligente.

Finalmente, la etapa de Pruebas permite validar el funcionamiento del sistema a través de pruebas específicas de hardware y software. Se evalúa el comportamiento de los sensores, la estabilidad de la conectividad, la precisión de los datos recolectados y la capacidad de respuesta del sistema ante condiciones controladas. Esta verificación asegura que el entorno IoT cumpla con los objetivos planteados y esté listo para su aplicación en un entorno real de producción.

### **3.2 Etapa de Análisis**

La etapa de análisis constituye una fase crítica dentro del desarrollo del entorno IoT orientado a la producción interior de forraje verde hidropónico (FVH), ya que permite identificar de manera precisa los requerimientos técnicos, ambientales y funcionales necesarios para su implementación efectiva. En esta fase se procederá a realizar un estudio detallado sobre las condiciones óptimas de germinación y crecimiento del FVH, considerando factores clave como la intensidad lumínica, la humedad ambiental y la temperatura. También, se evaluarán las limitaciones propias de los entornos cerrados, tales como la necesidad de iluminación artificial constante, sistemas de riego eficientes y control de microclima. Esta información servirá como base para seleccionar los sensores adecuados para temperatura, humedad, y sensores de luz, así como la red de comunicación más apropiada. Finalmente, se analizará las opciones de hardware más viables considerando su costo, capacidad de procesamiento y eficiencia energética, optando por una arquitectura distribuida basada en nodos y un gateway central. Esta etapa sentará las bases sólidas para el diseño e implementación del sistema inteligente, garantizando su alineación con los objetivos del proyecto y su aplicabilidad en contextos reales.

#### ***3.2.1 Situación Actual de la Producción de Forraje***

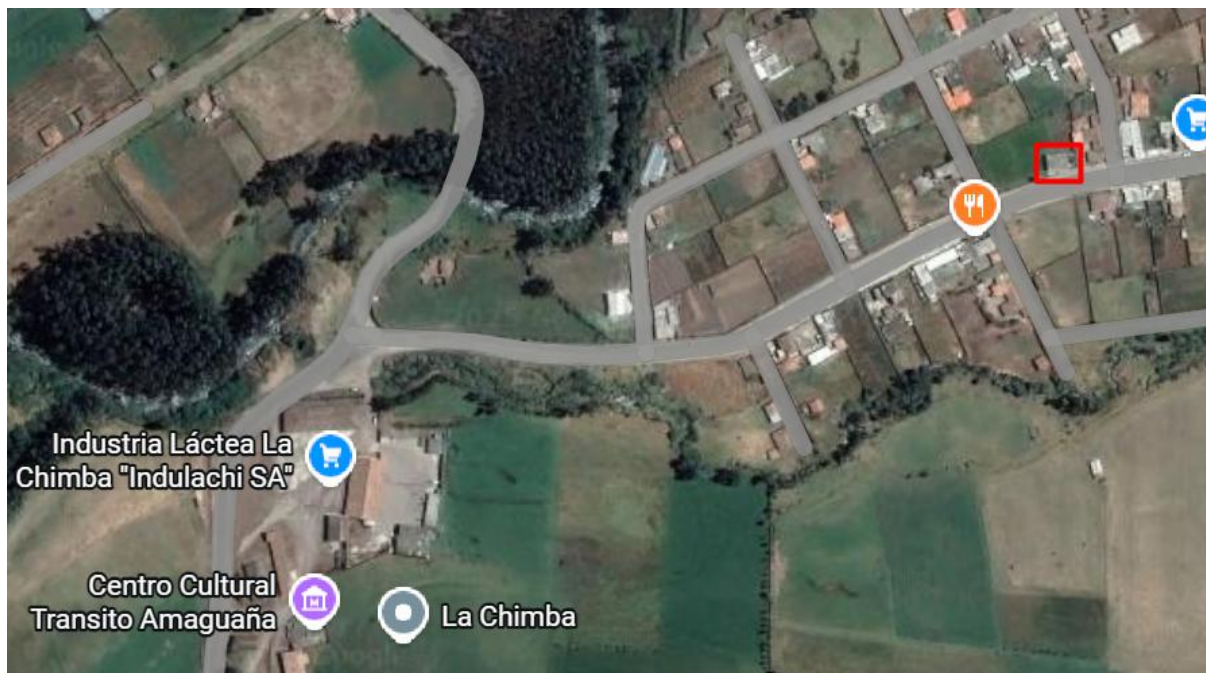
En la actualidad, la producción de forraje tradicional en zonas de pastoreo se ve afectada por condiciones climáticas adversas, como la prolongación de las temporadas secas y la escasez de agua, lo que impacta directamente en la calidad y cantidad del alimento disponible para animales de pastoreo. Esta situación genera una dependencia de factores externos como el clima, limitando la sostenibilidad de la producción ganadera. En muchos sectores rurales no se cuenta con infraestructura adecuada para garantizar un suministro constante de alimento, lo que ha incentivado la búsqueda de soluciones tecnológicas que permitan producir forraje de forma continua y eficiente. Por consiguiente, la implementación de un entorno cerrado para la

producción de forraje verde hidropónico (FVH) representa una alternativa viable, ya que no requiere suelo cultivable y permite controlar variables críticas como la humedad, la temperatura y la luz. La posibilidad de incorporar tecnologías IoT permite no solo optimizar estos procesos, sino también automatizarlos y monitorearlos en tiempo real, mejorando la productividad y reduciendo el consumo de recursos, como son la gran cantidad de agua que se requiere para el riego en los pastizales tradicionales.

El entorno de producción de forraje verde hidropónico (FVH) se desarrolla en la parroquia de Olmedo perteneciente al cantón Cayambe de la provincia de Pichincha a 3600 m.s.n.m. Una zona caracterizada por tener un clima relativamente frío, presentando temperaturas de entre 4° y 18° C. Siendo un sector enfocado a la ganadería, se presenta varios cultivos de pastizales tradicionales, los mismos que se ven afectados en épocas de sequías de agua lluvia. El entorno FVH se instalará en la vivienda de la señora Maura Necpas ubicada en la comunidad de La Chimba.

**Figura 4.**

*Lugar de instalación de entorno FHV*



*Fuente: Google Maps*

### 3.3 Requerimientos de Sistema

Con el fin de que el sistema funcione de manera eficiente y responda a las necesidades del producto final, es fundamental definir con claridad los requisitos necesarios para su desarrollo. Estos requisitos permiten evaluar las condiciones del entorno en el que se implementará la solución, asegurando que cumpla con los objetivos planteados. Encaminado con norma ISO/IEC/IEEE 29148, la misma presenta directrices para la especificación de requisitos de software y sistemas. En este contexto, se han clasificado los requisitos en tres categorías principales:

- Requisitos de los interesados (Stakeholders)
- Requisitos funcionales del sistema
- Requisitos de arquitectura

Para facilitar su interpretación y uso en el desarrollo, a cada tipo de requisito se le ha asignado una abreviatura específica, lo cual se detalla en la Tabla #

**Tabla 2**  
*Nomenclatura de Requerimientos*

<b>Abreviatura</b>	<b>Descripción</b>
<b>RDRS</b>	Requerimientos de Stakeholders
<b>RDS</b>	Requerimientos del Sistema
<b>RDA</b>	Requerimientos de Arquitectura

*Fuente: Autoría*

#### **3.3.1 Requerimientos de Stakeholders**

Los requerimientos de los stakeholders son fundamentales para garantizar que el desarrollo del entorno IoT satisfaga las expectativas y necesidades de todos los actores involucrados directa o indirectamente en el proyecto.

**Tabla 3**  
*Funciones de Stakeholders*

<b>Lista de Stakeholders</b>	
<b>Usuario Directo</b>	Maura Necpas
<b>Desarrollador del proyecto</b>	Pablo Steven Ulcuango Necpas
<b>Director del proyecto</b>	MSc. Jaime Michilena
<b>Asesor del proyecto</b>	MSc. Luis Suarez

*Fuente: Autoría*

**Tabla 4**  
*Requerimientos por parte de Stakeholders*

<b>RDRS</b>				
#	<b>Requerimientos de Stakeholders</b>	<b>Prioridad</b>		
		Alta	Media	Baja
<b>Requerimientos Operacionales</b>				
<b>RDRS1</b>	Implementación en entornos cerrados.	x		
<b>RDRS2</b>	Bajo consumo de energía.	x		
<b>RDRS3</b>	Bajo consumo de agua.	x		
<b>RDRS4</b>	Conectividad a internet.	x		
<b>RDRS5</b>	Visualización de datos.	x		
<b>RDRS6</b>	Automatización del entorno.	x		
<b>RDRS7</b>	Operación permanente.	x		
<b>RDRS8</b>	Almacenamiento de datos.	x		
<b>Requerimientos del Usuario</b>				
<b>RDRS9</b>	Conocimientos de FVH.		x	
<b>RDRS10</b>	El sistema debe ser intuitivo y fácil de usar para personas sin conocimientos técnicos.	x		
<b>RDRS11</b>	Presentación de resultados claros y precisos.	x		

<b>RDRS12</b>	El sistema debe presentar la información de forma gráfica y comprensible	x
<b>RDRS13</b>	El sistema debe generar reportes precisos de producción y eficiencia	x

*Fuente: Autoría*

### 3.3.2 Requerimientos Funcionales del Sistema

Los requerimientos funcionales describen las capacidades que el sistema debe ofrecer para satisfacer las necesidades operativas identificadas durante el análisis del entorno y del usuario final. Por lo cual, el entorno IoT debe garantizar un control eficiente de las variables específicas involucradas en el cultivo del forraje verde hidropónico (FVH), tales como la temperatura, la luminosidad y el riego. Además, se espera que el sistema brinde visualización, interacción y almacenamiento de datos, facilitando la toma de decisiones y el seguimiento correcto del proceso productivo.

**Tabla 5**  
*Requerimientos del Sistema*

<b>RDS</b>				
#	Requerimientos del Sistema	Prioridad		
		Alta	Media	Baja
<b>RDS - Uso</b>				
<b>RDS1</b>	El sistema debe operar con suministro eléctrico continuo o respaldo por batería.	x		
<b>RDS2</b>	Las variables ambientales captadas deben registrarse en formato numérico.	x		
<b>RDS3</b>	La interfaz del sistema debe ser sencilla e intuitiva para el usuario final.	x		
<b>RDS - Desempeño</b>				
<b>RDS4</b>	Debe existir conexión inalámbrica (Wi-Fi) entre los nodos sensores y el servidor.	x		
<b>RDS5</b>	Los datos del ambiente deben ser enviados periódicamente a la plataforma de monitoreo.	x		
<b>RDS6</b>	El sistema debe operar con un consumo energético eficiente.	x		
<b>RDS7</b>		x		

	La transmisión de datos debe realizarse con bajo retardo y sin pérdidas.	
<b>RDS8</b>	El margen de error de los sensores debe ser mínimo para asegurar datos confiables.	x
<b>RDS9</b>	El sistema debe iniciar y detener automáticamente el riego según las condiciones detectadas.	x
<b>RDS - Interfaces</b>		
<b>RDS10</b>	Los sensores, actuadores y microcontroladores deben comunicarse entre sí sincrónicamente.	
<b>RDS11</b>	El microcontrolador debe gestionar entradas de sensores y salidas hacia actuadores como válvulas o luces LED.	
<b>RDS - Modos/Estados</b>		
<b>RDS12</b>	El sistema debe operar de forma continua durante el ciclo de producción de FVH.	x
<b>RDS13</b>	Debe contar con indicadores del estado del sistema (conectividad, batería, sensores operativos).	x
<b>RDS14</b>	El sistema debe activar los actuadores solo cuando los valores monitoreados lo requieran.	x
<b>RDS - Físicos</b>		
<b>RDS15</b>	El tamaño de los nodos debe ser compacto para facilitar su instalación dentro del módulo FVH.	x
<b>RDS16</b>	Los nodos deben ubicarse en lugares estratégicos del entorno para evitar interferencias y maximizar eficiencia.	x
<b>RDS17</b>	Los sensores deben tener una carcasa resistente al agua y humedad.	x

*Fuente: Autoría*

### **3.3.3 Requerimientos de Arquitectura**

Los requerimientos de arquitectura se centran en los elementos estructurales que componen el sistema. Estos incluyen los módulos de software, los dispositivos físicos (hardware) y las conexiones eléctricas que permiten la operación integral del entorno IoT. Su correcta selección y funcionamiento garantizan que el sistema pueda cumplir con sus objetivos de automatización, control y monitoreo de las condiciones ideales para la producción de forraje verde hidropónico (FVH).

A continuación, se detallan los requerimientos arquitectónicos clasificados por subsistemas.

**Tabla 6**  
*Requerimientos de Arquitectura*

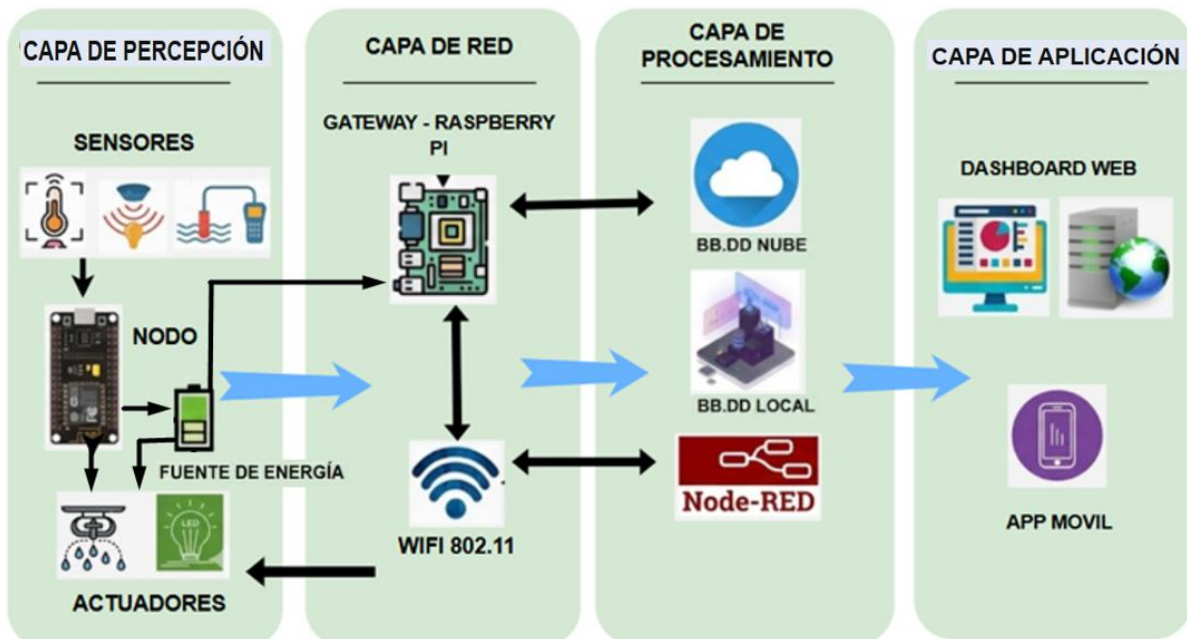
<b>RDA</b>				
#	Requerimientos de Arquitectura	Prioridad		
		Alta	Media	Baja
<b>RDA - Hardware</b>				
<b>RDA1</b>	Se debe integrar un microcontrolador con capacidad de comunicación inalámbrica (Wi-Fi).	x		
<b>RDA2</b>	Los sensores deben incluir: temperatura, humedad del ambiente y luminosidad	x		
<b>RDA3</b>	Debe existir un actuador para el riego (electroválvula) y uno para la iluminación (LED o sistema de luz artificial).	x		
<b>RDA4</b>	El hardware debe estar protegido por cajas o envolventes resistentes a la humedad y el agua	x		
<b>RDA - Software</b>				
<b>RDA5</b>	El sistema debe contar con una interfaz web o móvil para visualizar los datos en tiempo real.		x	
<b>RDA6</b>	Debe utilizar un protocolo de comunicación MQTT o HTTP para el envío de datos a la nube.	x		
<b>RDA7</b>	El backend debe almacenar los datos en una base de datos para análisis posterior.	x		
<b>RDS – Sistema Eléctrico</b>				
<b>RDA8</b>	La alimentación del sistema debe estar garantizada mediante fuente directa y batería de respaldo en caso de cortes.	x		
<b>RDA9</b>	Debe haber un sistema de regulación de voltaje que proteja los componentes ante variaciones eléctricas.	x		
<b>RDA10</b>	El cableado interno debe estar aislado y correctamente distribuido para evitar cortocircuitos o interferencias.	x		

*Fuente: Autoría*

### 3.3.4 Diagrama de Arquitectura

El diseño funcional del sistema inicia a partir de las necesidades identificadas por los stakeholders, las cuales se concretan en requerimientos específicos de medición, control y comunicación. El sistema debe medir variables ambientales esenciales para el desarrollo del FVH como la temperatura, humedad y luminosidad, utilizando sensores distribuidos en nodos secundarios basados en ESP32. Estos datos permiten controlar actuadores como válvulas de riego mediante nebulizadores y sistemas de iluminación artificial LED. La comunicación entre los nodos y el servidor se establece a través de Wi-Fi (protocolo 802.11), enviando la información hacia un nodo central Raspberry Pi 4 que gestiona el almacenamiento de datos y su visualización. Para facilitar el acceso remoto y el análisis en tiempo real, se utilizará la plataforma en la nube, permitiendo a los usuarios monitorear las variables críticas desde cualquier dispositivo móvil o computadora conectada a Internet.

**Figura 5**  
*Diagrama de arquitectura del sistema*



*Fuente: Autoría*

En la Figura 5, se muestra la arquitectura propuesta para el entorno IoT destinado a la producción de forraje verde hidropónico se compone de cinco bloques funcionales, que interactúan entre sí de forma coordinada para garantizar la adquisición, procesamiento, control y visualización remota de los datos ambientales del sistema.

En la primera etapa, se integran sensores que constarán de dos nodos, encargados de recolectar datos ambientales relevantes como temperatura y humedad ambiental. Estos datos son transmitidos de forma inalámbrica mediante tecnología Wi-Fi hacia un nodo central. El Gateway, gestiona la recepción de estos datos y coordina la activación de los actuadores según los parámetros establecidos. Asimismo, los datos recopilados son procesados a través de la plataforma, donde se almacenan en una base de datos y se vinculan a una interfaz gráfica. Finalmente, mediante un panel web, los usuarios pueden visualizar en tiempo real el comportamiento del sistema, facilitando la supervisión remota y la toma de decisiones operativas para mantener condiciones óptimas en el desarrollo del forraje.

### **3.4 Selección del Hardware y Software del Sistema**

Para el correcto funcionamiento del entorno IoT enfocado a la producción interior de forraje verde hidropónico (FVH), se ha realizado una cuidadosa selección de hardware y software. Lo que pretende garantizar confiabilidad en la adquisición de datos, eficiencia energética, automatización del sistema y accesibilidad remota.

#### ***3.4.1 Selección de Hardware para nodo Sensor***

La definición del hardware en esta etapa es clave para asegurar que el sistema responda con precisión a las condiciones del entorno hidropónico. La decisión no se limita únicamente a aspectos funcionales, sino que también considera factores como la estabilidad operativa, el consumo energético, la escalabilidad del sistema y los recursos disponibles. En el contexto del forraje verde hidropónico, donde se requiere un control continuo de variables ambientales, el

nodo de monitoreo debe ser capaz de integrar sensores diversos, procesar la información en tiempo real y mantener una comunicación fluida con el nodo central. Por lo tanto, la selección de componentes se realizó buscando un equilibrio entre confiabilidad, facilidad de implementación y adecuación al entorno de trabajo, asegurando un ambiente sólido para el desarrollo del sistema.

### 3.4.2 Selección de Microcontrolador

En el contexto del sistema IoT propuesto para el cultivo de FVH, la selección del microcontrolador se realizará considerando aspectos como el número de pines disponibles, conectividad inalámbrica, capacidad de procesamiento, compatibilidad con sensores y facilidad de desarrollo. Para ello, se analizarán cuatro opciones viables: ESP32, Arduino Nano, Arduino Mega y Arduino Uno, las cuales serán comparadas según los requerimientos técnicos establecidos previamente en el apartado 3.1.2. Esta evaluación permitirá determinar cuál de ellas se ajusta mejor a las necesidades funcionales y estructurales del nodo de monitoreo.

**Tabla 7**  
*Selección de Microcontrolador para Nodo Sensor*

Hardware	Requerimientos								Valoración
	RDRS2	RDRS7	RDRS7	RDA1	RDA5	RDS1	RDS5	RDS	Total
<b>ESP32</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	8
<b>ESP32 C3</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	8
<b>Arduino uno</b>	0	1	1	0	0	1	0	0	3
1-Cumple									
0-No Cumple									
Elección: <b>Microcontrolador ESP32 – 38 pines</b>									

*Fuente: Autoría*

Con base en la evaluación de los requerimientos específicos definidos para el nodo sensor del sistema de FVH, se analizaron tres microcontroladores: ESP32, Arduino Uno y ESP32-C3. El análisis técnico evidencia que tanto el ESP32 como el ESP32-C3 cumplen con la totalidad de los criterios establecidos, mientras que el Arduino Uno presenta limitaciones importantes, especialmente en aspectos relacionados con conectividad inalámbrica, eficiencia energética y capacidad de gestión de sensores y actuadores. Entre las dos opciones que alcanzan el puntaje máximo, se opta por el ESP32 debido a su mayor disponibilidad comercial, amplia documentación, soporte comunitario y compatibilidad directa con las bibliotecas necesarias para la implementación del sistema. Esta elección asegura una integración eficiente con los sensores, permite la transmisión de datos vía Wi-Fi y garantiza un funcionamiento estable en condiciones continuas, características esenciales para el nodo de monitoreo del entorno IoT propuesto.

**Figura****6**

*Microcontrolador ESP32 de 38 pines*



Fuente: Tomado ESP32 de 38 pines, por (<https://altronics.cl/placa-esp32-38p>)

### ***3.4.3 Selección de Sensores***

La selección de sensores constituye una etapa fundamental que garantiza la obtención precisa y confiable de las variables ambientales críticas. Los sensores elegidos deben ser capaces de medir con exactitud parámetros como la temperatura, la humedad relativa del ambiente, y la luminosidad, todos ellos esenciales para mantener condiciones óptimas en el

cultivo. La incorporación de dispositivos adecuados facilita la automatización del sistema, mejora la calidad de los datos recolectados y contribuye a un monitoreo efectivo, reduciendo la necesidad de intervención manual. Por ello, la elección de los sensores se basa en criterios que contemplan la compatibilidad con el microcontrolador, la robustez para operar en ambientes húmedos, la precisión de medición y la facilidad de integración dentro del sistema general.

#### ***3.4.4 Selección de Sensor de Temperatura y humedad***

Para lograr un monitoreo preciso y eficiente dentro del sistema de control ambiental del cultivo de forraje verde hidropónico, es fundamental integrar un sensor capaz de medir con exactitud la temperatura del entorno. Esta variable es determinante para establecer el momento adecuado para la activación del sistema de riego, evitando condiciones que puedan comprometer el desarrollo del cultivo. En este sentido, se ha realizado una comparación entre tres tipos de sensores de temperatura DHT11, DS18B20 y DHT22 con el objetivo de seleccionar aquel que mejor se ajuste a las características del proyecto, priorizando factores como la precisión, confiabilidad y facilidad de integración con el microcontrolador elegido anteriormente.

#### **Figura 7**

*Selección de sensor de temperatura y humedad ambiental*

<b>Hardware</b>	<b>Requerimientos</b>							<b>Valoración</b>
	<b>RDRS2</b>	<b>RDRS6</b>	<b>RDA2</b>	<b>RDA7</b>	<b>RDS8</b>	<b>RDS9</b>	<b>RDS17</b>	<b>Total</b>
<b>DHT11</b>	1	1	1	0	1	1	1	6
<b>DHT22</b>	1	1	1	1	1	1	1	7
<b>DS18B20</b>	1	1	1	1	1	1	0	6
1-Cumple								
0-No Cumple								

---

**Elección:** Sensor de Temperatura y Humedad DHT22

---

*Fuente: Autoría*

Después de evaluar los sensores DHT11, DHT22 y DS18B20 en función de los requerimientos técnicos del sistema de monitoreo para el forraje verde hidropónico, se concluye que tanto el DHT22 como el DS18B20 cumplen de manera más completa con las especificaciones necesarias, destacándose por su amplia precisión, rango operativo y resistencia en ambientes húmedos. El DHT11, aunque económico y fácil de integrar, presenta limitaciones en cuanto a su precisión y rango de medición, lo que podría afectar la confiabilidad del monitoreo ambiental. La elección se fundamenta en la versatilidad del DHT22, que además de medir temperatura, registra humedad relativa, función vital para el control integral del sistema. Por estas razones, el DHT22 es el sensor seleccionado para garantizar mediciones precisas y confiables en el proyecto.

**Figura****8**

*Sensor de Temperatura y Humedad DHT 22*



*Fuente:* Tomado Sensor de Temperatura y Humedad DHT22. Por ()

(<https://naylorlampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/58-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht22-am2302.html>)

Selección del sensor de luminosidad

### 3.4.5 Selección de Electroválvula

Para implementar un sistema automatizado de riego en el entorno de producción del cultivo, es fundamental contar con un mecanismo electrónico que regule con precisión el flujo de agua. En este contexto, se utilizan electroválvulas solenoides, dispositivos que responden a señales eléctricas enviadas por el controlador para abrir o cerrar el paso del agua según las condiciones de riego requeridas. Para este proyecto, se emplearán electroválvulas solenoides de 12 V, ya que ofrecen la combinación adecuada de eficiencia, confiabilidad y compatibilidad con el sistema de control diseñado.

#### **Figura**

*Electroválvula Solenoide 12v*

9



*Fuente: Tomado Electroválvula Solenoide 12v, por (), (<https://tecmikro.com/motores/560-electrovalvula-valvula-solenoide.html>)*

### 3.4.6 Selección del Software de Gestión para Nodos Sensores

Es esencial elegir el software adecuado para la programación y configuración de los microcontroladores que actúan como nodos sensores. Entre las opciones más relevantes se encuentran el entorno Arduino IDE y el lenguaje Python, ambos ampliamente utilizados en el ámbito de la electrónica y el desarrollo embebido. La decisión sobre cuál emplear se fundamenta en un análisis comparativo de sus funcionalidades, facilidad de uso, compatibilidad con los dispositivos ESP32, y su capacidad para facilitar el desarrollo eficiente y la gestión del

firmware. Este análisis se presenta en una tabla comparativa que apoyará la selección óptima para garantizar un desarrollo ágil y robusto del sistema.

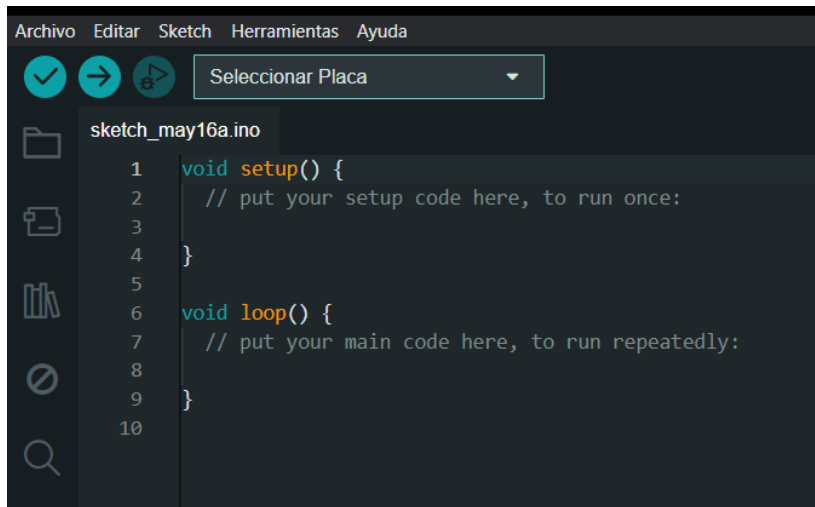
**Tabla 8**  
*Selección de Software para Nodo Sensor*

Hardware	Requerimientos								Valoración
	RDRS4	RDRS6	RDS2	RDS5	RDS7	RDS14	RDA5	RDA6	Total
<b>Arduino</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	8
<b>IDE</b>									
<b>Python</b>	1	1	1	1	1	1	0	0	6
1-Cumple									
0-No Cumple									
<b>Elección:</b> Arduino IDE									

*Fuente: Autoría*

Para la programación de los nodos de monitoreo, se ha seleccionado el entorno de desarrollo Arduino IDE. Esta decisión responde a su interfaz intuitiva y a la extensa comunidad de usuarios que brinda soporte continuo y recursos actualizados. Además, Arduino IDE cuenta con un amplio conjunto de bibliotecas específicas para el microcontrolador ESP32, lo que facilita la escritura, compilación y carga del firmware en los dispositivos. Aunque existen diversas alternativas, la accesibilidad y la compatibilidad de esta plataforma con el hardware elegido la convierten en la opción más adecuada para el desarrollo y mantenimiento del software embebido en el proyecto.

**Figura 10**  
*IDE de Arduino*



*Fuente: Autoría Propia. Entorno de IDE de Arduino para la programación y flasheo de los nodos sensores.*

### ***3.4.7 Selección de Tecnología Inalámbrica de corto alcance***

Seleccionar una tecnología inalámbrica que garantice la transmisión eficiente de datos entre los nodos sensores y el nodo central es fundamental. En este sentido, las tecnologías de corto alcance resultan idóneas debido a la configuración espacial del sistema y las distancias relativamente reducidas entre los dispositivos. Entre las opciones evaluadas se encuentran Bluetooth, Wi-Fi y ZigBee, cada una con características específicas en términos de consumo energético, velocidad de transferencia, alcance efectivo y facilidad de integración con los microcontroladores ESP32. La selección se basa en un análisis comparativo de estos factores, tomando en cuenta las necesidades particulares del proyecto para asegurar una comunicación estable, confiable y eficiente en el entorno cerrado del cultivo.

**Tabla 9**  
*Selección de Tecnologías Inalámbricas*

<b>Redes</b>	<b>Requerimientos</b>							<b>Valoración</b>
<b>Inalámbricas</b>	<b>RDRS4</b>	<b>RDRS6</b>	<b>RDS4</b>	<b>RDS6</b>	<b>RDS7</b>	<b>RDA1</b>	<b>RDA6</b>	<b>Total</b>

<b>Bluetooth</b>	0	1	1	1	1	0	0	4
<b>Wi-Fi</b>	1	1	1	0	1	1	1	6
<b>ZigBee</b>	0	1	1	1	1	0	0	4
1-Cumple								
0-No Cumple								
<b>Elección:</b> Tecnología Wi-Fi								

*Fuente: Autoría*

Con base en la evaluación de las tecnologías inalámbricas más comunes para la comunicación entre nodos a distancias cortas, se determinó que Wi-Fi es la opción que mejor cumple con los requerimientos establecidos. A diferencia de Bluetooth y ZigBee, Wi-Fi ofrece conectividad directa a internet, lo cual facilita la transmisión de datos hacia plataformas en la nube para su almacenamiento y visualización en tiempo real. Además, permite una comunicación eficiente entre los nodos y el servidor central utilizando protocolos estándar como MQTT y HTTP. Aunque Wi-Fi presenta un consumo energético mayor en comparación con ZigBee o Bluetooth, su mayor ancho de banda y compatibilidad con interfaces web y móviles lo convierten en la alternativa más adecuada para garantizar un monitoreo continuo, confiable y accesible del entorno de cultivo.

#### **3.4.8 Selección de Hardware para Nodo Central (Gateway)**

Dentro de la arquitectura propuesta para el sistema IoT de monitoreo de forraje verde hidropónico, resulta esencial seleccionar un nodo gateway con capacidad suficiente para recibir, procesar y retransmitir la información proveniente de los nodos sensores distribuidos. Este nodo central debe contar con un mayor poder de procesamiento en comparación con los microcontroladores de los nodos secundarios, ya que se encarga de consolidar los datos y gestionarlos para su almacenamiento en la nube. Además, el gateway facilita la visualización en tiempo real a través de dashboards y permite la ejecución de algoritmos de control que

optimizan la automatización del sistema, asegurando un monitoreo eficiente y una toma de decisiones adecuada basada en la información recopilada.

### 3.4.9 Selección de Microcontrolador para Nodo Central

En función de los requerimientos establecidos para el sistema IoT de monitoreo y control del cultivo de forraje verde hidropónico, se analizarán tres microcontroladores que pueden desempeñar el rol de nodo gateway: la Raspberry Pi 4, el Arduino Mega y el Intel Galileo. Para determinar la opción más adecuada, se realizará un análisis comparativo basado en sus características técnicas y la compatibilidad con las necesidades específicas del proyecto, buscando garantizar un desempeño eficiente en la recolección, procesamiento y transmisión de datos, así como en la gestión del almacenamiento y la visualización remota.

Hardware	Requerimientos							Valoración
	RDRS1	RDRS4	RDRS6	RDS4	RDS7	RDA1	RDA6	Total
<b>Raspberry Pi 4</b>	1	1	1	1	1	1	1	7
<b>Arduino Mega</b>	1	0	1	0	0	0	0	2
<b>Intel Galileo</b>	1	0	1	0	0	0	0	2
1-Cumple								
0-No Cumple								
<b>Elección:</b> Microcontrolador Raspberry Pi 4								

*Fuente: Autoría*

Con base en la evaluación detallada de los requerimientos técnicos y operativos del sistema para la producción de FVH, se analizaron tres opciones de microcontroladores para el nodo gateway: Raspberry Pi 4, Arduino Mega e Intel Galileo. El análisis evidencia que la Raspberry Pi 4 cumple con la mayoría de los criterios críticos, incluyendo capacidad de

procesamiento, conectividad inalámbrica, almacenamiento de datos y soporte para protocolos estándar como MQTT y HTTP. Por otro lado, aunque el Arduino Mega y el Intel Galileo ofrecen algunas ventajas en consumo energético y simplicidad, presentan limitaciones significativas en conectividad y capacidad de gestión integral del sistema. Por estas razones, la Raspberry Pi 4 se selecciona como la opción más adecuada para fungir como nodo central, asegurando un manejo eficiente, estable y escalable de la información proveniente de los nodos sensores, así como una mejor integración con plataformas de visualización y control remoto.

### Figura

11

*Selección de Raspberry Pi 4 para Nodo Central (Gateway)*



Fuente: Tomado Raspberry Pi 4, por () (<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>)

#### **3.4.10 Selección del Software para la Nodo Central**

La elección del software para el gateway del sistema debe responder a los requerimientos planteados en la sección 3.1.4, asegurando compatibilidad y desempeño con la plataforma hardware seleccionada, en este caso la Raspberry Pi 4. Este software debe gestionar de manera eficiente el almacenamiento de datos, la transmisión segura y confiable hacia la nube mediante protocolos como MQTT o HTTP, y la presentación dinámica de la información a través de herramientas de visualización, como dashboards personalizados basados en tecnologías web. La implementación de estas funciones permitirá mantener un flujo continuo

y organizado de datos, facilitando la supervisión en tiempo real y el análisis histórico, elementos esenciales para la toma de decisiones en la producción hidropónica.

### 3.4.11 Selección del Software para Microcontrolador Raspberry Pi 4

El nodo gateway, basado en la Raspberry Pi 4, utilizará como sistema operativo una distribución Linux optimizada llamada Raspberry Pi OS. Este sistema operativo proporciona un entorno estable y versátil, equipado con una interfaz gráfica accesible y un conjunto de herramientas preinstaladas que facilitan la administración del hardware y la gestión de las conexiones de red, ya sea por Wi-Fi o Ethernet. Entre estas herramientas destaca el entorno de desarrollo Python, que permite implementar y ejecutar el software necesario para manejar el bróker MQTT, responsable de la comunicación eficiente y segura de los datos hacia la nube o hacia sistemas locales. También, este software posibilita el procesamiento y análisis en tiempo real de la información recibida desde los nodos sensores, así como la ejecución de algoritmos para la toma de decisiones automáticas y la generación de alertas dirigidas a los usuarios. De esta manera, el sistema operativo elegido cumple un rol fundamental en la operación integrada y coordinada del gateway dentro del ecosistema IoT.

#### Figura 12

Interface del Sistema Operativo Raspberry Pi OS



Fuente: Tomado Sistema Operativo Raspberri Pi OS, por ()

(<https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/configuration.html> )

### 3.4.12 Selección del Software para Almacenamiento y Visualización de Datos

Para el almacenamiento y visualización eficiente de los datos generados por los nodos sensores, es fundamental seleccionar un software que ofrezca confiabilidad, accesibilidad y compatibilidad con el hardware empleado. La plataforma debe permitir almacenar grandes volúmenes de información ambiental, proporcionar herramientas para la presentación gráfica de los datos y facilitar el acceso remoto mediante interfaces web o móviles. Asimismo, debe integrarse con protocolos estándar para asegurar la comunicación fluida entre el nodo gateway y la nube. En este sentido, se prioriza la elección de soluciones que brinden una experiencia intuitiva para el usuario final y que permitan la generación de reportes que apoyen la toma de decisiones en el manejo del cultivo. Estas características serán determinantes para garantizar un monitoreo continuo y un control efectivo del proceso productivo.

**Figura 13**

*Selección de Plataforma para el Almacenamiento y Visualización de Datos*

Plataforma	Requerimientos								Valoración Total
	RDRS4	RDRS5	RDRS8	RDRS10	RDRS11	RDA5	RDA6	RDA7	
ThingSpeak	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Blynk	1	1	1	1	1	1	0	0	6
Firestore	1	1	1	0	1	0	1	1	6
1-Cumple									
0-No Cumple									
<b>Elección:</b> Plataforma en la nube ThingSpeak									

*Fuente: Autoría*

Con base en la evaluación detallada de los requerimientos del sistema para la gestión y visualización de datos en la nube, se concluye que la plataforma ThingSpeak es la opción más

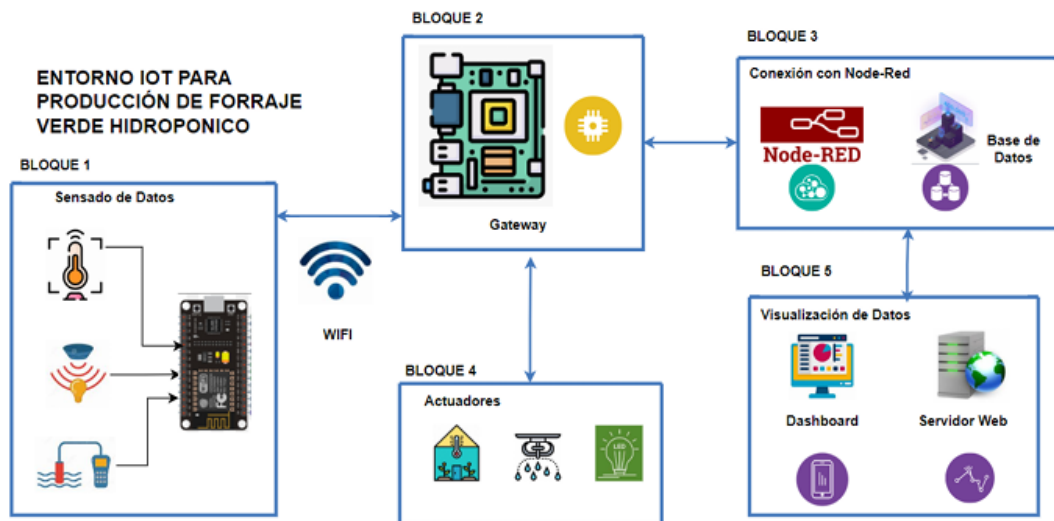
adecuada para el proyecto de monitoreo del forraje verde hidropónico. Debido que, destaca por cumplir con la mayoría de los criterios técnicos y operativos, incluyendo la conectividad estable, almacenamiento eficiente, capacidad para automatizar procesos y una interfaz intuitiva y accesible desde dispositivos móviles y web. Aunque Blynk y Firebase también ofrecen funcionalidades relevantes, ThingSpeak sobresale por su compatibilidad con protocolos estándares como MQTT y HTTP, su facilidad para el envío periódico de datos y su robustez en la presentación gráfica y generación de reportes. Estas características hacen de ThingSpeak una solución integral que facilita el monitoreo remoto y la toma de decisiones basada en datos en tiempo real.

### **3.5 Etapa de Diseño**

Durante esta etapa se aborda la construcción estructurada del prototipo, detallando tanto su esquema físico como lógico. Se incorporan los diagramas representativos de los nodos sensores y del nodo central Gateway, acompañados de la explicación correspondiente sobre su funcionamiento. Además, se describen los procesos de configuración necesarios y los códigos implementados para garantizar un desarrollo eficaz. Esta etapa representa el núcleo del proyecto, ya que permite consolidar la información obtenida en fases anteriores, integrando los requerimientos técnicos con las necesidades funcionales para asegurar una implementación sólida y alineada con los objetivos establecidos.

En la Figura 14 se muestra la arquitectura que permitirá el funcionamiento del entorno IoT para la producción de Forraje Verde Hidropónico.

**Figura 14**  
*Entorno IoT para producción FVH*



*Fuente: Autoría*

El primer bloque se compone de los nodos sensores (2) los cuales se encargan de adquisición de datos de temperatura, humedad ambiental y cantidad lumínica, con la ayuda de los sensores DHT22 y BH1750 respectivamente. Los datos se envían al nodo central o Gateway mediante la comunicación por wifi 802.11.

En el bloque 2 se presenta el Gateway quien será el encargado de realizar la función de intermediario entre los datos del entorno y el envío de datos hacia la nube para un almacenamiento integro. En la nube se almacenan la información del entorno en una base de datos, de forma que, agilite el acceso y la gestión de lo mismo.

En el bloque 3, se gestiona los datos de forma ordenada y estética mediante el software libre Node-RED, ayudando a la recepción de datos y almacenando en una base de datos y a su posterior diseño de interfaz gráfica para la visualización del entorno

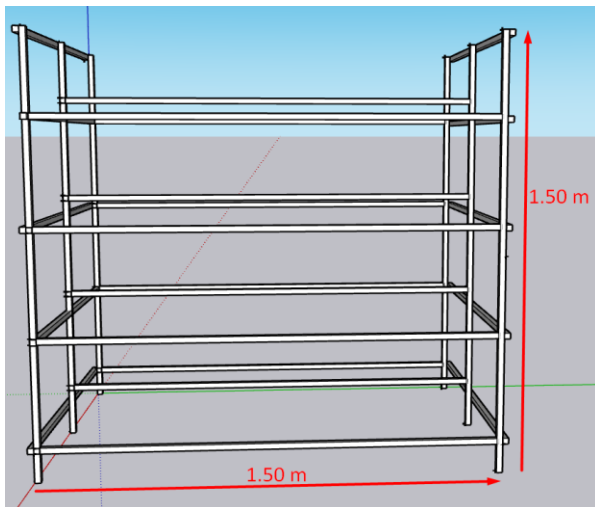
En el bloque 4, se encuentran los actuadores los mismo que cumplirán la función de activación de electroválvulas y activación de luz artificial. Parámetros que entrarán en funcionamiento mediante la programación en base a horarios y umbrales de funcionamiento óptimo para el cultivo, evitando excesos o falta de recursos.

Finalmente, el bloque 5 se enfoca en la capa final de la arquitectura IoT, capa aplicación. Los datos previamente almacenados serán puestos en visualización con la ayuda de la interfaz gráfica de Node-RED, ayudando a presentar un diseño ordenado y estético de los datos que se presentan en el entorno FVH en un formato de página web. De la misma manera el sistema permitirá monitorear en tiempo real mediante una app móvil, ayudando así a dar una solución versátil.

### ***3.5.1 Construcción de Estructura para bandejas de FVH***

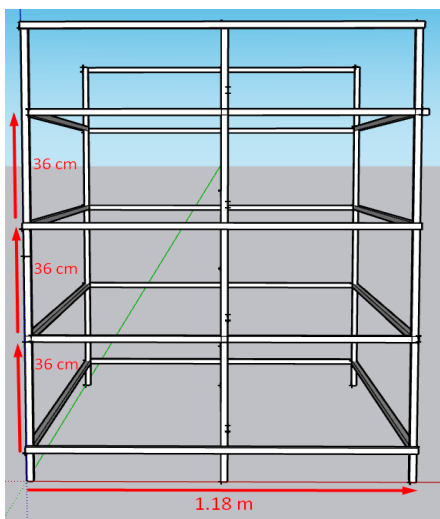
Para la implementación del entorno IoT de FVH, es fundamental cumplir con varios parámetros específicos. Siguiendo los requerimientos de espacio y carga establecidos en la Sección 3.2, se diseñó una estructura modular de 1,5 m de ancho, 1,18 m de fondo y 1,5 m de altura para soportar las bandejas del sistema FVH. Como se observa en las Figuras 15 y 16 la estructura, además de optimizar el aprovechamiento del espacio vertical, facilita las tareas de siembra, riego y mantenimiento, y ofrece la versatilidad necesaria para su montaje, desmontaje o reubicación según las necesidades del proyecto. La estructura se ensambla de material metálico anti oxidante para evitar que la oxidación pueda caer dentro del cultivo y genere un mal desarrollo del mismo. La estructura está diseñada para alojar 40 bandejas, distribuidas 5 bandejas por nivel (4 niveles), constando 20 bandejas por cada lado de la estructura. Las medidas de la estantería se basaron de acuerdo a las dimensiones de las bandejas.

**Figura 15**  
*Diseño de Estructura Vista Frontal*



*Fuente: Autoría*

**Figura 16**  
*Diseño de Estructura Vista Lateral*



*Fuente: Autoría*

### **3.5.2 Construcción del Entorno IoT para FVH**

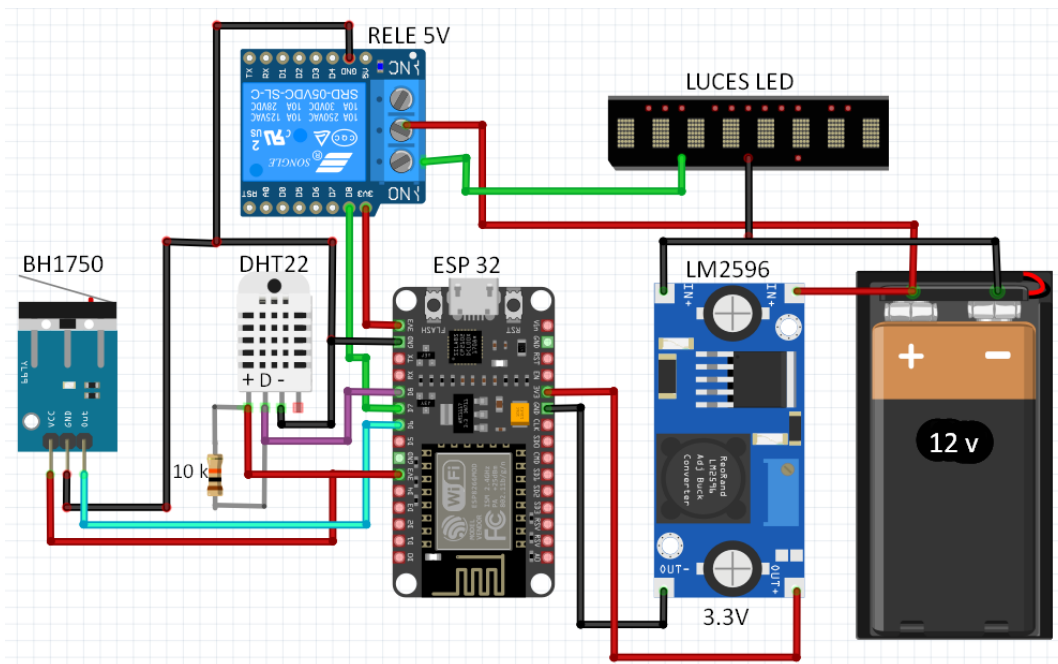
Para el desarrollo del sistema IoT destinado al monitoreo y control de variables ambientales en la producción de forraje verde hidropónico, se tomó como referencia el análisis detallado del entorno y las necesidades específicas del cultivo, El diseño contempla una topología de red tipo estrella, en la que se integran múltiples nodos sensores distribuidos y un nodo central que actúa como gateway. Esta arquitectura permite una gestión eficiente y

centralizada de la información, facilitando la automatización y control del sistema. Para una operación optimizada, se asignaron funciones específicas a diferentes microcontroladores, garantizando una distribución funcional que responde a los requerimientos establecidos. En cuanto a las variables ambientales, se seleccionaron cuidadosamente parámetros como la temperatura y la humedad relativa del aire y luminosidad en concordancia con las necesidades del cultivo.

### ***3.5.3 Diagrama de Conexiones en Nodo Sensor 1***

Siguiendo la topología definida en la Sección 3.2 y detallada en la Figura 5, el Nodo Sensor 1 se configura para medir temperatura, humedad del ambiente e iluminación, así como para accionar una tira de LEDs según las condiciones detectadas. En la Figura 17 se muestra el diagrama de circuito que consta de: una batería de 12v alimenta un convertidor reductor LM2596, ajustado a 3,3v, que suministra energía al microcontrolador ESP32 y a los sensores DHT22 y BH1750. El DHT22 recibe 3,3v y su línea de datos, con una resistencia pull-up de 10 k $\Omega$ , se conecta a un GPIO del ESP32; el BH1750 se integra vía I<sup>2</sup>C en los pines SDA y SCL del mismo microcontrolador. Para el accionamiento de la tira LED, un módulo de relé de 5v se alimenta directamente de la fuente y su entrada de control se enlaza a otro GPIO del ESP32, permitiendo conmutar el positivo de la carga manteniendo la masa común en todo el sistema. Este esquema garantiza referencias de tensión estables y un control digital preciso de los sensores y actuadores, cumpliendo con los requisitos del proyecto.

**Figura 17**  
*Diagrama de Conexiones del Nodo Sensor 1*



*Fuente: Autoría*

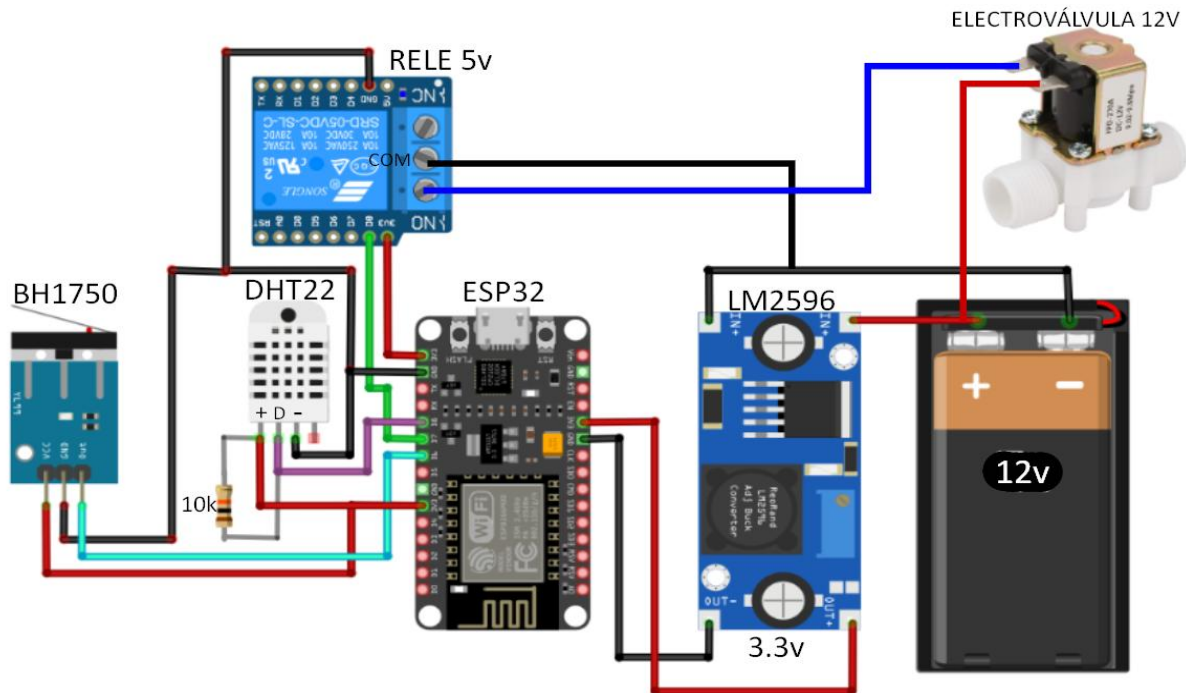
### 3.5.4 Diagrama de Conexiones en Nodo Sensor 2

Siguiendo la topología definida en la Sección 3.2 y detallada en la Figura 5, el Nodo Sensor 2 se configura para medir temperatura, humedad ambiental e iluminación, así como para accionar una electroválvula de 12v en función de los umbrales establecidos. En la Figura 18 se muestra el diagrama de circuito que consta de: una batería de 12v alimenta un convertidor reductor LM2596, ajustado a 3,3v, que suministra energía al microcontrolador ESP32 y a los sensores DHT22 y BH1750. El DHT22 recibe 3,3v y su línea de datos, con una resistencia pull-up de 10 kΩ, se conecta a un GPIO del ESP32; el BH1750 se comunica vía I<sup>2</sup>C a través de los pines SDA y SCL del mismo microcontrolador. Para el accionamiento de la electroválvula, un módulo de relé de 5v se alimenta directamente de la fuente y su entrada de control (IN) se enlaza a otro GPIO del ESP32. El contacto normalmente abierto (NO) del relé conduce el positivo de 12 V hacia la electroválvula, manteniendo la masa común en todo el sistema. Este esquema garantiza referencias de tensión estables y un control digital preciso

tanto de las lecturas ambientales como de la apertura y cierre de la electroválvula, optimizando la gestión automatizada del riego según los requisitos del proyecto.

**Figura 18**

*Diagrama de Conexiones del Nodo Sensor 2*



*Fuente: Autoría*

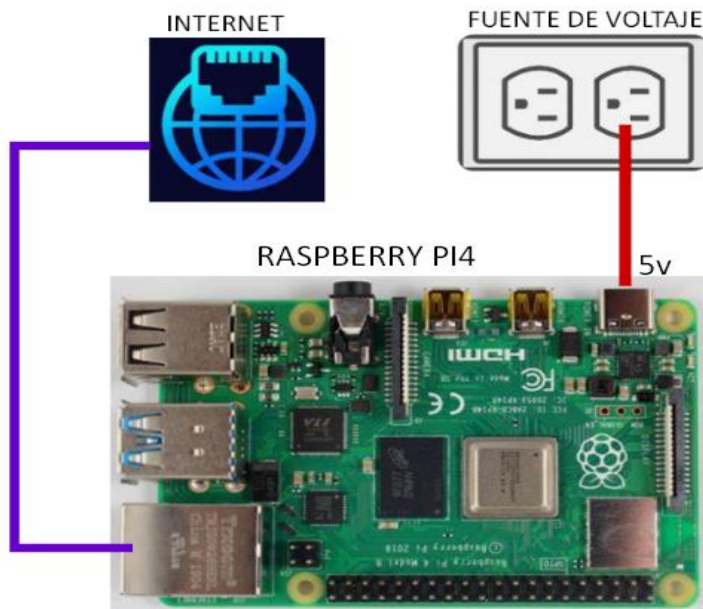
### 3.5.5 Diagrama de Conexiones del Nodo Central Gateway

Para el diseño del Nodo Central Gateway, responsable de recibir y administrar toda la información proveniente de los Nodos Sensores, se optó por emplear una Raspberry Pi 4, tal como se describe en la Sección 3.2. En la Figura 19 se muestra su conexión a la fuente de alimentación, ya sea a través de una batería o de un tomacorriente, garantizando suministro continuo. La Raspberry Pi 4 asume las funciones críticas de adquisición de datos, almacenamiento, procesamiento y visualización de las variables ambientales y de riego, ofreciendo la potencia de cómputo y las interfaces de red necesarias para integrar la red de sensores y el servicio de control remoto. La elección de esta plataforma de hardware para el Gateway, basada en sus prestaciones de comunicación y capacidad de cómputo, resulta

fundamental para asegurar la estabilidad del sistema de monitoreo y permitir una gestión eficiente del riego automatizado en el cultivo.

**Figura 19**

*Diagrama de Conexiones del Nodo Central Gateway*



*Fuente: Autoría*

Esta función de puente y procesamiento garantiza que el sistema pueda supervisar las condiciones en tiempo real y que pueda gestionar de manera rápida y efectiva posible. La configuración del Gateway es, por tanto, esencial para la eficiencia del sistema FVH.

**3.5.6. Diagrama de flujo de nodo central Gateway**

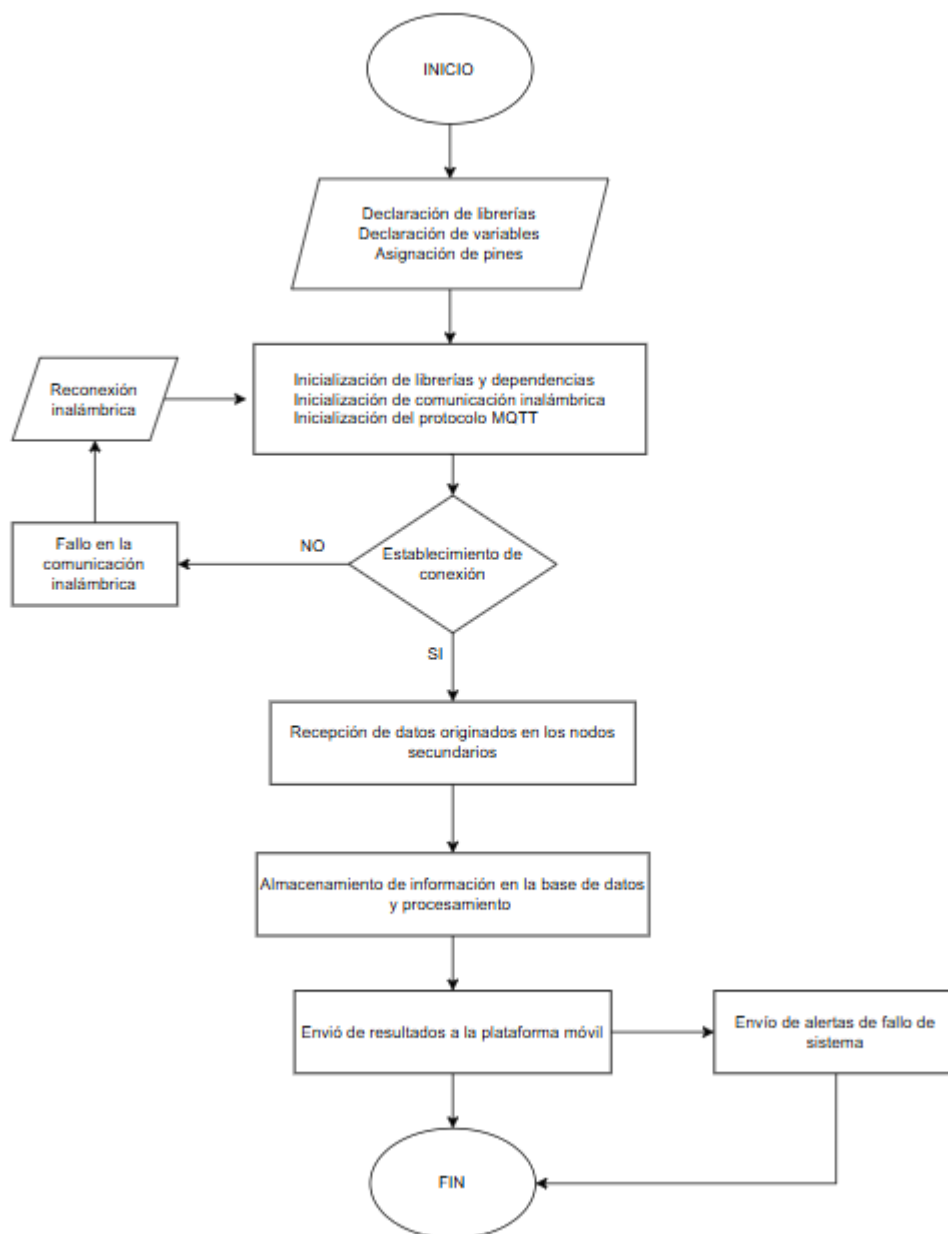
En la figura 20 se describe el diagrama de flujo que representa el proceso operativo del Gateway dentro de la arquitectura IoT para la producción de forraje verde hidropónico, enfocándose en su función como Bloque 2 y Bloque 3.

El ciclo se inicia con la declaración de librerías, variables y la asignación de pines, seguido por la inicialización de dependencias y el crucial establecimiento de la comunicación inalámbrica y del protocolo MQTT. El sistema realiza una comprobación de la conexión; si esta falla, se intenta una reconexión inalámbrica para mantener la operatividad. Una vez establecida la conexión con éxito, el Gateway procede a la recepción de los datos generados

por los sensores ubicados en los nodos secundarios (Bloque 1). Posteriormente, la información es sometida a un proceso de almacenamiento en la base de datos y procesamiento (gestionado por herramientas como Node-RED en el Bloque 3). Finalmente, los resultados del procesamiento se envían a la plataforma móvil (Bloque 5) para su visualización. Cualquier fallo del sistema en este proceso desencadena el envío de alertas, asegurando la monitorización continua hasta el punto de finalizar el ciclo FVH.

**Figura 20**

*Diagrama de flujo de Nodo Central*



*Fuente: Autoría*

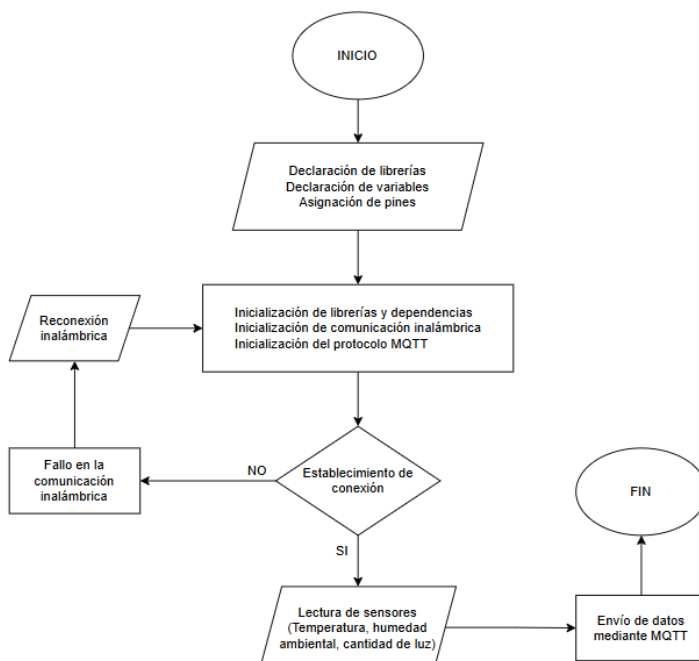
### 3.5.7. Diagrama de flujo de nodo sensor secundario

En la Figura 21, se muestra el diagrama de flujo que describe el proceso de inicialización y operación de los nodos secundarios o de sensado ubicados en el Bloque 1.

El proceso comienza con la declaración de librerías, variables y la asignación de pines, seguido por la inicialización de librerías y dependencias, el establecimiento de la comunicación inalámbrica y la inicialización del protocolo MQTT. A continuación, se evalúa si la conexión se ha establecido correctamente. Si la conexión falla, se activa un proceso de reconexión inalámbrica. Una vez que la conexión se establece con éxito (la respuesta es "SI"), el nodo secundario procede a la lectura de los sensores, recopilando datos de temperatura, humedad ambiental y cantidad de lumínica. Finalmente, esta información es enviada al Gateway mediante el protocolo MQTT, dando por finalizado el ciclo de envío de datos.

**Figura 21**

*Diagrama de flujo de nodo sensor secundario*



*Fuente: Autoría*

### **3.6 Calibración y lectura de datos mediante sensores**

Esta sección detalla el proceso de preparación, configuración y calibración de los sensores seleccionados previamente en el apartado 3.4, los cuales están diseñados para realizar mediciones en tiempo real de diversas variables ambientales, esenciales para el monitoreo inteligente del sistema de cultivo. Cada sensor ha sido seleccionado y adaptado según los requerimientos específicos del entorno, permitiendo una captura eficiente y precisa de datos relevantes para el control agronómico.

Los sensores empleados operan tanto en modalidad analógica como digital, dependiendo de la naturaleza de la variable monitoreada y del estado fenológico del cultivo.

De este modo, la calibración adecuada de los sensores no solo asegura la fiabilidad de los datos recogidos, sino que también garantiza una respuesta eficiente del sistema automatizado de riego, optimizando el uso de recursos hídricos y favoreciendo el desarrollo óptimo del cultivo.

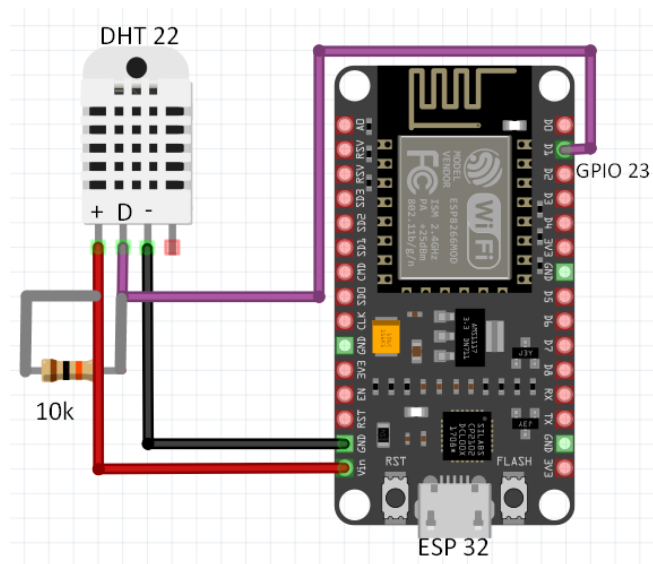
#### ***3.6.1 Adquisición de Datos de Temperatura y Humedad Ambiental***

La adquisición de datos de temperatura y humedad ambiental se realiza mediante el sensor DHT22, un dispositivo digital comúnmente utilizado en sistemas IoT por su precisión y bajo costo. Este sensor es parte fundamental del Bloque 1: Sensado de Datos del entorno hidropónico, y su conexión se realiza directamente a la placa de desarrollo ESP32 como se muestra en la Figura 22.

El circuito está configurado por el pin de alimentación VCC del sensor DHT22 se conecta al pin Vin o 5V de la placa ESP32. El pin de tierra GND del sensor se conecta al pin GND de la ESP32. El pin de datos (D) del DHT22 se conecta a un pin de Entrada/Salida digital de la ESP32, específicamente el GPIO 23. Además, se incorpora una resistencia Pull-Up de 10k ohmios (10k) conectada entre la línea de datos y la línea de alimentación. Esta resistencia

es necesaria para garantizar que la señal de datos permanezca en un estado lógico alto predeterminado, asegurando una comunicación estable y confiable entre el sensor y la ESP32.

**Figura 22**  
*Conexión de esp32 y sensor DHT22*



*Fuente: Autoría*

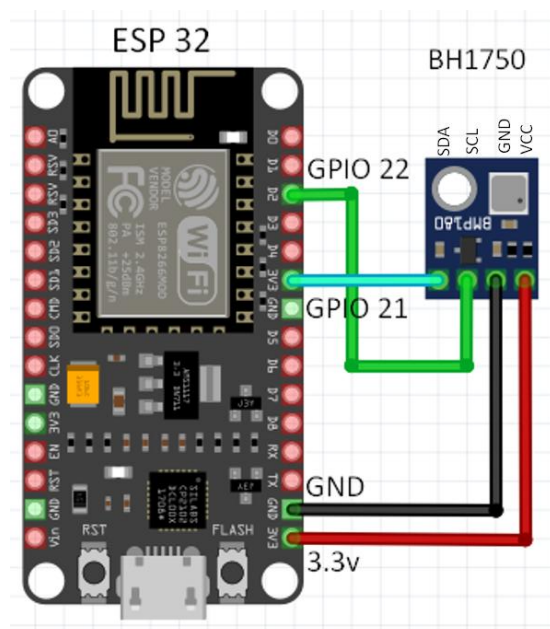
La correcta conexión del circuito de sensado, que vincula el sensor DHT22 a la placa ESP32, es de importancia crucial para garantizar la integridad, fiabilidad y precisión de los datos de temperatura y humedad ambiental, evitando lecturas inconsistentes o daños al hardware. La finalidad de esta conexión precisa, incluyendo elementos como la resistencia Pull-Up de 10k ohmios para la estabilidad de la señal, es asegurar que el nodo secundario pueda establecer la comunicación inalámbrica y MQTT, cumpliendo así el objetivo de adquirir datos válidos que el Gateway y el sistema de procesamiento requieren para una toma de decisiones efectiva y el monitoreo en tiempo real del forraje verde hidropónico.

### ***3.6.2 Adquisición de Datos de Luminosidad***

La medición de la cantidad luminosidad, es fundamental para el control del fotoperiodo en el forraje verde hidropónico, se realiza mediante el sensor digital BH1750. Este sensor emplea el protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C, lo que permite una transmisión de datos eficiente con solo dos líneas de señal, y es capaz de medir la intensidad de la luz en unidades de lux.

El BH1750 forma parte del Bloque 1 de sensado de Datos y su conexión a la placa microcontroladora ESP32. En la Figura 23 se muestra la conexión del sensor BH1750. En donde, el pin VCC del sensor BH1750 se conecta al pin de 3.3V de la ESP32. El pin GND del sensor se conecta al pin GND de la ESP32. El pin de la Línea de Datos Serial SDA del sensor, utilizado para la transferencia de datos, se conecta al pin GPIO 21 de la ESP32. El pin de la línea de Reloj Serial SCL del sensor, utilizado para la sincronización de la comunicación I<sup>2</sup>C, se conecta al pin GPIO 22 de la ESP32.

**Figura 23**  
*Conexión de sensor de luz BH1750*



*Fuente: Autoría*

La finalidad de esta conexión precisa es asegurar que el nodo secundario pueda establecer la comunicación inalámbrica y MQTT, cumpliendo así el objetivo de adquirir datos válidos de lux que el Gateway y el sistema de procesamiento requieren para una toma de decisiones efectiva sobre la activación de la iluminación artificial, garantizando el monitoreo en tiempo real y las condiciones óptimas del fotoperiodo para el forraje verde hidropónico.

### **3.7 Desarrollo de la Programación del Sistema**

El presente apartado detalla la metodología de codificación de los nodos de sensado. Esta abarca desde la captación de señales analógicas y su posterior transformación en unidades digitales específicas para cada hardware. Se analiza en profundidad la interacción entre los distintos nodos de la red, así como la administración del almacenamiento a nivel local. Se concluye abordando la presentación de estos datos mediante una interfaz para dispositivos móviles, posibilitando una supervisión remota y eficaz del sistema. En el punto inicial de la programación, se establece la configuración operativa de los nodos sensores, cuya lógica se estructura rigurosamente a partir de diagramas, en esta fase preliminar, se especifican las variables destinadas a contener los valores recopilados por los sensores.

#### ***3.7.1 Lectura de datos de temperatura del sensor DHT22***

El sensor DHT22 incorpora un microcontrolador integrado que gestiona la calibración de manera autónoma. Este componente se encarga de convertir las lecturas brutas en unidades normalizadas estándar, es decir, grados Celsius (°C) para la temperatura y porcentaje (%) para la humedad. Además de procesar los datos internamente, el dispositivo transmite las mediciones directamente al sistema.

En la Figura 24, se muestra el código que indica la inclusión de la librería DHT.h, la cual es esencial para el proyecto ya que proporciona las funciones necesarias para que el microcontrolador pueda comunicarse de forma efectiva con los sensores de temperatura y humedad de la serie DHT. Al utilizar la directiva `#include <DHT.h>`, el programa incorpora las herramientas para interpretar y convertir las señales brutas del sensor en lecturas precisas de temperatura en grados Celsius y humedad en porcentaje, facilitando la adquisición de datos ambientales para su posterior procesamiento.

## Figura 24

*Librerías del sensor DHT22*

```
#include <WiFi.h>
#include <time.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <BH1750.h>
```

*Fuente: Autoría*

En la Figura 25, se muestra el código de la función de programa que tiene un doble propósito: adquirir datos y hacerlos visibles. Las primeras dos líneas ejecutan las lecturas del sensor DHT, asignando el valor de la temperatura a la variable “t” y el de la humedad a la variable “h”. Estas funciones se comunican con el sensor a través del pin de datos definido anteriormente y almacenan el resultado en variables de tipo float (números con decimales). Las líneas siguientes se encargan de mostrar esta información de manera ordenada en el monitor serial de la computadora; imprimen primero una etiqueta descriptiva ("Temp:" o "Humedad:"), luego el valor numérico recién capturado y, finalmente, las unidades de medida correspondientes (°C y %) y un separador, asegurando que el usuario pueda interpretar fácilmente los datos ambientales recogidos.

## Figura 25

*Lectura e impresión de datos del sensor DHT22*

```
void leerSensores() {
  float t = dht.readTemperature(); // Lectura de temperatura en °C
  float h = dht.readHumidity(); //Lectura de Humedad ambiental en %
  float lux = lightMeter.readLightLevel(); // Lectura de luminosidad en %
  Serial.print("Temp: "); Serial.print(t); Serial.print(" \u00b0C | ");
  Serial.print("Humedad: "); Serial.print(h); Serial.print(" % | ");
  Serial.print("Luz: "); Serial.print(lux); Serial.println(" lx");
}
```

*Fuente: Autoría*

En la Figura 26 se muestra el código de muestreo horario, en la primera línea define la constante de tiempo establecida en **900,000 milisegundos**, lo que equivale exactamente a 15

minutos. Es la pieza clave que determina la frecuencia de muestreo del entorno. Se programó con el sufijo UL (Unsigned Long) para asegurar que el procesador gestione correctamente un número tan grande sin errores de desbordamiento, garantizando que el sistema sea estable a largo plazo.

El siguiente bloque es el encargado de ejecutar la toma de datos de forma no bloqueante. En lugar de detener el procesador, compara el tiempo actual con el de la última lectura; si han pasado 15 minutos, actualiza la marca de tiempo y dispara las funciones leerSensores () y publicarSensores (). Este proceso es vital porque permite la independencia total de funciones: el sensor trabaja a su ritmo lento (cada 15 min) mientras el sistema de riego sigue vigilando los segundos para activarse con precisión estratégica, algo que sería imposible si se usa un delay () tradicional, ya que si se utiliza el delay, se puede detener todos los procesos hasta que se cumplan los 15 minutos, de forma que si en ese tiempo se tenía un riego no se podrá activar la bomba, debido a que el sistema se queda congelado por el tiempo mencionado.

### Figura 26

*Tiempo de toma de datos (15 minutos)*

```
// =====
// INTERVALOS
// =====
const unsigned long SENSOR_INTERVAL = 900000UL;

// --- TOMA DE DATOS SENSORES (Cada 15 minutos) ---
unsigned long ahora = millis();
if (ahora - lastSensorMillis >= SENSOR_INTERVAL) {
  lastSensorMillis = ahora;
  leerSensores();
  publicarSensores(diaCiclo);
}
```

*Fuente: Autoría*

### 3.7.2 Lectura de datos del sensor BH1750

La adquisición de datos de iluminación se realiza mediante el sensor BH1750, el cual utiliza el protocolo de comunicación serial I2C para interactuar con el microcontrolador. El

proceso de lectura se basa en la conversión de la intensidad de luz ambiental en una señal digital de 16 bits, procesada internamente por un convertidor analógico-digital (ADC). Para obtener mediciones precisas expresadas en lux (lx), el firmware activa el modo de alta resolución del dispositivo, permitiendo una detección de amplio rango que varía desde 1 hasta 65,535 lx. Esta lectura es fundamental para el sistema, ya que proporciona la retroalimentación necesaria para ajustar los parámetros de control lumínico de manera dinámica y eficiente.

En la Figura 27, se muestra la línea de código `#include <BH1750.h>` es una instrucción esencial de preprocesamiento que incorpora la librería específica para el sensor de luminosidad BH1750. Esta librería proporciona al microcontrolador ESP32 un conjunto de funciones predefinidas y optimizadas que simplifican el proceso de comunicación con el sensor, el cual utiliza el complejo protocolo I<sup>2</sup>C.

### Figura 27

*Librerías del sensor BH1750*

```
#include <WiFi.h>
#include <time.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <BH1750.h>
```

*Fuente: Autoría*

En la Figura 28 se muestra la línea de código `float lux = lightMeter.readLightLevel();` es la instrucción fundamental que, gracias a la librería BH1750.h, permite al microcontrolador ESP32 obtener la lectura de luminosidad en unidades Lux mediante el sensor BH1750. Esta función simplifica la comunicación compleja I<sup>2</sup>C, siendo esencial para cumplir con la fase de Lectura de sensores dentro del flujo del nodo secundario. Su importancia radica en que garantiza la adquisición de datos válidos y precisos de la luz ambiental, lo cual es indispensable

para que el sistema de procesamiento pueda aplicar los algoritmos de control que gestionan la activación de la iluminación artificial y mantener el fotoperiodo óptimo del cultivo.

Complementariamente, la instrucción `Serial.print("Luz: "); Serial.print(lux); Serial.println(" lx");` cumple una finalidad crucial de verificación y depuración durante la fase de desarrollo. Aunque no forma parte del proceso de envío de datos vía MQTT, estas líneas de código permiten confirmar en tiempo real que la comunicación con el sensor BH1750 es estable, que los valores leídos son consistentes y que la conversión a Lux se realiza correctamente, asegurando la calidad del dato antes de que este se integre al flujo de envío al Gateway (Bloque 2) para su monitoreo y control.

### Figura 28

*Lectura e impresión de datos del sensor BH1750*

```
void leerSensores() {
  float t = dht.readTemperature(); // Lectura de temperatura en °C
  float h = dht.readHumidity(); // Lectura de Humedad ambiental en %
  float lux = lightMeter.readLightLevel(); // Lectura de luminosidad en %
  Serial.print("Temp: "); Serial.print(t); Serial.print(" \u00b0C | ");
  Serial.print("Humedad: "); Serial.print(h); Serial.print(" % | ");
  Serial.print("Luz: "); Serial.print(lux); Serial.println(" lx");
}
```

*Fuente: Autoría*

En la Figura 29 en la primera línea define la constante de tiempo establecida en **900,000 milisegundos**, lo que equivale exactamente a 15 minutos. Es la pieza clave que determina la frecuencia de muestreo del entorno. Se programó con el sufijo UL (Unsigned Long) para asegurar que el procesador gestione correctamente un número tan grande sin errores de desbordamiento, garantizando que el sistema sea estable a largo plazo.

El siguiente bloque es el encargado de ejecutar la toma de datos de forma no bloqueante. En lugar de detener el procesador, compara el tiempo actual con el de la última lectura; si han pasado 15 minutos, actualiza la marca de tiempo y dispara las funciones `leerSensores ()` y `publicarSensores ()`.

**Figura 29***Tiempo de toma de datos (15 min)*

```

// =====
// INTERVALOS
// =====
const unsigned long SENSOR_INTERVAL = 900000UL;

// --- TOMA DE DATOS SENSORES (Cada 15 minutos) ---
unsigned long ahora = millis();
if (ahora - lastSensorMillis >= SENSOR_INTERVAL) {
    lastSensorMillis = ahora;
    leerSensores();
    publicarSensores(diaCiclo);
}

```

*Fuente: Autoría***3.7.3 Programación de horarios de activación del riego**

Para la gestión del riego, se implementó una arquitectura basada en estructuras de datos dinámicas. Se definió una estructura denominada Riego que encapsula los parámetros de activación. El sistema utiliza punteros (`const Riego* &prog`) para seleccionar eficientemente en memoria la tabla de riego correspondiente al día actual del ciclo, permitiendo una transición suave entre las fases de germinación y crecimiento del forraje sin necesidad de reprogramar el hardware.

La gestión del riego se fundamenta en una arquitectura de programación orientada a objetos mediante el uso de la estructura de datos “`struct Riego`” como se muestra en la Figura 30, la cual encapsula de manera eficiente la hora, el minuto y la duración en segundos de cada evento de hidratación. Esta aproximación permite una organización modular del código, facilitando la creación de arreglos dinámicos que representan los cronogramas específicos para cada etapa de crecimiento del FVH. Al utilizar esta estructura, el sistema adquiere la capacidad de escalar y adaptarse, permitiendo que el desarrollador modifique los parámetros de tiempo y volumen sin alterar la lógica central del programa, garantizando así un manejo ordenado de la memoria del microcontrolador.

**Figura 30***Estructura de datos para riego*

```
// =====
// PROGRAMACIÓN DE RIEGO
// =====
struct Riego {
    int hora;
    int minuto;
    int duracionSeg;
};
```

Fuente: Autoría

En la Figura 31 se muestra la parte de los datos maestros o el calendario de ejecución del sistema. Se crean arreglos constantes de tipo "Riego" usando el molde definido en la Figura 30 que almacenan las horas exactas y duraciones para diferentes bloques de días. La importancia de esta sección es vital porque constituye la base de datos del riego; es aquí donde se define el comportamiento real del sistema (por ejemplo, que el día 1 se riega a las 6:30 por 25 segundos). Al ser "const", se garantiza que estos valores permanezcan protegidos en la memoria del microcontrolador, evitando cambios accidentales durante la ejecución y asegurando que la planta reciba exactamente el agua programada.

**Figura 31***Calendario de horarios para el riego*

```
const Riego riegosDia1_2[] = { {6,30,25},{10,30,25},{14,30,25},{18,30,25} };
const Riego riegosDia3_4[] = { {7,0,25},{12,30,25},{18,30,20} };
const Riego riegosDia5_7[] = { {6,30,30},{10,30,35},{14,30,30},{19,0,35} };
const Riego riegosDia8_10[] = { {6,0,40},{9,30,40},{13,30,45},{17,30,45},{20,30,40} };
const Riego riegosDia11_12[] = { {7,0,35},{12,0,40},{18,30,35} };
```

Fuente: Autoría

La importancia de esta implementación radica en la segmentación cronológica del riego, la cual responde a las necesidades biológicas cambiantes del cultivo durante su ciclo de 12 días. Mediante la función de selección "obtenerProgramacionRiego", el sistema actúa como un selector inteligente que vincula el día actual del ciclo con tablas de datos diferenciadas (por

ejemplo, incrementando la frecuencia de riego de 4 a 5 veces diarias a medida que el forraje transpirar más agua en sus etapas finales). Esta lógica de control no solo optimiza el uso del recurso hídrico, sino que también previene enfermedades fúngicas por exceso de humedad en la germinación y el estrés hídrico en el desarrollo foliar, asegurando una producción automatizada, precisa y eficiente bajo el paradigma de Internet de las Cosas (IoT).

En la Figura 32 se evidencia el fragmento de código que funciona como un selector lógico y dinámico diseñado para gestionar un calendario de irrigación automatizado. Su finalidad principal es recibir un número de día y determinar qué conjunto de instrucciones de riego le corresponden, automatizando el cálculo del volumen de datos mediante el operador sizeof para evitar errores manuales.

**Figura 32**  
*Selección de Programación de Riego*

```
// =====
// SELECCIÓN DE PROGRAMACIÓN
// =====
bool obtenerProgramacionRiego(int dia, const Riego* &prog, int &cantidad) {
    if (dia >= 1 && dia <= 2) { prog = riegosDia1_2; cantidad = sizeof(riegosDia1_2)/sizeof(Riego); return true; }
    if (dia >= 3 && dia <= 4) { prog = riegosDia3_4; cantidad = sizeof(riegosDia3_4)/sizeof(Riego); return true; }
    if (dia >= 5 && dia <= 7) { prog = riegosDia5_7; cantidad = sizeof(riegosDia5_7)/sizeof(Riego); return true; }
    if (dia >= 8 && dia <= 10) { prog = riegosDia8_10; cantidad = sizeof(riegosDia8_10)/sizeof(Riego); return true; }
    if (dia >= 11 && dia <= 12) { prog = riegosDia11_12; cantidad = sizeof(riegosDia11_12)/sizeof(Riego); return true; }
    return false;
}
```

Fuente: Autoría

Los puntos más importantes son su capacidad de segmentación, que divide un periodo de 12 días en rangos específicos, y su mecanismo de validación, que devuelve un valor booleano (true/false) para confirmar si existe una programación válida. En esencia, sirve para que el sistema sepa exactamente qué configuración cargar y cuántos ciclos ejecutar en cada etapa del crecimiento del cultivo, garantizando que el hardware reciba la información correcta según el cronograma establecido.

### ***3.7.4 Programación de lógica para horarios de activación de luminosidad***

La programación de la lógica de iluminación se fundamenta en el establecimiento de un fotoperiodo dinámico que se adapta a las distintas etapas fenológicas del Forraje Verde Hidropónico (FVH). El algoritmo implementado no solo actúa como un temporizador convencional, sino como un sistema de control inteligente que integra variables de tiempo real obtenidas mediante el protocolo NTP (*Network Time Protocol*) y niveles de radiancia medidos por el sensor BH1750.

Esta lógica permite establecer ventanas de activación específicas para cada fase del cultivo: desde la oscuridad total requerida en la etapa de germinación, hasta periodos de iluminación intensiva para maximizar la actividad fotosintética en la fase de crecimiento final. Mediante el uso de estructuras condicionales y el cálculo de días absolutos de ciclo, el sistema garantiza que la luz artificial actúe únicamente como un refuerzo cuando la luz natural es insuficiente para alcanzar los umbrales de lux definidos, optimizando así el consumo energético del nodo sensor.

En la Figura 33 se presenta la función `obtenerDiaCiclo()` que es un algoritmo de cálculo temporal encargado de determinar la etapa de maduración actual del cultivo de Forraje Verde Hidropónico (FVH). Utiliza la librería `NTPClient` para obtener la estampa de tiempo (*timestamp*) actual desde servidores de internet y la estructura `tm` de la librería estándar de C++ para desglosar dicha información en variables manejables de año, mes y día. Posteriormente, transforma estas fechas en valores escalares (días absolutos) para realizar una resta aritmética simple que entrega el día exacto del ciclo de producción.

**Figura 33***Sincronización del día de ciclo*

```

int obtenerDiaCiclo() {
    time_t raw = timeClient.getEpochTime();
    struct tm *ti = localtime(&raw);

    int y = ti->tm_year + 1900;
    int m = ti->tm_mon + 1;
    int d = ti->tm_mday;

    long actual = diasAbsolutos(y, m, d);
    long inicio = diasAbsolutos(inicio_y, inicio_m, inicio_d);

    int dia = (actual - inicio) + 1;
    if (dia < 1) dia = 1;
    if (dia > 12) dia = 12;

    return dia;
}

```

*Fuente: Autoría*

La función `obtenerDiaCiclo()` constituye el núcleo de la inteligencia temporal del sistema, actuando como la variable de control de entrada que define el perfil de iluminación al determinar con precisión la etapa fenológica del cultivo. Su importancia radica en la capacidad de gestionar un crecimiento adaptativo, permitiendo que el nodo diferencie automáticamente entre fases críticas como la germinación y el desarrollo acelerado, donde las necesidades lumínicas varían drásticamente. Al emplear un algoritmo basado en fechas absolutas sincronizadas mediante el protocolo NTP y contrastadas con la fecha de inicio almacenada en la memoria no volátil (*Preferences*), el sistema garantiza una alta resiliencia frente a posibles cortes de energía o reinicios del microcontrolador. Esta lógica de normalización, que asegura un rango operativo estricto de 1 a 12 días, elimina la dependencia de contadores de tiempo manuales y otorga al nodo sensor una autonomía total, gestionando la evolución del fotoperiodo de manera desatendida tras el registro inicial del ciclo.

En la Figura 34 se muestra la función `obtenerVentanaLuz` actúa como un programador de fotoperiodo dinámico que parametriza los intervalos de tiempo permitidos para la

iluminación artificial en función del desarrollo del cultivo. Su función técnica es asignar valores a las variables de hora y minuto de inicio (hIni, mIni) y fin (hFin, mFin) mediante una estructura de control condicional que segmenta el ciclo de 12 días en cinco etapas diferenciadas. La importancia de este algoritmo reside en la optimización del crecimiento biológico y el uso eficiente de la energía, ya que asegura que el sistema respete estrictamente los periodos de oscuridad necesarios durante la germinación (días 1 y 2) y extienda gradualmente las horas de luz conforme la biomasa aumenta su capacidad fotosintética. De esta manera, el nodo sensor no opera bajo un horario estático, sino que se adapta a las necesidades específicas de cada fase, garantizando que la luz artificial solo esté disponible en las ventanas horarias donde el cultivo puede aprovecharla para su metabolismo.

#### Figura 34

*Cronograma de activación de Luz artificial*

```
// =====
// PERFIL DE ILUMINACIÓN POR CICLO
// =====
// Ventana diaria de iluminación en modo AUTO
// Días 1-2 sin luz
// Días 3-4 ventana corta
// Días 5-7 ventana media
// Días 8-10 ventana larga
// Días 11-12 ventana media
void obtenerVentanaLuz(int diaCiclo, int &hIni, int &mIni, int &hFin, int &mFin) {
    if (diaCiclo == 1 || diaCiclo == 2) { hIni = 0; mIni = 0; hFin = 0; mFin = 0; return; }
    if (diaCiclo == 3 || diaCiclo == 4) { hIni = 8; mIni = 0; hFin = 12; mFin = 0; return; }
    if (diaCiclo >= 5 && diaCiclo <= 7) { hIni = 7; mIni = 0; hFin = 17; mFin = 0; return; }
    if (diaCiclo >= 8 && diaCiclo <= 10) { hIni = 6; mIni = 30; hFin = 19; mFin = 30; return; }
    hIni = 7; mIni = 0; hFin = 18; mFin = 0;
}
```

*Fuente: Autoría*

En la Figura 35 se observa el bloque de código que implementa la persistencia de datos del sistema mediante el uso de la librería Preferences.h, permitiendo al microcontrolador ESP32 acceder a su memoria no volátil (NVS). Su función técnica consiste en abrir un espacio de almacenamiento denominado "ciclo" y recuperar los valores de año, mes y día de inicio previamente guardados a través de las llaves ini\_y, ini\_m y ini\_d. La importancia crítica de

esta sección reside en la resiliencia del sistema ante fallos de energía; sin este mecanismo, cada vez que el nodo sensor sufriera un reinicio o un corte eléctrico, el contador del cultivo se perdería y el ciclo de 12 días regresaría a cero. Gracias a esta implementación, el dispositivo puede retomar el control biológico exactamente en el día que le corresponde, garantizando la continuidad del proceso de iluminación sin intervención manual y protegiendo la integridad del crecimiento del forraje frente a imprevistos técnicos.

### Figura 35

*Persistencia de datos del sistema*

```

prefs.begin("ciclo", false);
inicio_y = prefs.getUInt("ini_y", 0);
inicio_m = prefs.getUInt("ini_m", 0);
inicio_d = prefs.getUInt("ini_d", 0);

if (inicio_y == 0) {
    time_t raw = timeClient.getEpochTime();
    struct tm *ti = localtime(&raw);
    inicio_y = ti->tm_year + 1900;
    inicio_m = ti->tm_mon + 1;
    inicio_d = ti->tm_mday;

    prefs.putUInt("ini_y", inicio_y);
    prefs.putUInt("ini_m", inicio_m);
    prefs.putUInt("ini_d", inicio_d);
    enviar("🌱 Primer inicio del ciclo FVH registrado");
}

```

*Fuente: Autoría*

#### 3.7.5 Programación de Sincronización con el tiempo de ciclo

La precisión cronológica es un factor determinante en la automatización del cultivo de FVH, ya que el comportamiento de las variables de control depende directamente de la edad biológica de la planta. Para garantizar esta exactitud, se implementó una arquitectura de sincronización basada en el protocolo NTP (Network Time Protocol), la cual permite a los nodos sensores obtener la fecha y hora oficial con una precisión de milisegundos a través de servidores globales como pool.ntp.org. Esta referencia temporal externa es contrastada con la

fecha de inicio del ciclo almacenada en la memoria no volátil del microcontrolador, permitiendo que el sistema calcule de forma autónoma el "día de vida" del cultivo. Mediante esta programación, se asegura que tanto el Nodo 1 como el Nodo 2 operen bajo un mismo eje temporal, eliminando desfases causados por el reloj interno del hardware y permitiendo que la transición entre las etapas de germinación y crecimiento ocurra de manera coordinada y resiliente ante posibles interrupciones en el suministro eléctrico.

En la Figura 36 se observa la librería `#include <Preferences.h>` es una solución de almacenamiento persistente diseñada para el microcontrolador ESP32, la cual permite guardar y recuperar datos en la memoria no volátil (NVS) de forma estructurada mediante parejas de llave-valor. Su implementación es vital para mantener la continuidad del proceso biológico, permitiendo que el nodo sensor retome el conteo de los días de crecimiento exactamente en el punto donde se encontraba antes de la interrupción.

### Figura 36

*Protocolo NTP y registro*

```
#include <WiFi.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include <NTPClient.h>
#include <Preferences.h>
#include <Wire.h>
#include <DHT.h>
#include <BH1750.h>
#include <PubSubClient.h>
```

*Fuente: Autoría*

En la Figura 37 se muestra el bloque de código que representa la fase crítica de inicialización de la referencia temporal del sistema, asegurando que el microcontrolador no proceda con las tareas de control hasta estar debidamente sincronizado. Técnicamente, la instrucción `timeClient.begin()` inicializa la comunicación UDP con el servidor de tiempo, mientras que el bucle `while` actúa como una barrera de seguridad que utiliza el método `forceUpdate()` para solicitar repetidamente la estampa de tiempo oficial. La importancia de esta

estructura radica en que garantiza la integridad de los datos de control desde el primer segundo de ejecución; al forzar la sincronización en el `setup()`, se previene que el nodo inicie con una fecha por defecto, lo cual provocaría activaciones erróneas de los sistemas de riego e iluminación. Los retardos implementados (`delay`) permiten una espera controlada que evita la saturación de las peticiones de red, estableciendo una base temporal sólida sobre la cual se calculan todas las decisiones biológicas del ciclo FVH.

### **Figura 37**

*Referencia temporal del sistema*

```
timeClient.begin();
while (!timeClient.update()) {
  timeClient.forceUpdate();
  delay(500); }
```

*Fuente: Autoría*

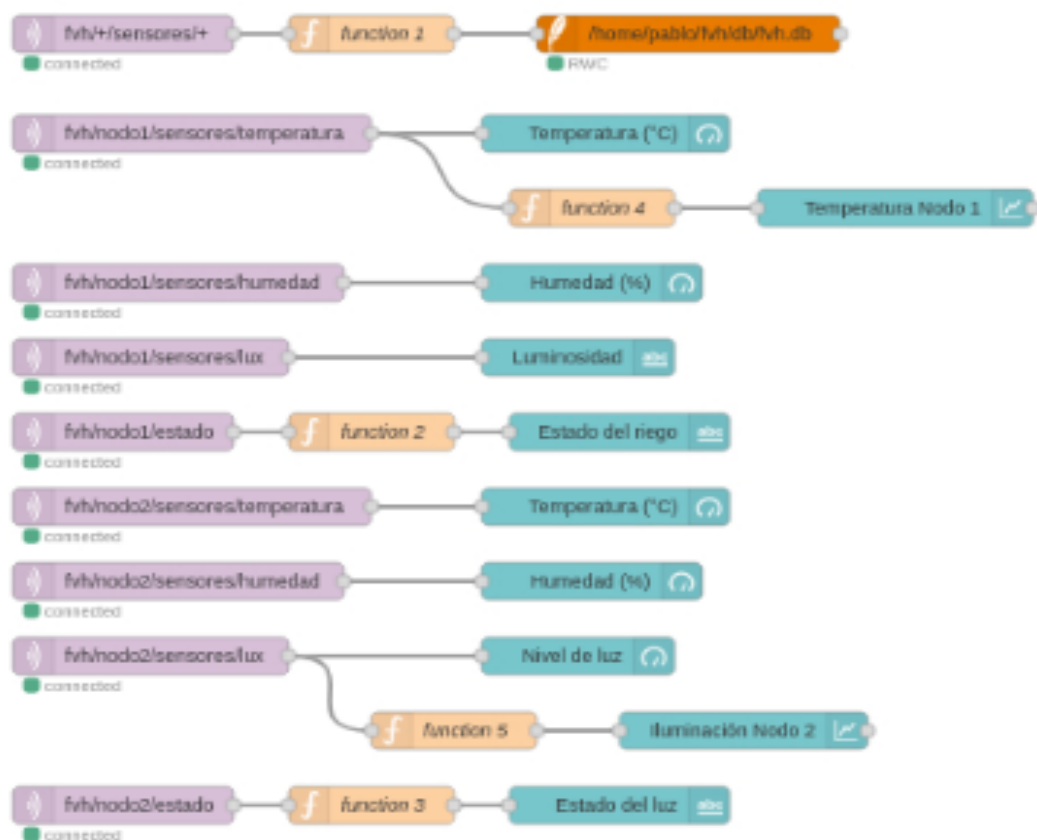
### **3.7.6 Plataforma de Gestión de Node-RED**

Este sistema opera bajo una arquitectura MQTT, capturando datos en tiempo real de los nodos sensores (temperatura, humedad y luz) mediante una estructura jerárquica de tópicos. La robustez del flujo reside en su capacidad de persistencia centralizada, donde un nodo comodín intercepta todas las métricas de la red y, tras procesarlas mediante funciones lógicas, las almacena automáticamente en una base de datos local SQLite (`fvh.db`) para garantizar un registro histórico íntegro y auditable.

En la capa de visualización, el flujo emplea un Dashboard interactivo segmentado para supervisar específicamente dos estaciones de trabajo (Nodo 1 y Nodo 2). A través de indicadores tipo Gauge, gráficas de tendencia y etiquetas de estado, el sistema permite monitorear variables ambientales y el funcionamiento de actuadores críticos como el riego y la iluminación. Esta interfaz se apoya en nodos de función personalizados que normalizan los datos crudos, transformándolos en información visual intuitiva para la toma de decisiones inmediata.

El flujo de Node-RED que se muestra en la Figura 38 funciona como el núcleo de integración y procesamiento del proyecto, gestionando de forma automatizada el ciclo de vida de los datos: desde su recepción mediante el protocolo MQTT hasta su almacenamiento estructurado y representación visual. Su importancia es fundamental porque centraliza la lógica del sistema en una sola interfaz, permitiendo que variables críticas como el riego y la iluminación sean supervisadas en tiempo real para una toma de decisiones inmediata, garantizando al mismo tiempo la trazabilidad histórica necesaria para optimizar el rendimiento y la eficiencia de los nodos de sensores desplegados.

**Figura 38**  
*Flujo de Node-RED*



*Fuente: Autoría*

### 3.7.4 Almacenamiento de datos mediante Node-RED

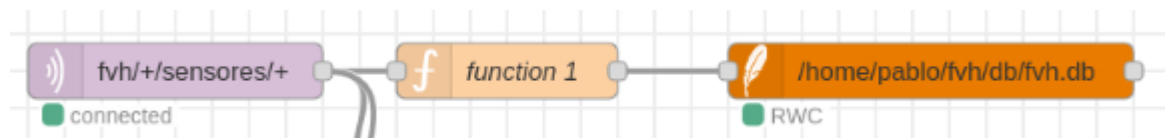
En la Figura 39 se detalla el segmento del flujo que constituye la capa de ingesta y procesamiento lógico, diseñada para capturar información de múltiples dispositivos de forma

escalable y eficiente. Utiliza un nodo de entrada MQTT configurado con niveles de comodín (+), lo que le permite escuchar y recibir simultáneamente las lecturas de diversos sensores provenientes de distintos nodos bajo la jerarquía de tópicos fvh/. Los datos capturados pasan inmediatamente por el nodo function 1, el cual actúa como el motor de transformación donde se normalizan los mensajes o se preparan las sentencias lógicas necesarias antes de ser transferidos al siguiente nivel.

La fase final del flujo se centra en la persistencia de datos y el registro histórico, garantizando la trazabilidad de toda la red de sensores. La información procesada se dirige a un nodo de almacenamiento que apunta a una base de datos local en la ruta /home/pablo/fvh/db/fvh.db (probablemente de tipo SQLite), lo que asegura que cada lectura quede grabada de forma permanente y estructurada. Esta configuración es fundamental para el proyecto, ya que transforma el flujo de datos en tiempo real en un repositorio histórico robusto que permite realizar auditorías, análisis de tendencias y consultas posteriores.

**Figura 39**

*Flujo para el almacenamiento de datos*



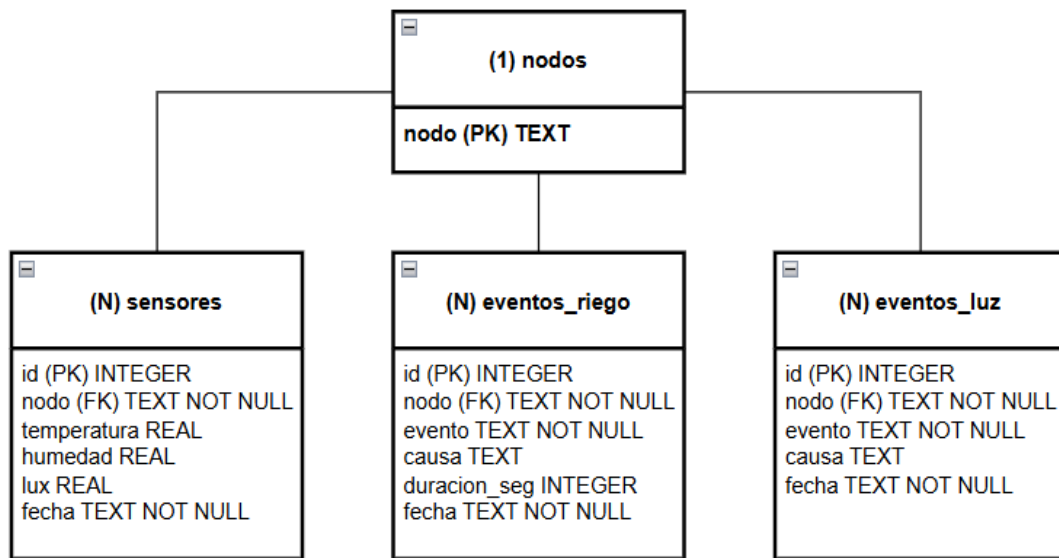
*Fuente: Autoría*

### 3.7.4.1 Modelo de Base de Datos Local SQLite

Con el propósito de asegurar la persistencia estructurada de la información generada por los nodos sensores y los actuadores del sistema, se diseñó un modelo relacional implementado en el motor SQLite dentro del Gateway basado en Raspberry Pi, como se muestra en la Figura 40. Esta base de datos local cumple la función de consolidar las lecturas ambientales y los eventos operativos en un repositorio histórico organizado, permitiendo garantizar integridad, trazabilidad y disponibilidad de los datos para análisis posteriores. El diseño del modelo responde a criterios de simplicidad, eficiencia y coherencia con la

arquitectura IoT propuesta, estableciendo una estructura de tablas que refleja la relación lógica entre los nodos del sistema y las variables monitoreadas. A continuación, en la Figura 40 se presenta el modelo de base de datos local desarrollado para el proyecto.

**Figura 40**  
*Modelo relacional*



*Fuente: Autoría*

El modelo presentado organiza la información en una entidad principal denominada *nodos*, la cual representa conceptualmente cada dispositivo desplegado en el entorno de producción, y tres entidades dependientes encargadas de almacenar las mediciones ambientales y los eventos de actuación. La tabla *sensores* registra las variables de temperatura, humedad y luminosidad asociadas a un nodo específico junto con su respectiva marca temporal, permitiendo construir series históricas para análisis de comportamiento del cultivo. Por su parte, las tablas *eventos\_riego* y *eventos\_luz* almacenan los registros relacionados con la activación y desactivación de los actuadores, incorporando información adicional como la causa del evento y la duración cuando corresponde.

La relación uno a muchos establecida entre *nodos* y las demás entidades garantiza coherencia estructural en el almacenamiento, mientras que la integridad lógica se mantiene a nivel de aplicación mediante el flujo desarrollado en Node-RED. Esta organización facilita

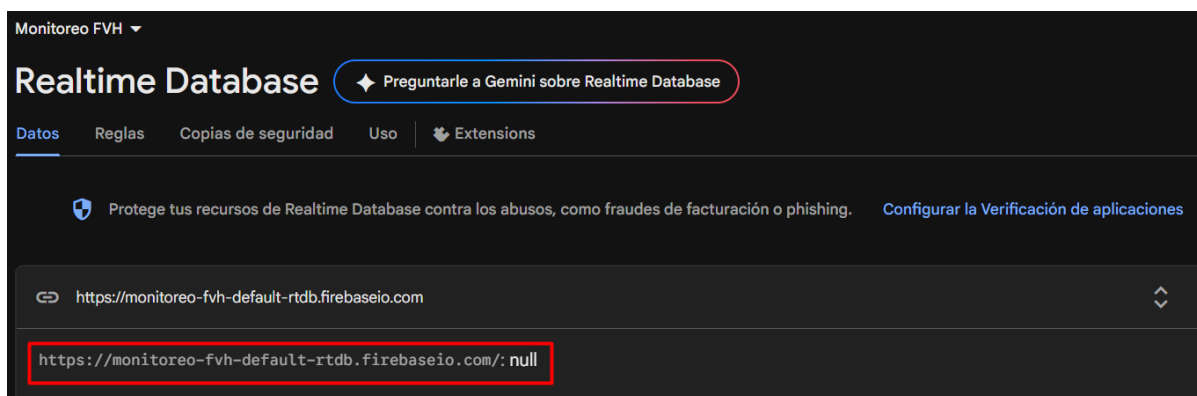
consultas eficientes, análisis comparativos entre estaciones de monitoreo y auditorías del funcionamiento automatizado del sistema.

### 3.7.5 Recepción de datos mediante FIREBASE

Para la gestión de datos en la nube y el monitoreo remoto, se implementó una base de datos utilizando Firebase Realtime Database, una solución de Google orientada a aplicaciones de IoT que requieren sincronización en tiempo real. La base de datos se configuró bajo la instancia personalizada denominada `monitoreo-fvh-default-rtdb`, estableciendo una arquitectura NoSQL basada en una estructura jerárquica de objetos JSON. Como se observa en la consola de administración de la Figura 41, la base de datos utiliza un protocolo de comunicación seguro mediante HTTPS, proporcionando un punto de enlace único (URL) para que los nodos sensores o el servidor intermedio puedan publicar las variables de temperatura, humedad y luz de forma persistente y escalable.

#### Figura 41

*Base de datos en la nube Firebase*



*Fuente: Autoría*

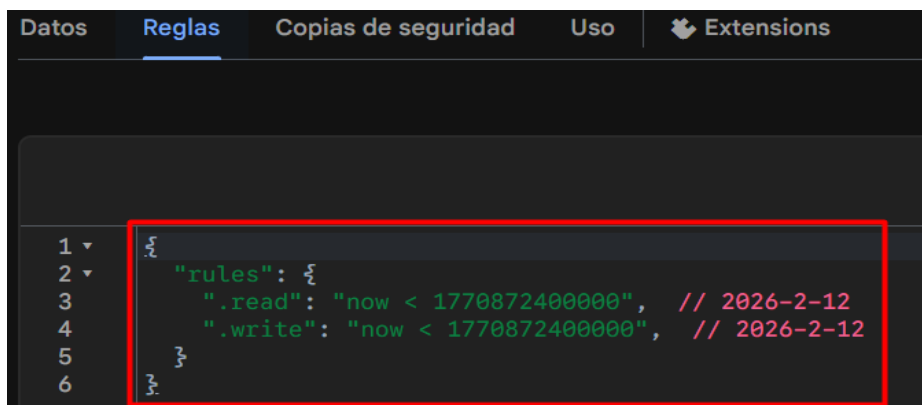
Es fundamental el uso de Firebase en este proyecto, debido que, actúa como el repositorio centralizado de información histórica y de estado actual del sistema de Forraje Verde Hidropónico. Su finalidad técnica es permitir que los datos recolectados por los nodos sensores trasciendan la red local, facilitando la visualización remota de las variables críticas desde cualquier dispositivo con acceso a internet. Al integrar esta base de datos, el sistema

adquiere la capacidad de almacenar registros continuos de la telemetría, lo que resulta indispensable para realizar el análisis estadístico del crecimiento del cultivo y asegurar que los parámetros ambientales se mantengan dentro de los umbrales óptimos de producción de biomasa, incluso cuando el operador no se encuentra físicamente en el sitio de instalación.

La configuración de seguridad de la base de datos se define mediante un script en formato JSON dentro de la pestaña "Reglas" de la consola de Firebase. Estas reglas establecen permisos de lectura (.read) y escritura (.write) condicionados por parámetros temporales. Como se observa en el recuadro rojo de la Figura 42, se ha implementado una configuración de acceso abierto de forma temporal, utilizando una validación de tiempo Unix (`now < 1770872400000`) que permite la interacción con los datos. Esta sintaxis asegura que los nodos sensores y la aplicación de monitoreo puedan intercambiar información sin restricciones de autenticación durante la fase de pruebas y validación del proyecto.

#### **Figura 42**

##### *Establecimiento de reglas de permisos*



```
1 ~
2 "rules": {
3   ".read": "now < 1770872400000", // 2026-2-12
4   ".write": "now < 1770872400000", // 2026-2-12
5 }
6 ~
```

*Fuente: Autoría*

La función de este bloque de código es gestionar el control de acceso a los recursos almacenados en la Realtime Database, actuando como un filtro de seguridad para las peticiones entrantes. Su finalidad técnica es garantizar que el flujo de datos entre los nodos ESP32 y la nube sea ininterrumpido durante el periodo de experimentación del cultivo de FVH, evitando bloqueos por falta de permisos que podrían comprometer el registro histórico de las variables

ambientales. Al establecer una fecha de caducidad específica, se asegura que el sistema mantenga una ventana operativa definida, facilitando la depuración del software y la verificación de la conectividad antes de pasar a una fase de producción con reglas de seguridad más restrictivas y autenticación de usuarios.

### 3.7.5.1 Estructura de Datos en Firebase Realtime Database

Tal como se aprecia en la Figura 43, la base de datos en la nube fue implementada mediante Firebase Realtime Database bajo una arquitectura NoSQL orientada a objetos JSON organizados jerárquicamente. A diferencia del modelo relacional utilizado en la base de datos local SQLite, el almacenamiento en Firebase adopta una estructura basada en nodos dinámicos que permite sincronización bidireccional en tiempo real entre el Gateway y los dispositivos cliente.

**Figura 43**

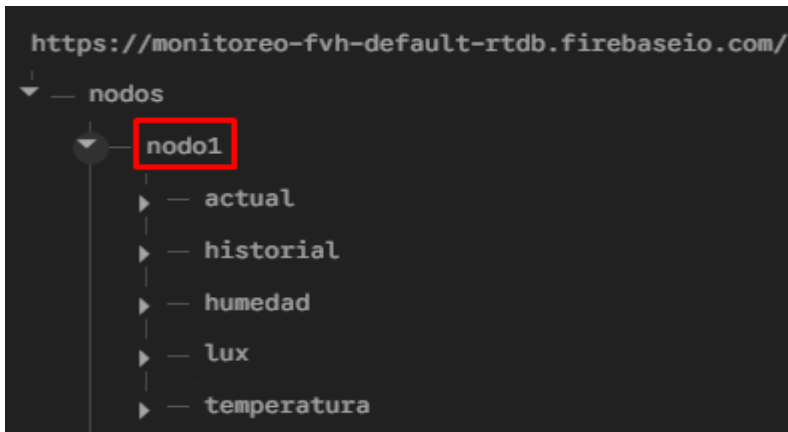
*Estructura de Datos*



*Fuente: Autoría*

La organización del árbol de datos parte del nodo raíz correspondiente a la instancia monitoreo-fvh-default-rtdb, dentro del cual se define una rama principal denominada nodos, como se muestra en la Figura 44. Esta estructura agrupa la información según el identificador de cada estación de monitoreo desplegada en el sistema, permitiendo segmentar de forma independiente las variables asociadas a cada dispositivo.

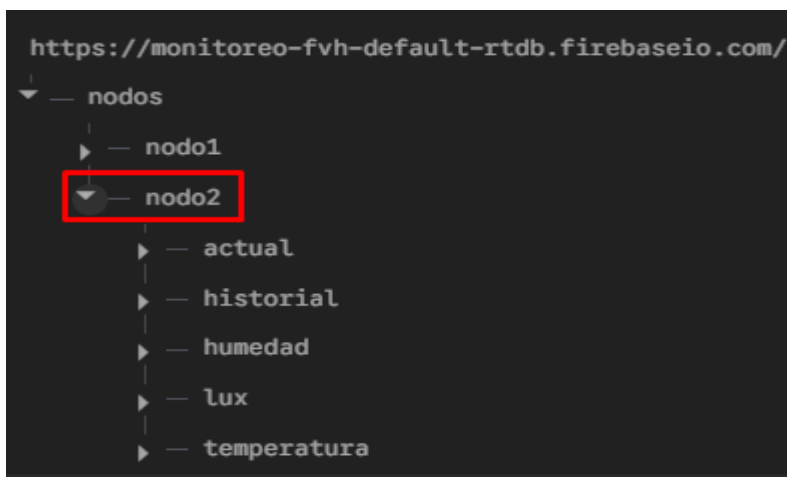
**Figura 44**  
*Árbol de Datos Nodo Sensor 1*



*Fuente: Autoría*

Como se puede observar en la Figura 45, cada nodo sensor contiene dos subdivisiones principales: actual e historial. La rama actual almacena el estado más reciente de las variables ambientales, facilitando la consulta inmediata para visualización en tiempo real, mientras que la rama historial conserva registros acumulativos de las mediciones, permitiendo análisis retrospectivos y evaluación del comportamiento del cultivo a lo largo del tiempo.

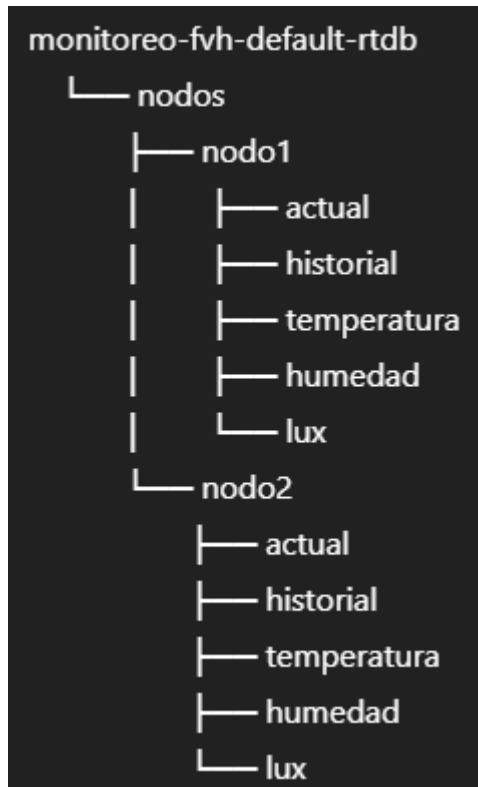
**Figura 45**  
*Árbol de Datos Nodo Sensor 2*



*Fuente: Autoría*

Adicionalmente, en la Figura 46 se observa cómo se almacenan de forma estructurada las variables temperatura, humedad y lux, organizadas bajo cada nodo específico. Esta arquitectura jerárquica puede representarse conceptualmente de la siguiente forma:

**Figura 46**  
*Estructurada de las variables*



*Fuente: Autoría*

Este modelo permite que cada actualización enviada desde Node-RED sea reflejada instantáneamente en la nube, asegurando disponibilidad permanente de la información para aplicaciones móviles y sistemas de monitoreo remoto. La separación entre datos actuales e históricos optimiza el acceso a información en tiempo real sin comprometer la capacidad de análisis estadístico longitudinal.

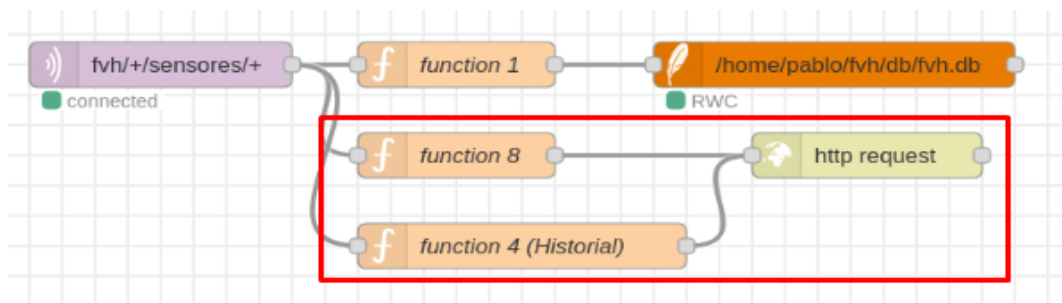
### **3.7.6 Conexión de Node-RED con FIREBASE**

La interconexión entre el Gateway local y la plataforma Firebase Realtime Database se implementó mediante un flujo lógico desarrollado en Node-RED, el cual actúa como intermediario entre la red MQTT interna y la infraestructura de almacenamiento en la nube.

Este mecanismo permite sincronizar en tiempo real las variables ambientales capturadas por los nodos sensores hacia la base de datos remota.

Como se muestra en la Figura 47, el proceso inicia con un nodo de suscripción MQTT configurado bajo el tópicó comodín `fvh/+sensores/+`, lo que posibilita la recepción simultánea de datos provenientes de los nodos sensores dentro del entorno IoT. Una vez recibido el mensaje, el flujo se bifurca en dos ramas: la primera orientada al almacenamiento local en SQLite y la segunda destinada a la transmisión hacia Firebase.

**Figura 47**  
*Flujo para conexión con Firebase*



*Fuente: Autoría*

Tal como se aprecia en la Figura 48, para la actualización del estado más reciente se utiliza el método HTTP PATCH dirigido al endpoint, el uso del mismo permite modificar únicamente el campo correspondiente a la variable recibida sin sobrescribir el objeto completo, optimizando la integridad estructural del nodo.

**Figura 48**  
*Método "PATCH"*

```
msg.method = "PATCH";
msg.url = "https://monitoreo-fvh-default-rtdb.firebaseio.com/nodos/"
+ encodeURIComponent(nodo)
+ "/actual.json";
```

*Fuente: Autoría*

En paralelo, el almacenamiento histórico emplea el método HTTP POST hacia el endpoint, como se aprecia en la Figura 49. El método en cuestión genera automáticamente claves únicas en Firebase, permitiendo conservar registros acumulativos sin sobrescritura.

### **Figura 49**

#### *Método "POST"*

```

// Registrar cada evento crea un registro histórico
msg.method = "POST";
msg.url = "https://monitoreo-fvh-default-rtdb.firebaseio.com/nodos/"
+ encodeURIComponent(nodo)
+ "/historial.json";

```

Esta estrategia dual garantiza que el sistema disponga simultáneamente de datos en tiempo real y de un repositorio histórico orientado a eventos, facilitando tanto la visualización instantánea como el análisis temporal del comportamiento del cultivo.

El uso de HTTPS asegura confidencialidad, integridad y autenticidad en la transmisión de datos, alineándose con las políticas de seguridad de Firebase y con las buenas prácticas de diseño en sistemas IoT distribuidos.

### **3.7.7 Diseño de App Móvil mediante Firebase y Flutter**

La etapa final de la arquitectura del sistema IoT desarrollado corresponde a la capa de aplicación, la cual permite visualizar de manera remota las variables ambientales capturadas por los nodos sensores y sincronizadas previamente en la nube. Esta aplicación móvil fue desarrollada utilizando el framework Flutter, seleccionado por su capacidad de construcción multiplataforma y su integración nativa con los servicios de Firebase. La implementación de esta capa completa el flujo integral del sistema, estableciendo un entorno donde la información generada en el entorno IoT puede ser consultada en tiempo real desde dispositivos móviles, garantizando disponibilidad, accesibilidad y continuidad operativa del monitoreo.

#### **3.7.7.1 Arquitectura de Integración con Firebase**

La integración de la aplicación móvil con la infraestructura en la nube se realizó mediante el uso del SDK oficial de Firebase para Flutter, lo que garantiza compatibilidad

nativa, estabilidad en la comunicación y soporte multiplataforma. La Figura 50, muestra la inicialización del servicio constituye el primer paso crítico dentro de la arquitectura de la aplicación, ya que permite establecer la conexión segura con la instancia de Firebase Realtime Database antes de ejecutar cualquier componente de interfaz.

### Figura 50

*Paquetes para main.dart*

```
main.dart > ...
import 'package:flutter/material.dart';
import 'package:firebase_core/firebase_core.dart';
import 'package:firebase_database/firebase_database.dart';
import 'firebase_options.dart';
```

*Fuente: Autoría*

En el proyecto desarrollado, la configuración se efectuó utilizando FlutterFire CLI, herramienta que genera automáticamente el archivo de parámetros `firebase_options.dart`, el cual contiene las credenciales y configuraciones específicas del proyecto asociado a la instancia monitoreo-fvh-default-rtdb. Este enfoque permite adaptar dinámicamente la configuración según la plataforma de despliegue, ya sea Android o iOS, manteniendo coherencia estructural y seguridad en la conexión.

Como se muestra en la Figura 51 la inicialización se ejecuta dentro del archivo `main.dart`, donde se emplea el método `WidgetsFlutterBinding.ensureInitialized()` para garantizar la correcta carga de servicios asíncronos antes de establecer la conexión con Firebase. Posteriormente, se invoca `Firebase.initializeApp()` utilizando la configuración correspondiente a la plataforma actual. Esta secuencia asegura que todos los servicios de Firebase estén disponibles antes de renderizar el widget raíz de la aplicación.

**Figura 51**

*Método para servicios asíncronos*

```
Run | Debug | Profile
void main() async {
  WidgetsFlutterBinding.ensureInitialized();
  await Firebase.initializeApp(options: DefaultFirebaseOptions.currentPlatform);
  runApp(const MyApp());
}
```

*Fuente: Autoría*

La correcta inicialización del entorno Firebase garantiza que la aplicación pueda establecer una conexión estable con la base de datos en tiempo real, permitiendo la suscripción a eventos de actualización sin generar errores de sincronización o fallos de conexión. Este procedimiento constituye el punto de enlace entre la capa de almacenamiento en la nube y la capa de visualización móvil, asegurando continuidad en la arquitectura multicapa del sistema IoT desarrollado.

**3.7.7.2 Consulta de Datos en Tiempo Real**

En la Figura 52 se muestra la conexión hacia los datos se realiza mediante la creación de una referencia estructurada a la ruta correspondiente dentro del árbol jerárquico definido previamente. En el proyecto desarrollado, dicha referencia apunta a la rama “actual” de cada nodo sensor, siguiendo la estructura nodos/{identificador}/actual. Esta configuración permite acceder exclusivamente al estado consolidado más reciente de las variables ambientales, optimizando la eficiencia en la transferencia de datos.

**Figura 52**

*Estructura de ruta*

```
DatabaseReference refNodo(String nodo) {
  return FirebaseDatabase.instance.ref("nodos/$nodo/actual");
}
```

*Fuente: Autoría*

Una vez establecida la referencia, la aplicación emplea el widget `StreamBuilder`, el cual escucha permanentemente el evento `onValue` asociado al nodo seleccionado, tal como se muestra la Figura 53. Este mecanismo permite recibir automáticamente cualquier modificación realizada desde Node-RED mediante solicitudes `PATCH`, garantizando sincronización instantánea entre la base de datos en la nube y la interfaz móvil.

**Figura 53**

*Escucha permanentemente al nodo seleccionado*

```
child: Padding(
  padding: const EdgeInsets.all(16),
  child: StreamBuilder<DatabaseEvent>(
    stream: widget.ref.onValue,
    builder: (context, snapshot) {
      if (snapshot.hasData && snapshot.data
```

*Fuente: Autoría*

Como se muestra en la Figura 54, durante la recepción del evento, el objeto `snapshot` es procesado para extraer la información contenida en el campo “sensores”. El sistema realiza una conversión dinámica del objeto `JSON` recibido hacia un mapa tipado en `Dart`, permitiendo acceder de forma estructurada a las variables temperatura, humedad y lux. Posteriormente, los valores son actualizados mediante `setState`, lo que desencadena la reconstrucción controlada del widget sin necesidad de reiniciar la aplicación.

**Figura 54**

*Conversión dinámica del objeto JSON*

```
stream: widget.ref.onValue,
builder: (context, snapshot) {
  if (snapshot.hasData && snapshot.data?.snapshot.value != null) {
    final raw = snapshot.data!.snapshot.value;
    debugPrint("[${widget.titulo}] raw: $raw");

    final map = Map<String, dynamic>.from(raw as Map);
```

*Fuente: Autoría*

Este modelo reactivo elimina la necesidad de mecanismos de sondeo periódico, reduce el consumo de recursos de red y garantiza una experiencia de monitoreo en tiempo real

coherente con la arquitectura IoT propuesta. La sincronización automática entre Firebase y Flutter completa la integración de la capa de aplicación con el ecosistema distribuido del sistema desarrollado.

### **3.7.7.3 Diseño de Interfaz de Usuario**

La interfaz de usuario fue desarrollada utilizando los componentes nativos de Flutter bajo una estructura jerárquica de widgets. La pantalla principal se organiza mediante un Scaffold que integra una barra superior y un cuerpo construido con un ListView, permitiendo visualizar múltiples estaciones de monitoreo de forma vertical. Cada nodo sensor se representa mediante un componente Card independiente que encapsula las variables ambientales correspondientes, organizadas internamente con estructuras tipo Column y Row para alinear de manera clara el nombre de cada variable y su valor numérico. Esta disposición modular facilita la escalabilidad del sistema y mantiene separación estructural entre estaciones de monitoreo.

La actualización de los datos se encuentra integrada directamente dentro de cada tarjeta mediante el uso de StreamBuilder, lo que permite que la interfaz se reconstruya automáticamente cuando se detecta un cambio en la base de datos Firebase. Esta estrategia garantiza coherencia entre la capa de almacenamiento en la nube y la representación visual en el dispositivo móvil.

La actualización de los datos se encuentra integrada directamente dentro de cada tarjeta mediante el uso de StreamBuilder, lo que permite que la interfaz se reconstruya automáticamente cuando se detecta un cambio en la base de datos Firebase. Esta estrategia garantiza coherencia entre la capa de almacenamiento en la nube y la representación visual en el dispositivo móvil.

La Figura 55 muestra la pantalla principal de la aplicación en ejecución, donde se visualizan dos nodos activos con sus respectivas mediciones ambientales actualizadas

dinámicamente desde Firebase Realtime Database. La implementación de esta interfaz completa la arquitectura del sistema, integrando captura de datos, procesamiento, almacenamiento local, sincronización en la nube y visualización remota dentro de un entorno tecnológico unificado.

**Figura 55**  
*Interfaz App Móvil preliminar*



*Fuente: Autoría*

El diseño adoptado prioriza funcionalidad y claridad sobre elementos gráficos avanzados, enfocándose en la visualización inmediata de variables críticas como temperatura, humedad y nivel de iluminación. Esta decisión responde a criterios de eficiencia, estabilidad y facilidad de interpretación técnica, alineándose con los objetivos de monitoreo del sistema IoT desarrollado.

Con la implementación de la aplicación móvil se completa la arquitectura integral del sistema IoT propuesto. La solución desarrollada integra dispositivos sensores, procesamiento en el Gateway, almacenamiento local en SQLite, sincronización segura hacia Firebase Realtime Database y visualización en tiempo real mediante Flutter. Esta estructura multicapa

garantiza disponibilidad, trazabilidad y acceso remoto a la información ambiental, estableciendo una base sólida para el análisis y control del entorno de producción de Forraje Verde Hidropónico.

## Capítulo IV: Pruebas de Funcionamiento

En este capítulo se presentan los procesos de implementación, pruebas funcionales y análisis de resultados correspondientes al sistema IoT desarrollado para la producción interior de forraje verde hidropónico (FVH). Se describe detalladamente el comportamiento del sistema en un entorno controlado, considerando las variables críticas del cultivo: luminosidad, temperatura y riego. Se evalúa la eficiencia de la red de sensores y actuadores implementada, así como la precisión en la recopilación de datos y la respuesta del sistema ante diferentes condiciones ambientales. Además, se analizan los resultados obtenidos a través de la plataforma de monitoreo, permitiendo validar el cumplimiento de los objetivos propuestos y la efectividad del sistema en términos de automatización y sostenibilidad.

Finalmente, se discute la aplicabilidad del entorno IoT en escenarios reales, destacando sus ventajas frente a métodos tradicionales de producción forrajera y su potencial para mejorar la gestión agronómica en contextos afectados por el cambio climático.

### 4.1 Implementación de la Estructura del Sistema

La estructura física destinada a la producción interior de forraje verde hidropónico fue diseñada bajo criterios de aprovechamiento del espacio vertical, resistencia estructural y facilidad de mantenimiento, tal como se muestra en la Figura 56. Se construyó un módulo metálico con recubrimiento antioxidante, capaz de soportar condiciones de humedad constantes propias del entorno de cultivo. Esta estructura se compone de cuatro niveles escalonados, en los cuales se alojan un total de 40 bandejas distribuidas en ambos lados del armazón, permitiendo una producción continua y organizada.

Cada nivel de la estantería cuenta con soporte para sistemas de riego automatizado mediante nebulizadores, iluminación artificial con tecnología LED, y sensores ambientales estratégicamente ubicados. En la parte superior de la estructura se fijaron luminarias LED, garantizando el fotoperiodo necesario para el óptimo desarrollo del FVH. La distribución de

los elementos considera un diseño modular, lo que facilita el acceso para el monitoreo, la limpieza y el mantenimiento de los componentes.

### **Figura 56**

*Estructura metálica de Forraje Verde Hidropónico*



Fuente: Autoría

El sistema fue instalado en un área cubierta de aproximadamente 3 metros de largo por 1,5 metros de ancho y 1,60 de alto delimitando un entorno controlado ideal para pruebas funcionales. Este espacio permite una adecuada ubicación de los nodos sensores y los actuadores, garantizando una conectividad inalámbrica eficiente y una operación estable del entorno IoT implementado.

#### **4.2. Implementación de bandejas para cultivo**

Las bandejas destinadas a la producción de FVH presentan una estructura rectangular fabricada en material de plástico alta densidad, lo que les otorga resistencia y durabilidad ante la exposición constante a la humedad. De acuerdo con las especificaciones técnicas del material utilizado en este proyecto, cada unidad cuenta con unas dimensiones externas de 51.5 cm de longitud, 25.5 cm de ancho y una profundidad de 5.5 cm, proporcionando un área de siembra efectiva para el desarrollo del tapete radicular, tal como se muestra en la Figura 57. El diseño

incluye un fondo con relieves o canales longitudinales que favorecen la aireación y la distribución del riego, además de un sistema de perforaciones estratégicas situadas en uno de sus extremos para evitar el encharcamiento de agua el cual produciría presencia de hongos en el tapete del forraje.

**Figura 57**  
*Bandeja para cultivo FVH*



Fuente: Autoría

La función principal de estas bandejas es servir como soporte físico y contenedor para el proceso de germinación y crecimiento acelerado de las plántulas sin necesidad de suelo. Su finalidad técnica es doble: por un lado, optimizar la densidad de siembra al permitir una distribución uniforme de las semillas; por otro lado, el sistema de drenaje por perforaciones asegura la evacuación del excedente de agua, evitando la anoxia radicular y la proliferación de patógenos (hongos) por estancamiento de agua. En el contexto de las pruebas de

funcionamiento, la bandeja actúa como la unidad básica de producción, facilitando el manejo, la cosecha y el pesaje del forraje obtenido para el cálculo de los índices de conversión.

### **4.3 Implementación del sistema de riego**

El sistema de riego está integrado por una unidad de bombeo compuesta por una electrobomba de ½ hp periférica acoplada a una red de distribución en tubería de PVC, la cual alimenta una serie de nebulizadores de cuatro salidas dispuestos estratégicamente sobre la estructura metálica de soporte.

En la Figura 58, se muestra el sistema de impulsión hidráulica que consta de una electrobomba de tipo periférico con una potencia nominal de 0.5 HP. Físicamente, presenta una carcasa de hierro fundido con aletas de refrigeración externas y una caja de bornes superior para la conexión eléctrica. En cuanto a su instalación hidráulica, observada en las imágenes, se encuentra conectada a tubería de PVC de presión. La línea de succión incorpora una válvula de bola de accionamiento manual (mango azul) que permite el aislamiento del flujo, mientras que la línea de descarga vertical cuenta con una unión universal (tuerca unión) de color blanco, diseñada para facilitar el desmontaje rápido del equipo sin necesidad de cortar la tubería. La unidad reposa sobre una base de madera para mitigar la transmisión de vibraciones al suelo de concreto.

**Figura 58**  
*Bomba de Agua de 1/2 hp*



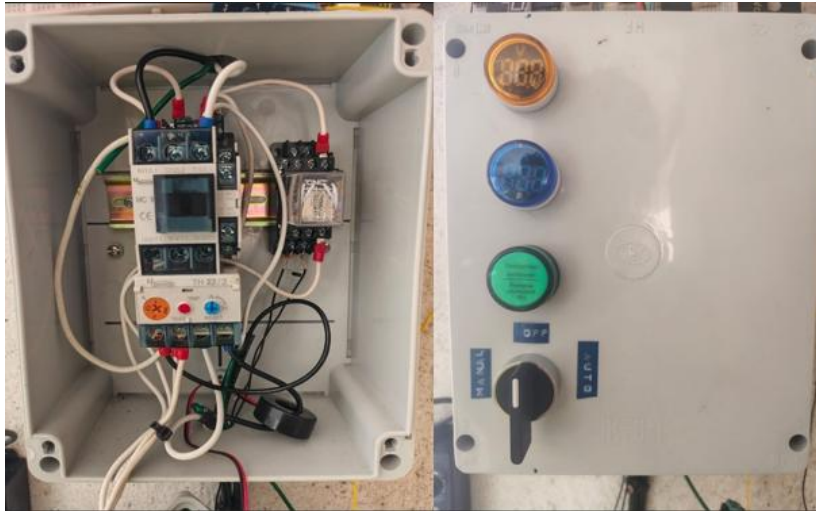
Fuente: Autoría

Este equipo permite convertir la energía eléctrica en energía hidráulica, succionando el agua del tanque de almacenamiento y presurizándola a través de la red de tuberías. La finalidad técnica de seleccionar una bomba de tipo periférico radica en su capacidad para generar altas presiones de trabajo con caudales relativamente bajos, condición indispensable para la correcta operación de los sistemas de nebulización utilizados en el FVH. En el contexto de las pruebas de funcionamiento, la bomba es el elemento activo esencial para verificar la presión dinámica del sistema y asegurar que el riego llegue con la fuerza suficiente a los puntos más distantes de la estantería, garantizando una cobertura uniforme del forraje.

En la Figura 59 se observa el módulo que consiste en un gabinete estanco de polímero técnico que centraliza la lógica de activación para la red de 110V. En su panel frontal, integra indicadores digitales para el monitoreo de parámetros eléctricos, un botón de estado y un selector de modo (Manual/Apagado/Automático). Internamente, el sistema emplea un contactor de potencia (modelo MC 9) acoplado a un relé térmico (modelo TH 22/3) para la gestión de carga de la bomba. Un detalle técnico crítico es la implementación de un diodo de

protección (diodo volante) instalado en paralelo con la bobina del relé de activación; este componente está orientado para disipar la fuerza electromotriz inversa generada durante el corte de corriente.

**Figura 59**  
*Sistema de activación de bomba de agua*



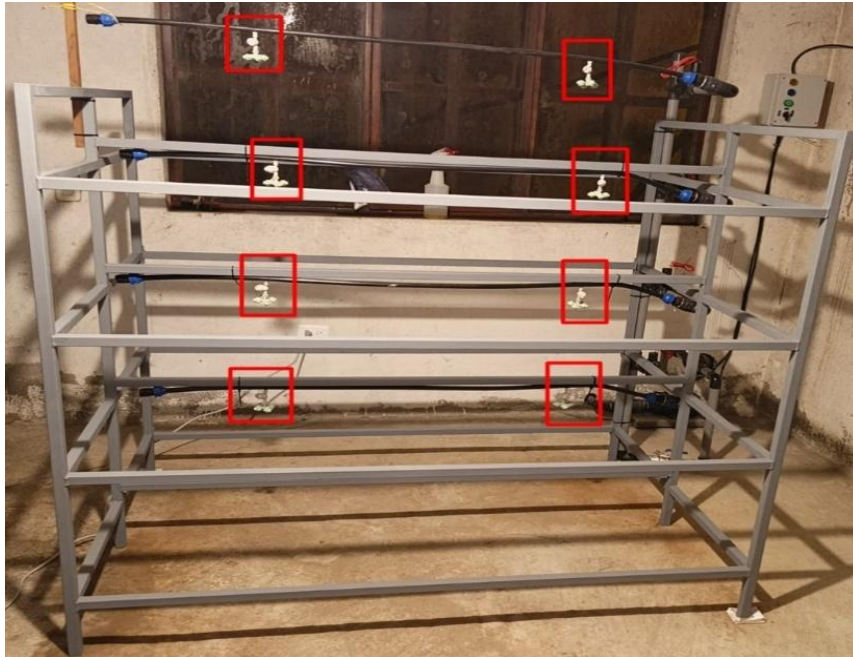
Fuente: Autoría

La función primordial de este tablero es actuar como puente entre el circuito de control de baja potencia (microcontrolador esp32) y el circuito de fuerza que alimenta la bomba. Por un lado, permite que una señal de baja corriente active una carga inductiva mayor sin comprometer los componentes electrónicos sensibles; por otro lado, el diodo de protección tiene la finalidad específica de evitar el "rebote" de voltaje o picos inductivos hacia el microcontrolador o circuito de programación, previniendo daños por sobretensión o reinicios inesperados. Esto asegura que, durante las pruebas de funcionamiento, la conmutación entre estados sea limpia y no interfiera con la estabilidad del software de automatización.

El sistema de distribución final está compuesto por una red de tuberías de polietileno de alta densidad (PE) ubicadas horizontalmente en cada nivel de la estantería metálica. Sobre estas líneas se encuentran instalados nebulizadores de cuatro salidas tipo cruz, fabricados en polímero resistente a la corrosión y químicos. Estos dispositivos están estratégicamente posicionados sobre las bandejas de cultivo, utilizando conectores de inserción que aseguran la

estanqueidad. Como se observa en el diseño general de la Figura 60, los nebulizadores están distribuidos de manera equidistante para cubrir toda la superficie de siembra, formando un patrón de riego redundante que garantiza el traslape de los conos de aspersión.

**Figura 60**  
*Distribución de nebulizadores.*



Fuente: Autoría

La función primordial de los nebulizadores es la atomización del agua, transformando el flujo líquido en una niebla fina de gotas microscópicas. La finalidad técnica de este método es mantener niveles elevados de humedad relativa y asegurar una hidratación profunda del tapete radicular sin causar daño mecánico a las plántulas ni desplazar las semillas por impacto hídrico. En la fase de pruebas de funcionamiento, este sistema permite validar la uniformidad del coeficiente de riego, asegurando que no existan zonas secas ni puntos de encharcamiento excesivo. Esto es crítico para prevenir la proliferación de hongos y garantizar un crecimiento estandarizado del forraje en todos los niveles de la estructura.

#### **4.4 Implementación Electrónica del sistema**

La implementación electrónica del sistema se ha distribuido de manera estratégica para garantizar una cobertura integral del entorno de cultivo y una gestión eficiente de los actuadores. Como se observa en la Figura 61 la disposición física del proyecto, los nodos sensores de control se encuentran ubicados en puntos clave: el nodo 1 de control de la activación de riego está situado junto al tablero eléctrico y la electrobomba, mientras que el nodo sensor 2 se han posicionado en la periferia de la estantería metálica para evitar el contacto directo con la humedad de la nebulización, pero manteniendo la proximidad necesaria para capturar datos ambientales precisos. La arquitectura se divide funcionalmente en dos frentes: el Nodo 1, encargado de la gestión del ciclo hídrico y el monitoreo de temperatura y humedad ambiente, y el Nodo 2, especializado en la medición de la intensidad lumínica. Esta separación permite que cada unidad procese variables específicas de forma autónoma, enviando la información a través de la red local para la toma de decisiones automatizada, asegurando que tanto el riego como la iluminación suplementaria respondan en tiempo real a las necesidades del Forraje Verde Hidropónico.

**Figura 61**  
*Implementación de los nodos en el entorno IoT*



Fuente: Autoría

#### ***4.4.1 Implementación del nodo 1***

Estratégicamente, Nodo 1 ha sido instalado en la sección superior de la zona de control, anclado a la pared lateral a una altura que lo protege de humedad directa, como se muestra en la Figura 62, pero permitiendo una conexión cableada corta y eficiente hacia el gabinete de control de la bomba para minimizar interferencias electromagnéticas en la señal de activación.

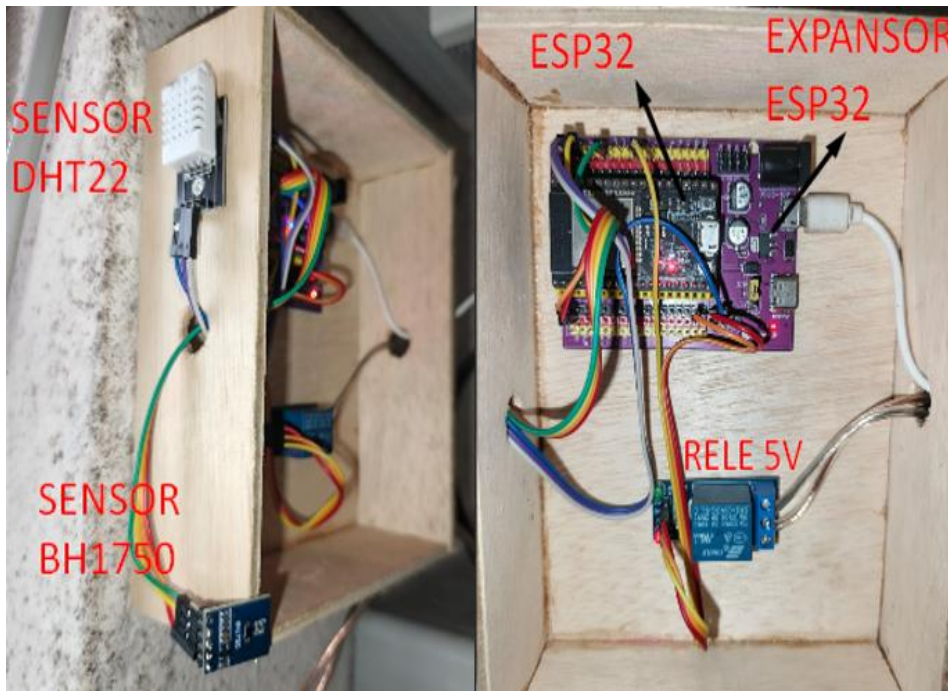
**Figura 62**  
*Implementación del Nodo Sensor 1*



Fuente: Autoría

El Nodo 1 constituye el núcleo de control del sistema hídrico, consolidado sobre una placa de desarrollo ESP32-WROOM-DA montada en una placa de expansión del mismo para facilitar la interconexión de componentes. En la Figura 63 se muestra que el nodo integra un sensor BH1750, un sensor DHT22 para el monitoreo ambiental y, fundamentalmente, un módulo de relé de un canal y un regulador de voltaje de 24v que actúan a la par como el activador lógico del sistema de potencia. Su función principal es gestionar la conmutación de la electrobomba de 1/2 HP al recibir una señal digital del microcontrolador, basada en la programación de tiempos o condiciones críticas, el relé cierra el circuito de la bobina del contactor dentro del tablero principal, iniciando el ciclo de nebulización.

**Figura 63**  
*Elementos del circuito del Nodo Sensor 1*



Fuente: Autoría

#### **4.4.2 Implementación del nodo 2**

En cuanto al Nodo 2, su ubicación estratégica se encuentra instalado en una sección opuesta de la infraestructura de cultivo tal como se muestra en la Figura 64, posicionado de tal manera que el sensor tenga una exposición directa a la luz sin obstrucciones de la estantería, lo que garantiza que las mediciones de lux reflejen fielmente la realidad ambiental a la que está expuesto el forraje.

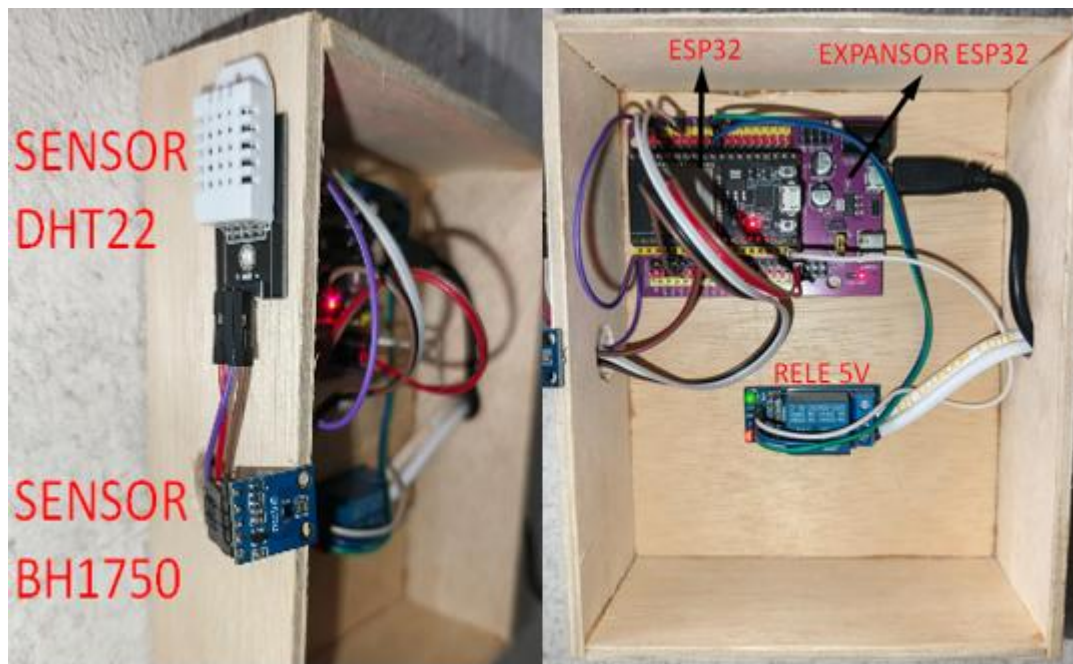
**Figura 64**  
*Implementación del Nodo Sensor 2*



Fuente: Autoría

El Nodo 2 ha sido configurado como la unidad especializada en el monitoreo de la radiación lumínica, utilizando igualmente una placa de desarrollo ESP32-WROOM-DA como unidad de procesamiento central. Como se puede apreciar en la Figura 65, la característica distintiva de este circuito es la integración de un sensor digital de intensidad de luz BH1750, el cual se comunica mediante el protocolo I<sup>2</sup>C para proporcionar lecturas precisas en Lux, fundamentales para evaluar la eficiencia del fotoperiodo en el cultivo. Su función primordial es la recolección de datos ambientales de alta resolución y su transmisión inalámbrica hacia el servidor central, permitiendo la supervisión de los niveles de iluminación suplementaria.

**Figura 65**  
*Elementos del circuito del Nodo Sensor 2*



Fuente: Autoría

#### **4.5 Verificación de configuración de nodos**

Este apartado detalla el proceso de validación técnica realizado para asegurar la correcta integración y respuesta de los nodos de control frente a los periféricos de potencia del sistema. La verificación se centró en corroborar que la arquitectura lógica y el cableado físico permitan una ejecución precisa de los ciclos de riego programados, la disposición necesaria de luz artificial led y su correcta comunicación inalámbrica mediante wifi, garantizando que las señales de control activen de manera síncrona la etapa de actuadores compuesta por el contactor de la bomba de 1/2 HP y el panel de luz led.

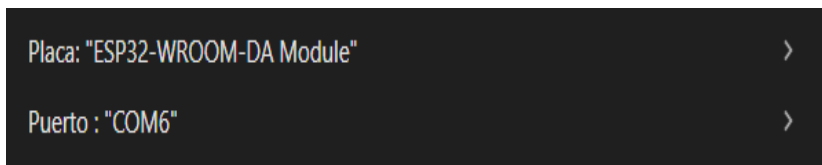
Esta fase de pruebas es fundamental para certificar que cada nodo operativo responde de manera autónoma y segura a los parámetros ambientales y temporales establecidos para la producción del forraje.

#### 4.5.1 Verificación nodo sensor 1 – Riego

La gestión operativa del sistema se utiliza en el microcontrolador ESP32-WROOM-DA, seleccionado por su capacidad de procesamiento y conectividad, tal como se muestra en la Figura 66. Para la transferencia del firmware y las pruebas de comunicación serial, se estableció un enlace digital a través del puerto COM6, vinculando la placa con la estación de trabajo para la carga de los algoritmos de control. A la placa se integra un sensor DHT 22 para medir temperatura y humedad ambiental, un sensor BH1750 destinado a la medición de la intensidad lumínica y un módulo de relé que actúa como interfaz de potencia para la activación los actuadores. Esta etapa de configuración asegura que la asignación de pines y la velocidad de transmisión sean compatibles con los periféricos conectados, permitiendo que el nodo procese correctamente las señales ambientales y ejecute las acciones de riego de manera automatizada.

#### Figura 66

*Modelo de ESP32 y puerto*



Fuente: Autoría

En la Figura 67 se muestra la programación que se encarga de gestionar el acceso del sistema a la red de internet local. Se caracteriza por un proceso de autenticación sencillo que utiliza el nombre de la red y su contraseña para establecer el enlace. Un detalle importante es que el código incluye una rutina de espera; mientras el dispositivo intenta conectarse, envía señales visuales al monitor (puntos suspensivos) para confirmar que está trabajando. Una vez que tiene éxito, el sistema genera un mensaje de confirmación que muestra la dirección IP asignada, lo que sirve como una "identificación" dentro de la red para asegurar que el nodo está listo para transmitir datos.

**Figura 67***Establecimiento de comunicación wifi*

```

WiFi.begin(ssid, password);
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { delay(400); Serial.print("."); }
enviar("✅ WiFi conectado IP=" + WiFi.localIP().toString());

```

Fuente: Autoría

En la Figura 68 se muestra el código que configura la comunicación con un servidor central mediante un protocolo de mensajería liviano MQTT. Este bloque se distingue por establecer el envío de información. Define exactamente a qué dirección de servidor y por qué puerto debe viajar la señal. Además, incluye una función de respuesta automática conocida como *callback*, que permite al sistema no solo enviar datos de los sensores, sino también quedar a la espera de instrucciones externas. Esto hace que el código sea eficiente, ya que permite un intercambio de mensajes rápido y organizado sin consumir muchos recursos del microcontrolador.

**Figura 68***Establecimiento de comunicación MQTT*

```

mqttClient.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
mqttClient.setCallback(mqttCallback);

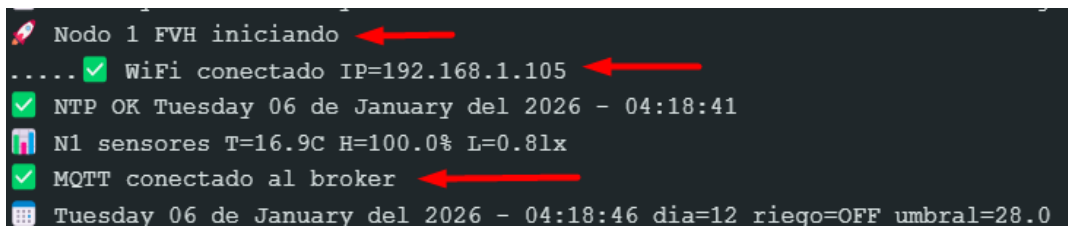
```

Fuente: Autoría

La validación final de la configuración del nodo se confirma mediante el flujo de datos observado en el monitor serie, donde se verifica una secuencia de inicio exitosa bajo la identidad de "Nodo 2 FVH". El proceso comienza con el establecimiento de hacia una conexión inalámbrica estable WIFI, asignando la dirección ip 192.168.1.104 al dispositivo, seguida de la sincronización temporal mediante el protocolo NTP y la vinculación satisfactoria al broker MQTT. Como se evidencia en la Figura 69 en los registros de salida, el nodo logra procesar y transmitir en tiempo real las lecturas de los sensores (Temperatura de 19.1°C, Humedad del

98.8% y Luminosidad de 14.2 lx), operando bajo un modo automático que ajusta el estado de los actuadores en función de los objetivos de luminosidad programados. Esta respuesta integrada demuestra que la arquitectura de comunicación es robusta y que el nodo es capaz de mantener una interacción constante con la red, garantizando la trazabilidad de las variables ambientales del cultivo.

**Figura 69**  
*Inicialización de Nodo Sensor 1*



```
Nodo 1 FVH iniciando
.... WiFi conectado IP=192.168.1.105
WiFi NTP OK Tuesday 06 de January del 2026 - 04:18:41
N1 sensores T=16.9C H=100.0% L=0.8lx
MQTT conectado al broker
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:18:46 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
```

Fuente: Autoría

#### 4.5.2 Verificación nodo sensor 2 – Luz

En la Figura 70 se observa, al igual que el nodo 1 los parámetros de validación operativa del segundo nodo sensor se centró en la gestión de la radiación lumínica, manteniendo la misma arquitectura de red y protocolos de comunicación que el nodo precedente para asegurar la homogeneidad del sistema. Los resultados obtenidos en el monitor serie confirmaron una transmisión estable de datos hacia el broker MQTT. Al compartir la misma configuración de enlace que el nodo 1, la verificación se enfocó primordialmente en la precisión de las lecturas ambientales y en la capacidad de respuesta del nodo ante las variaciones de luz en el entorno de cultivo.

**Figura 70**  
*Establecimiento de comunicación WIFI y MQTT*



```
WiFi.begin(ssid, password);
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { delay(400); Serial.print("."); }
enviar("WiFi conectado IP=" + WiFi.localIP().toString());

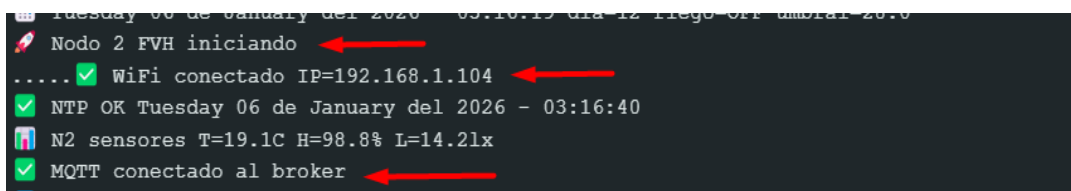
mqttClient.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
mqttClient.setCallback(mqttCallback);
```

Fuente: Autoría

Como se muestra en la Figura 71 la validación del Nodo 2 se confirma mediante el registro de eventos en el monitor serie, donde se observa un inicio de sistema correcto y una vinculación exitosa a la red inalámbrica local con la dirección IP 192.168.1.104. El sistema garantiza la precisión temporal de los datos mediante la sincronización con el protocolo NTP, logrando establecer una conexión estable con el broker MQTT para el intercambio de información.

### Figura 71

#### *Inicialización del Nodo Sensor 2*



```

Tuesday 06 de January del 2026 03:16:19 dia 12 luego OFF ambiental 20.0
Nodo 2 FVH iniciando
... WiFi conectado IP=192.168.1.104
NTP OK Tuesday 06 de January del 2026 - 03:16:40
N2 sensores T=19.1C H=98.8% L=14.2lx
MQTT conectado al broker
  
```

Fuente: Autoría

La finalidad principal de las líneas de programación para la conectividad es transformar el sistema IoT de cultivo en un dispositivo inteligente y conectado. Al integrar la conexión WiFi con el protocolo de comunicación, se logra que el nodo sensor deje de ser una unidad aislada y pase a ser parte de una red de monitoreo remoto. El objetivo técnico es garantizar que los datos de temperatura, humedad y luz lleguen de forma segura a una plataforma digital en tiempo real. Esto permite al usuario supervisar el crecimiento del forraje desde cualquier lugar y asegura que la automatización responda correctamente a las condiciones ambientales detectadas, optimizando el uso del agua y la energía.

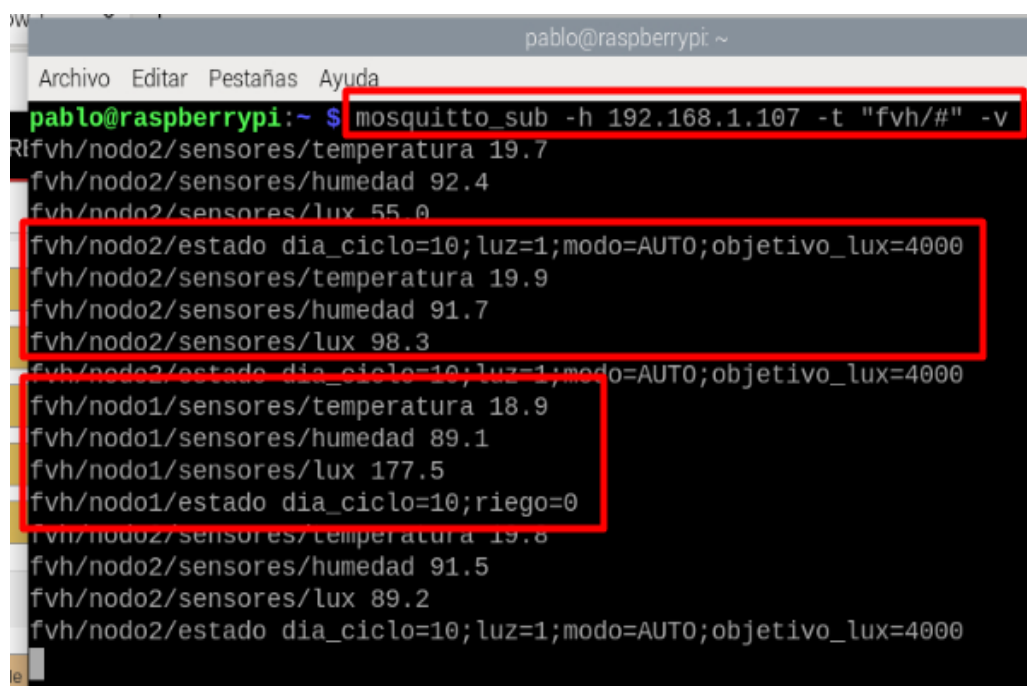
#### **4.5.3 Verificación nodo central Gateway**

La Figura 72 presenta la terminal de comandos ejecutada en el entorno de Raspberry Pi, donde se utiliza el cliente Mosquitto para suscribirse a todos los tópicos del sistema bajo la jerarquía "fvh/#". Esta interfaz se caracteriza por mostrar un flujo estructurado de mensajes provenientes de múltiples nodos, identificando claramente el origen de la información

mediante rutas específicas como `fvh/nodo1` y `fvh/nodo2`. En los registros se observa la recepción de variables críticas incluyendo temperatura, humedad e intensidad lumínica, junto con el estado operativo del ciclo de cultivo (día de ciclo, modo automático y objetivos de iluminación). Los datos se presentan en formato de texto plano, facilitando la auditoría inmediata de los valores que están siendo enviados desde los microcontroladores hacia el servidor central.

### Figura 72

*Recepción de datos en la Raspberry Pi 4*



```
pablo@raspberrypi ~  
Archivo Editar Pestañas Ayuda  
pablo@raspberrypi:~$ mosquitto_sub -h 192.168.1.107 -t "fvh/#" -v  
fvh/nodo2/sensores/temperatura 19.7  
fvh/nodo2/sensores/humedad 92.4  
fvh/nodo2/sensores/lux 55.0  
fvh/nodo2/estado dia_ciclo=10;luz=1;modo=AUTO;objetivo_lux=4000  
fvh/nodo2/sensores/temperatura 19.9  
fvh/nodo2/sensores/humedad 91.7  
fvh/nodo2/sensores/lux 98.3  
fvh/nodo2/estado dia_ciclo=10;luz=1;modo=AUTO;objetivo_lux=4000  
fvh/nodo1/sensores/temperatura 18.9  
fvh/nodo1/sensores/humedad 89.1  
fvh/nodo1/sensores/lux 177.5  
fvh/nodo1/estado dia_ciclo=10;riego=0  
fvh/nodo2/sensores/temperatura 19.8  
fvh/nodo2/sensores/humedad 91.5  
fvh/nodo2/sensores/lux 89.2  
fvh/nodo2/estado dia_ciclo=10;luz=1;modo=AUTO;objetivo_lux=4000
```

Fuente: Autoría

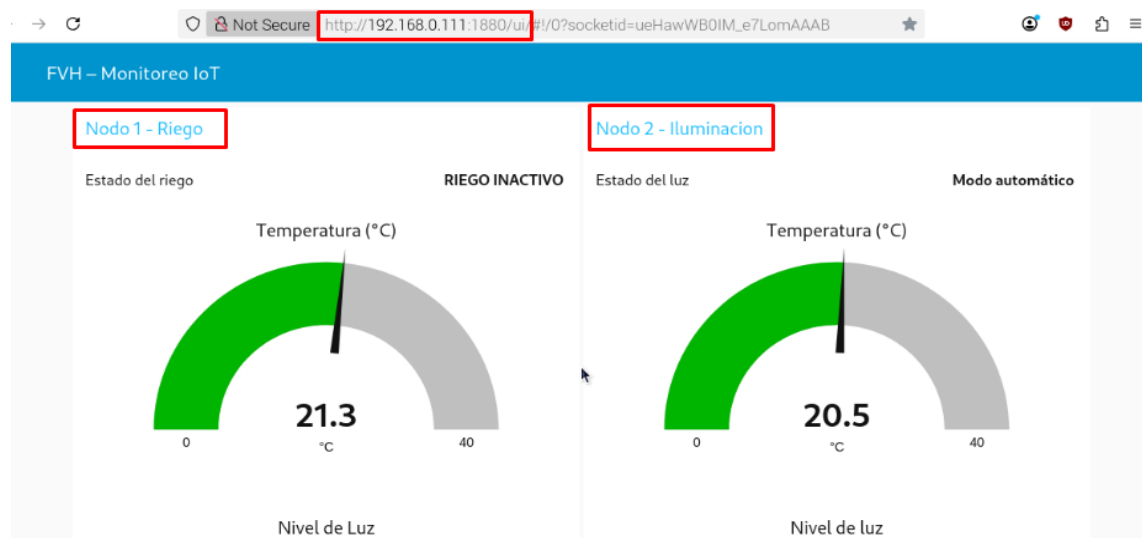
La función principal de esta etapa es actuar como un monitor de telemetría que valida la correcta publicación y llegada de los datos al broker MQTT antes de su procesamiento final. Su finalidad técnica es servir como puente de verificación para asegurar que la información recolectada por los sensores en el entorno de FVH sea transmitida íntegramente y sin pérdidas hacia la base de datos **SQLite** gestionada en **Node-RED**. Al centralizar estas lecturas, el sistema permite supervisar que ambos nodos mantengan la coherencia en sus mediciones y

confirmar que las instrucciones de control, como el encendido de luces o riego, se estén ejecutando según los parámetros programados para el éxito del cultivo hidropónico.

#### 4.5.4 Validación del Sistema de Monitoreo en Tiempo Real

La Figura 73 presenta el dashboard del sistema desarrollado en Node-RED durante la fase de validación en tiempo real. En esta interfaz se visualizan los valores de temperatura registrados por cada nodo, así como el estado operativo de los actuadores asociados. El Nodo 1, correspondiente al sistema de riego, muestra una temperatura de 21.3 °C con el estado de riego inactivo, mientras que el Nodo 2, encargado del control de iluminación, registra una temperatura de 20.5 °C bajo modo automático.

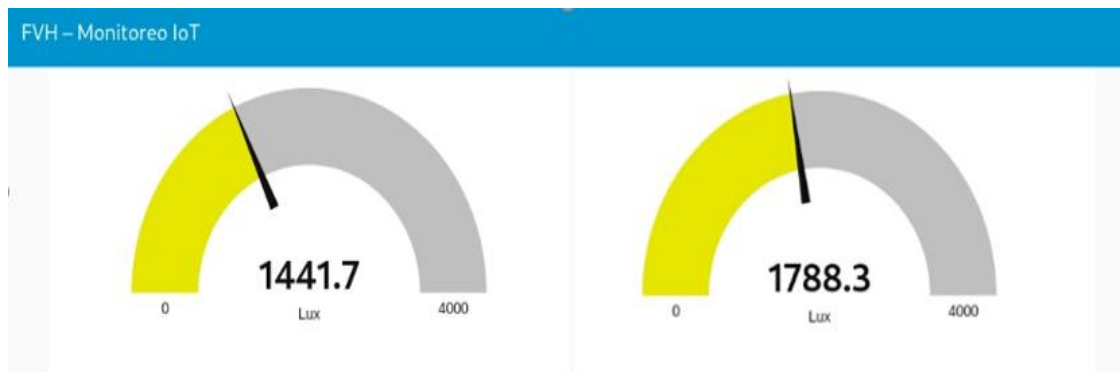
**Figura 73**  
*Estados de Actuadores y datos de Temperatura*



Fuente: Autoría

La Figura 74 presenta la visualización en tiempo real de la variable de iluminancia registrada por los nodos del sistema de monitoreo IoT. La información es representada mediante indicadores tipo gauge que permiten interpretar de forma intuitiva el nivel de luz en cada zona supervisada. Esta representación facilita la comparación inmediata entre ambos puntos de medición y contribuye a la toma de decisiones relacionadas con el control automático de iluminación dentro del entorno agrícola.

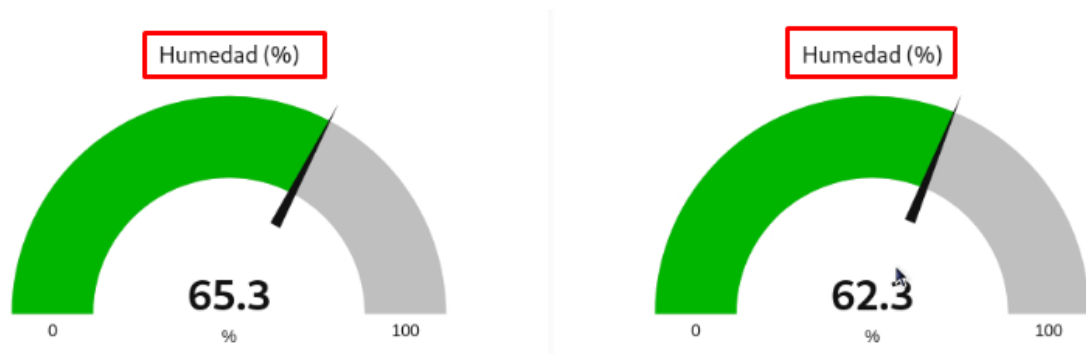
**Figura 74**  
*Datos de Luminosidad*



Fuente: Autoría

En cuanto a la humedad respecta, la Figura 75 muestra los valores de humedad relativa reportados por ambos nodos durante el mismo periodo de validación. El Nodo 1 registró un nivel de 65.3 %, mientras que el Nodo 2 presentó un valor de 62.3 %, ambos dentro del rango adecuado para el desarrollo del forraje verde hidropónico en condiciones controladas.

**Figura 75**  
*Datos de Humedad*



Fuente: Autoría

La representación mediante indicadores tipo gauge permite observar de forma intuitiva la ubicación del valor dentro del rango operativo establecido, facilitando la supervisión inmediata del sistema. Estos resultados confirman la correcta transmisión de datos desde los nodos sensores hacia la plataforma de visualización, evidenciando estabilidad en la comunicación y coherencia entre las lecturas ambientales y el estado de los actuadores.

#### 4.5.5 Validación del Sistema App Movil

La Figura 76 se puede evidenciar la interfaz final de la aplicación móvil desarrollada para la supervisión remota del sistema IoT. La plataforma permite visualizar en tiempo real los valores de temperatura, humedad e iluminación organizados por nodo, junto con el registro de la última actualización recibida desde la base de datos en la nube. La actualización dinámica de los datos confirma la correcta integración entre los nodos sensores, el procesamiento en el servidor y la capa de aplicación móvil.

**Figura 76**  
*Interfaz de App Móvil para Monitoreo*



Fuente: Autoría

#### 4.6 Pruebas de Funcionamiento de los nodos

La fase de adquisición de datos consistió en validar la capacidad de los nodos para transformar las variables físicas del entorno de cultivo en señales digitales procesables y transmitirlos de forma inalámbrica. Durante las pruebas, se comprobó que el sistema captura

con precisión parámetros críticos como la temperatura, la humedad relativa y la intensidad lumínica. Este proceso se realiza mediante una lectura cíclica de los sensores integrados en cada placa ESP32, donde la información es empaquetada y enviada bajo el protocolo MQTT hacia un servidor central para su posterior registro en SQLITE. La estabilidad en la adquisición se evidenció en el flujo constante de mensajes recibidos, donde se observó que el sistema no solo reporta las condiciones ambientales, sino también el estado operativo de los actuadores y los objetivos de control programados, como el umbral de Lux, garantizando la integridad de la información necesaria para el análisis del crecimiento del Forraje Verde Hidropónico.

#### ***4.6.1 Prueba de Funcionamiento Nodo 1***

En la Figura 77 se muestra la verificación operativa del Nodo 1 permitió validar la consistencia en la adquisición de datos ambientales bajo condiciones de alta humedad, características del entorno de producción de FVH. Como se observa en los registros destacados del monitor serie, el dispositivo reporta lecturas de temperatura estables que oscilan entre los 16.9°C y 17.1°C, junto con una saturación de humedad relativa del 100.0%, valores que corresponden al microclima generado tras los ciclos de nebulización. La precisión en la captura de estas variables es fundamental, ya que el sistema utiliza estos datos para confirmar que el entorno se mantiene dentro de los parámetros biológicos necesarios para el cultivo.

**Figura 77***Captura de datos del Nodo Sensor 1*

```

✓ NTP OK Tuesday 06 de January del 2026 - 04:18:41
N1 sensores T=16.9C H=100.0% L=0.81x
✓ MQTT conectado al broker
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:18:46 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:18:51 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:18:56 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:19:01 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:19:06 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:19:11 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:19:16 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:19:21 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:19:26 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:19:31 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:19:36 dia=12 riego=OFF umbral=28.0
N1 sensores T=17.1C H=100.0% L=0.81x
Tuesday 06 de January del 2026 - 04:19:41 dia=12 riego=OFF umbral=28.0

```

Fuente: Autoría

Asimismo, el registro muestra una intensidad lumínica mínima de 0.81 lx, lo que indica una respuesta sensible del sensor incluso en condiciones de baja iluminación. Esta prueba confirma que el nodo procesa y empaqueta correctamente la información de los sensores, manteniendo una actualización constante cada cinco segundos, lo que asegura una supervisión en tiempo real sin interrupciones en el flujo de datos.

#### ***4.6.2 Prueba de funcionamiento Nodo 2***

En cuanto a la telemetría, el nodo reporta en tiempo real variables críticas para el cultivo, registrando una temperatura de 19.1°C, una humedad relativa del 98.8% y una intensidad lumínica de 14.2 lx, como se puede apreciar en la Figura 78. Estos registros demuestran que el dispositivo opera bajo un modo automático, comparando constantemente los niveles de luz detectados frente al objetivo de 3000 Lux programado, lo que asegura una gestión eficiente de los recursos del sistema.

**Figura 78***Captura de datos del Nodo Sensor 2*

```

Nodo 2 FVH iniciando
.... ✓ WiFi conectado IP=192.168.1.104
✓ NTP OK Tuesday 06 de January del 2026 - 03:28:10
N2 sensores T=21.3C H=87.6% L=15.8lx
✓ MQTT conectado al broker
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:28:15 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:28:20 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:28:25 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:28:30 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:28:35 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:28:40 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:28:45 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:28:50 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:28:55 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:29:00 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:29:05 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000
N2 sensores T=21.4C H=88.4% L=15.0lx
Tuesday 06 de January del 2026 - 03:29:10 dia=12 luz=OFF modo=AUTO objetivoLux=3000

```

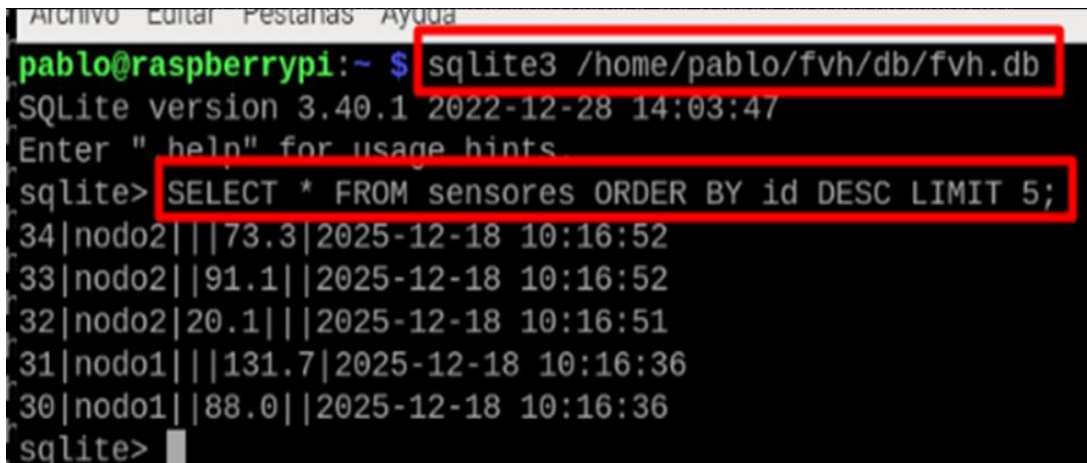
Fuente: Autoría

La prueba demostró que el estado de la iluminación suplementaria permaneció en "OFF" al operar en modo automático, cumpliendo con la jerarquía de control establecida. Al igual que en el nodo anterior, la fluidez de los datos recibidos cada cinco segundos asegura que el servidor central disponga de información actualizada para la toma de decisiones y el almacenamiento histórico en la base de datos.

La verificación del almacenamiento de información se realizó mediante la ejecución de una consulta directa en el gestor de base de datos SQLite, con el propósito de comprobar el registro correcto de los datos provenientes de los nodos sensores. Como se muestra en la Figura 79, se emplea el comando `SELECT * FROM sensores ORDER BY id DESC LIMIT 5;`, el cual permite visualizar los últimos registros almacenados en la base de datos, evidenciando la presencia de valores asociados a los diferentes nodos junto con su respectiva marca temporal. Esta validación confirma el adecuado funcionamiento del proceso de inserción y organización de datos dentro del sistema implementado.

**Figura 79**

*Registro de datos en la Base de datos de SQLite*



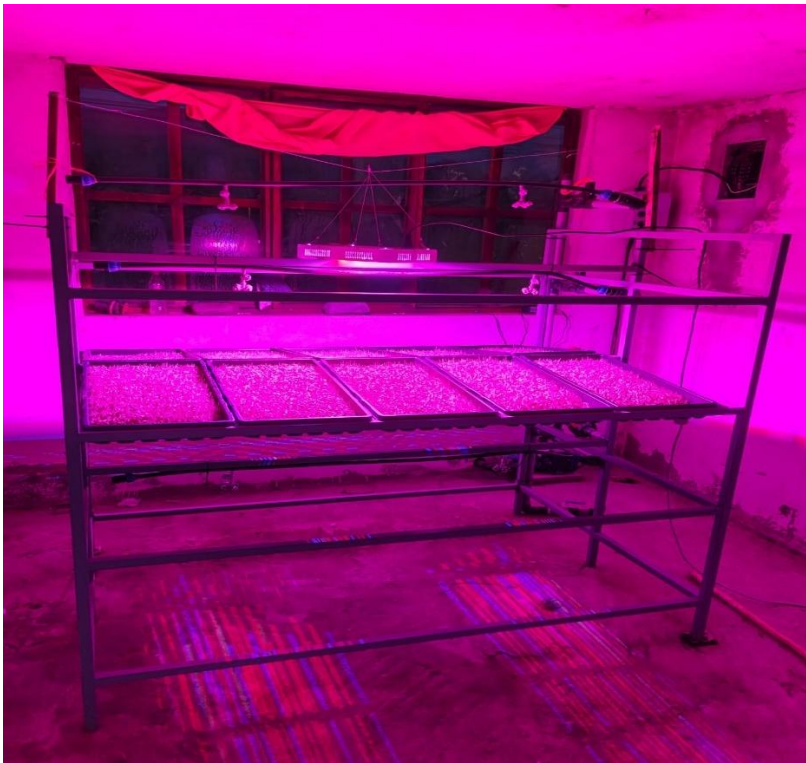
```
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pablo@raspberrypi:~ $ sqlite3 /home/pablo/fvh/db/fvh.db
SQLite version 3.40.1 2022-12-28 14:03:47
Enter " help" for usage hints
sqlite> SELECT * FROM sensores ORDER BY id DESC LIMIT 5;
34|nodo2||73.3|2025-12-18 10:16:52
33|nodo2||91.1||2025-12-18 10:16:52
32|nodo2|20.1||2025-12-18 10:16:51
31|nodo1||131.7|2025-12-18 10:16:36
30|nodo1||88.0||2025-12-18 10:16:36
sqlite>
```

Fuente: Autoría

#### ***4.6.3 Prueba de funcionamiento Panel Led para cultivo***

La prueba de funcionamiento del sistema de iluminación suplementaria se llevó a cabo mediante la integración de paneles LED de espectro completo, diseñados específicamente para estimular los procesos fotosintéticos en el Forraje Verde Hidropónico. Como se observa en la Figura 80 la implementación física, las luminarias emiten una luz de tonalidad purpúrea (espectro "grow light") y están suspendidas estratégicamente sobre las bandejas de cultivo para garantizar una distribución uniforme de la radiación. La instalación eléctrica está centralizada en el tablero de control, el cual permite la activación de los paneles de forma coordinada con la lógica de los nodos sensores, asegurando que la estructura metálica y las plántulas reciban la intensidad necesaria para su desarrollo óptimo.

**Figura 80**  
*Panel led para cultivo*

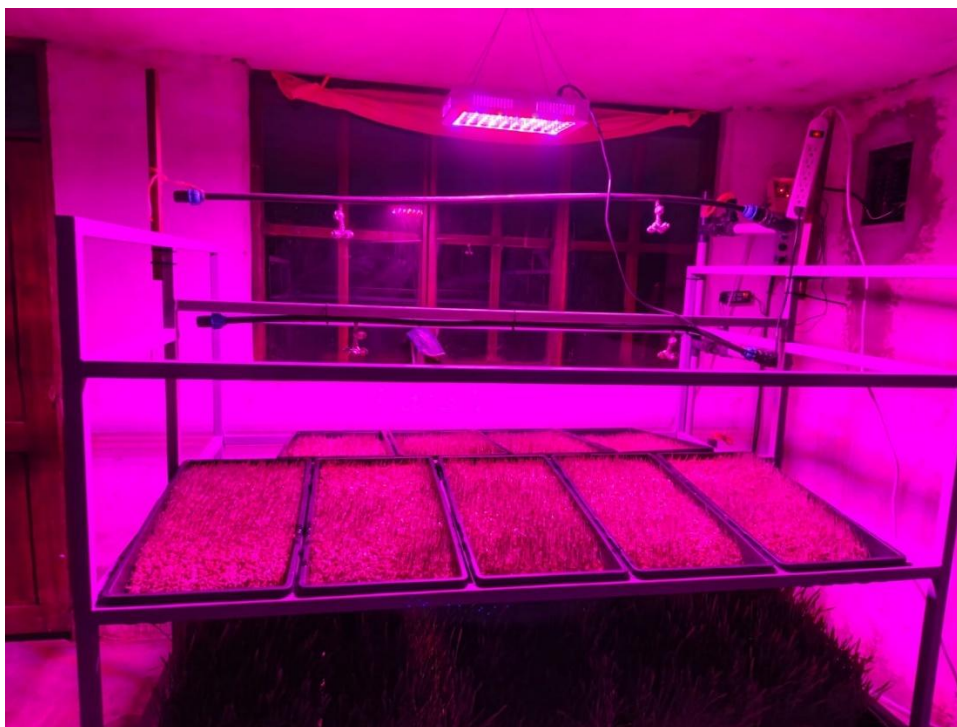


Fuente: Autoría

La función principal de estos paneles es compensar las deficiencias de luz natural dentro del área de cultivo, actuando como un actuador crítico dentro del lazo de control automático. Su finalidad técnica es trabajar en conjunto con el Nodo 2, el cual monitorea constantemente los niveles de lux; cuando la intensidad cae por debajo del umbral programado, el sistema activa la iluminación para mantener el fotoperiodo ideal, como se observa en la Figura 81. Esta prueba confirma que el panel LED responde correctamente a los comandos de control y proporciona la cobertura necesaria para todas las bandejas del nivel intermedio, optimizando la tasa de crecimiento y la calidad nutricional del forraje producido independientemente de las condiciones lumínicas externas.

**Figura 81**

*Vista lateral del Panel led para cultivo*



Fuente: Autoría

La configuración del módulo automatizado, el panel LED de espectro completo se encuentra instalado estratégicamente en la parte superior central de la estructura de cultivo. Esta ubicación elevada permite una distribución de luz cenital que garantiza que el flujo de fotones cubra de manera uniforme las bandejas. El panel está suspendido mediante un sistema de sujeción que permite mantener una distancia óptima respecto al ápice de las plántulas, evitando el estrés térmico mientras proporciona la intensidad lumínica necesaria (entre 2,000 y 3,000 lux) para activar la fotosíntesis. Esta disposición es clave para el éxito del sistema IoT, ya que, al ser controlado por sensores de luminosidad, el panel se activa automáticamente para compensar cualquier deficiencia de luz natural, asegurando que el forraje mantenga su coloración verde intensa y evite el crecimiento débil por falta de energía radiante.

**4.6.4 Medición de Parámetros del Estado del Cultivo Tradicional de FVH**

La medición y el monitoreo sistemático de los parámetros ambientales y fisiológicos constituyen el eje fundamental para garantizar la eficiencia productiva del forraje verde

hidropónico. Dado que este sistema se caracteriza por un crecimiento acelerado en un entorno confinado, cualquier desviación en variables como la temperatura, la humedad relativa o la cantidad hídrica puede comprometer la síntesis de biomasa y la calidad nutricional del cultivo. En este apartado, se describen los estándares de evaluación para cuantificar el estado del cultivo, permitiendo establecer una línea base que correlacione las condiciones controladas con el rendimiento fenológico obtenido en el ciclo de producción.

**Tabla 10**  
*Rangos ambientales para cultivo de FVH*

<b>Rangos óptimos de condiciones ambientales</b>		
<b>Propiedad Física</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rango</b>
<b>Temperatura</b>	°C	16 a 22 °C
<b>Humedad ambiental</b>	%	60 a 80 %
<b>Luminosidad</b>	lux	2000 a 3000 lux

Fuente: Autoría

Como se detalla en la Tabla 10, los rangos de valores que se tomarán en cuenta para el desarrollo del cultivo, con el objetivo de estandarizar las condiciones de crecimiento y asegurar la viabilidad del Forraje Verde Hidropónico, el desarrollo del cultivo se regirá bajo un control de los rangos óptimos ambientales identificados en la literatura técnica. Específicamente, se mantendrá una temperatura ambiente de entre 16 y 22 °C y una humedad relativa controlada en el intervalo de 60 a 80 %, factores determinantes para prevenir el estrés térmico y la proliferación de agentes patógenos. Asimismo, se garantizará un aporte lumínico mediante una luminosidad de 2,000 a 3,000 lux, niveles necesarios para promover una fotosíntesis eficiente y la correcta elongación de las plántulas durante el ciclo de producción.

#### **4.7. Etapa de evaluación de resultados**

Esta fase comprende el análisis sistemático de los datos recolectados durante el ciclo fenológico, con el propósito de determinar la eficiencia del sistema hidropónico bajo los rangos

ambientales controlados. La evaluación se centrará en la cuantificación de la biomasa obtenida, analizando la relación entre el peso de la semilla sembrada y el peso fresco del forraje cosechado para establecer el índice de conversión. Asimismo, se contrastarán los niveles de temperatura (16-22 °C), humedad (60-80 %) y luminosidad (2000-3000 lux) registrados con variables de respuesta como la altura de la plántula y su vigorosidad cromática. Este proceso permitirá validar si las condiciones ambientales impuestas favorecieron una tasa de crecimiento óptima y si el producto final cumple con los estándares de calidad necesarios para la alimentación animal.

#### ***4.7.1 Análisis de cultivo FVH tradicional***

En esta etapa se evalúa el rendimiento del forraje verde hidropónico bajo un sistema de gestión convencional, donde el monitoreo de las variables ambientales no podrá ser controladas. El análisis se enfoca en determinar cómo la estabilidad o fluctuación de los factores climáticos influye en el ciclo biológico del cultivo. Se documentará el comportamiento fenológico observando si los factores ambientales indoor se encuentran dentro de los límites óptimos establecidos, o si la falta de un control dinámico de riego generó zonas de estrés hídrico o térmico.

El proceso o ciclo de sembrado del sistema tradicional se inició con una unidad de producción compuesta por 10 bandejas, en las cuales se depositó una carga de 1 kg de semilla de cebada por bandeja. Este montaje buscó establecer un patrón de referencia sobre el rendimiento del forraje bajo métodos de gestión manual, donde el control de las condiciones de crecimiento dependió exclusivamente de la intervención humana y de horarios fijos. Durante este proceso, se observó que la densidad de siembra y la disposición del grano que son determinantes.

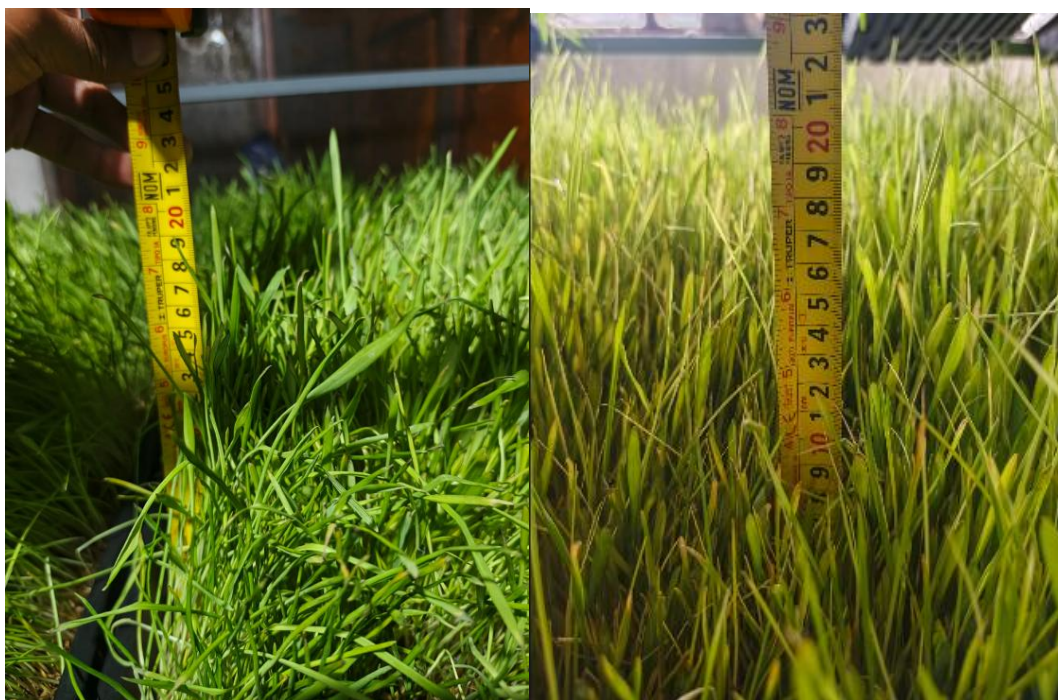
El régimen de riego se ejecutó de forma manual, siguiendo una programación horaria estricta diseñada para cubrir las etapas críticas del ciclo: la pregerminación o remojo, la fase

de germinación en oscuridad y el posterior desarrollo vegetativo. A pesar del rigor en los horarios, este método tradicional mostró ser altamente vulnerable a la subjetividad del operador. La ausencia de mecanismos de monitoreo en tiempo real impidió ajustar el riego frente a variaciones imprevistas, lo que resultó en periodos de estrés hídrico intermitente que afectaron el ritmo metabólico natural de la plántula en sus días de mayor demanda nutricional.

Finalmente, el análisis reveló que el cultivo en ambientes no controlados enfrenta riesgos biológicos y fisiológicos críticos. El exceso de agua, derivado de un riego manual impreciso o un drenaje deficiente, generó condiciones de anoxia radicular, facilitando la aparición de hongos y pudrición en la base del forraje. Por el contrario, la falta de agua o la baja humedad ambiental provocaron la deshidratación de los ápices foliares. Asimismo, la escasez de luz o una luminosidad inferior a los 2,000 lux requeridos provocó fenómenos de etiolación, donde las plantas se desarrollaron con tallos alargados, débiles y con una coloración pálida debido a la baja síntesis de clorofila, comprometiendo así la calidad nutricional y la biomasa total obtenida al final del ciclo.

#### **4.7.1.1 Altura del forraje**

La medición de la altura de la plántula constituye uno de los indicadores fenológicos más relevantes para determinar el vigor y el ritmo de crecimiento del cultivo bajo condiciones tradicionales. Durante el ciclo de producción, se realizaron mediciones utilizando una escala en centímetros, tomando como punto de referencia la base de la semilla hasta el ápice de la hoja más externa, como se observa en la Figura 82. En este sistema manual, la altura del forraje mostró una progresión heterogénea debido a la desigual distribución del riego y la variabilidad en la incidencia lumínica sobre las 10 bandejas.

**Figura 82***Longitud de FVH cumplido el ciclo (día 12)*

Fuente: Autoría

La evaluación de la altura del cultivo en el sistema tradicional se realizó mediante el uso de una cinta métrica flexómetro, permitiendo constatar el desarrollo longitudinal de la cebada al finalizar el ciclo (día 12). Los resultados obtenidos arrojaron un promedio de altura de entre 18 y 20 cm como máximo, alcanzando el punto óptimo de cosecha antes de que la plántula iniciara el proceso de lignificación. Aunque este valor se sitúa dentro de los estándares esperados para el forraje verde hidropónico, el análisis visual también permite identificar una densidad foliar variable, atribuida a la desigualdad de los factores ambientales.

**4.7.1.2 Coloración del forraje**

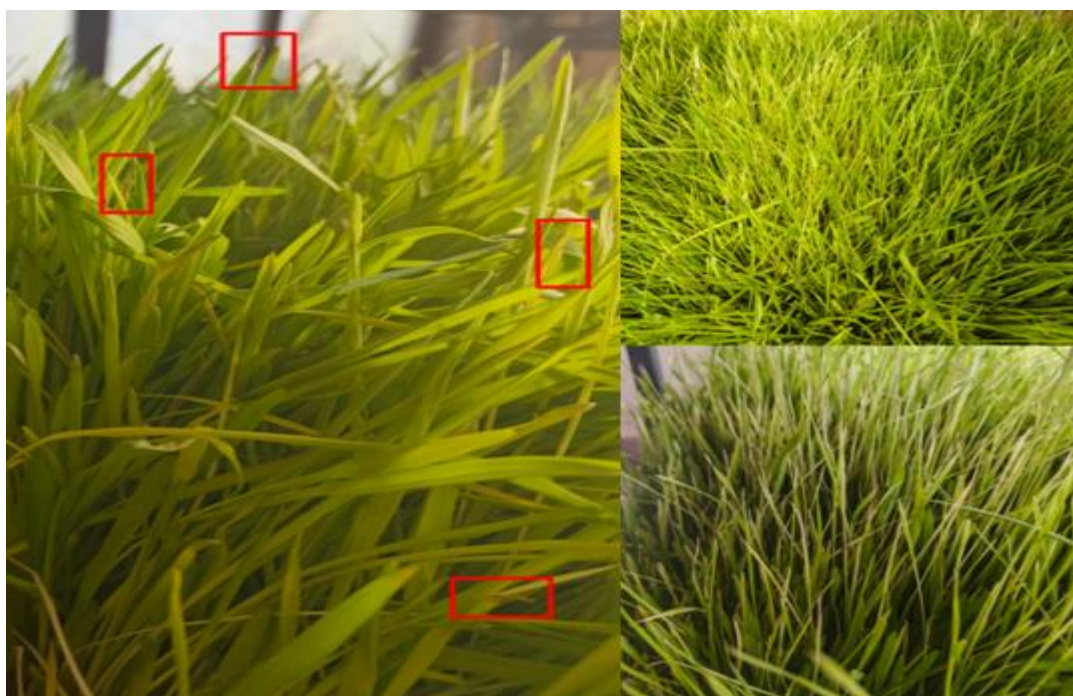
Al realizar un análisis del cultivo tradicional, se identificaron variaciones cromáticas significativas que evidencian la inestabilidad del ambiente no controlado. Mientras que en las etapas iniciales o en zonas de mejor hidratación se observa un verde característico, en la Figura 83 se evidencia una coloración notablemente más amarillenta y pálida. Esta pérdida de pigmentación es un indicativo de estrés fisiológico, probablemente derivado de una deficiencia

en la síntesis de clorofila o un desequilibrio en la disposición hídrica. La tonalidad amarillenta sugiere que la plántula, bajo el sistema de riego manual y horarios fijos, pudo experimentar periodos de saturación o falta de nutrientes disponibles en el momento de mayor demanda metabólica.

Asimismo, en la Figura 83 se observa que las puntas de las hojas presentan una apariencia reseca y necrótica, un síntoma clásico de baja humedad ambiental o estrés hídrico localizado.

### **Figura 83**

*Coloración del FVH cumplido el ciclo (día 12)*



Fuente: Autoría

En un entorno tradicional donde la humedad ambiental no se mantiene de forma constante entre el 60 y 80%, la tasa de transpiración de la plántula supera su capacidad de absorción, provocando el marchitamiento de los ápices foliares. Este contraste confirma que la falta de un monitoreo preciso y automatizado en el sistema convencional no solo afecta la estética del forraje, sino que compromete abultamiento y la calidad biológica del forraje,

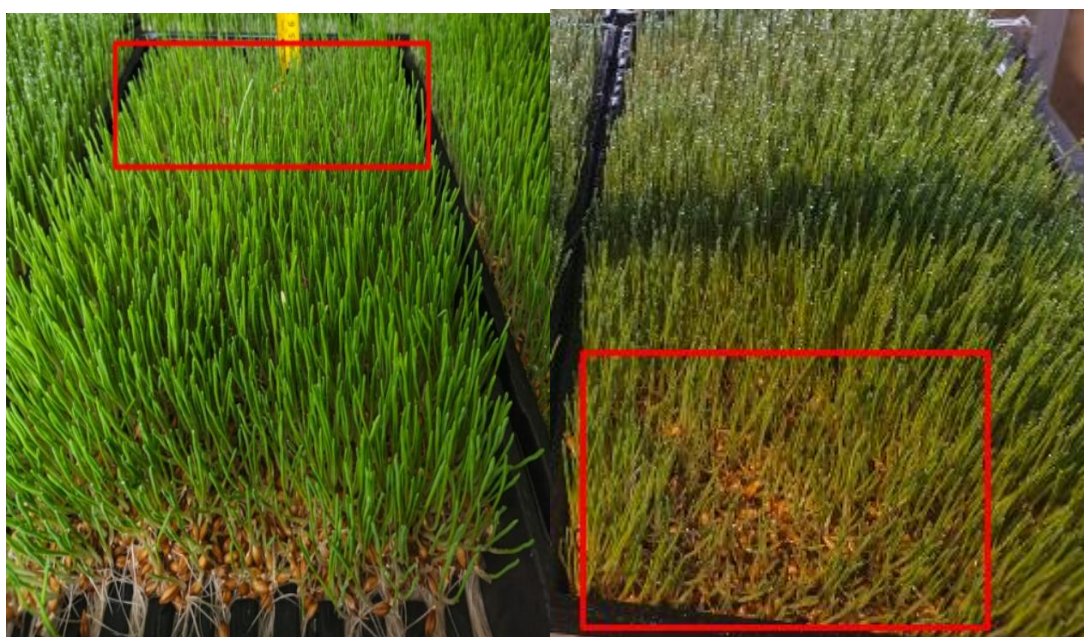
resultando en un producto con menor vigor en comparación con los estándares óptimos de producción.

#### 4.7.1.3 Frondosidad

La evaluación de la frondosidad en el sistema tradicional permite determinar la densidad de la biomasa foliar y la homogeneidad del crecimiento en la superficie de la bandeja. Como se observa en la Figura 84 de la evidencia fotográfica, el cultivo presenta una desigualdad marcada en la distribución del follaje. Mientras que algunas zonas exhiben un agrupamiento denso y vigoroso, otras áreas muestran una menor densidad de plántulas y espacios donde el crecimiento es notablemente más raro.

#### Figura 84

*Frondosidad del tapete de FVH*



Fuente: Autoría

Esta disparidad en la frondosidad se atribuye primordialmente a dos factores derivados de un ambiente no controlado. En primer lugar, la irregularidad en el riego manual genera zonas de mayor saturación hídrica frente a otras que experimentan una humedad deficiente, provocando que las plántulas en las áreas menos favorecidas no logren el mismo vigor vegetativo. En segundo lugar, la desigualdad en la incidencia lumínica sobre las bandejas

genera un crecimiento asimétrico; las plántulas que no reciben el rango óptimo de 2,000 a 3,000 lux presentan una estructura menos poblada. Esta competencia por recursos (luz y agua) en un entorno manual resulta en una frondosidad parcial, lo que disminuye el rendimiento total por bandeja y evidencia la necesidad de un sistema de monitoreo que garantice condiciones idénticas en cada centímetro cuadrado del cultivo.

#### 4.7.1.4 Peso del FVH

En este apartado se realiza el análisis del rendimiento físico para el cultivo bajo manejo convencional revela una limitación intrínseca en la capacidad de conversión de biomasa de la semilla. En la Figura 85 se puede observar que al finalizar el ciclo de producción (día 12), las mediciones experimentales registraron pesos de 4.30 kg y 4.35 kg por bandeja, como se evidencia en el registro fotográfico de la Figura 85 de la báscula de precisión, dando estos valores un promedio de 4.45 kg, situándose por debajo de un desempeño adecuado.

**Figura 85**  
*Peso del FVH tradicional*



Fuente: Autoría

Esta restricción en el peso final es una consecuencia directa de la variabilidad en el suministro de recursos y la falta de un control ambiental estricto. En el modelo tradicional, la ausencia de una hidratación técnica programada y la exposición a fluctuaciones térmicas durante los 12 días del ciclo impiden que la plántula mantenga un ritmo metabólico óptimo. Como resultado, la acumulación de materia verde se ve interrumpida por periodos de estrés, lo que deriva en una eficiencia de apenas el 60 %. En conclusión, el peso promedio de 4.45 kg en el forraje tradicional confirma que, sin la asistencia de una arquitectura IoT, el cultivo no logra capitalizar el máximo potencial biológico de la semilla.

#### ***4.7.2 Análisis de cultivo FVH con arquitectura IoT***

En esta etapa se evalúa el rendimiento del FVH bajo un sistema de gestión automatizada mediante el Internet de las Cosas (IoT), donde el monitoreo y control de las variables ambientales se realiza en tiempo real a través de sensores y actuadores. A diferencia del método tradicional, este análisis se centra en la capacidad del sistema para mantener los parámetros críticos de temperatura (16-22 °C), humedad ambiental (60-80 %) y luminosidad (2000 a 3000 lux) de forma constante, eliminando la variabilidad intrínseca del factor humano. La integración de tecnología IoT permite una respuesta dinámica ante cualquier fluctuación del entorno, garantizando que el microclima dentro del área de cultivo permanezca dentro de los rangos óptimos establecidos durante las 24 horas del día.

El análisis del cultivo bajo IoT se fundamenta en la optimización de los recursos hídricos y lumínicos. Mediante la programación de ciclos de riego precisos y la activación automatizada de iluminación artificial cuando los niveles descienden de los 2,000 lux, se logra un desarrollo fenológico acelerado y uniforme en las 10 bandejas experimentales. En este sistema, la recopilación de datos que permite identificar patrones de crecimiento y minimizando los riesgos de estrés hídrico o térmico.

Finalmente, se evalúa la resiliencia del sistema IoT frente a las condiciones externas. Mientras que el cultivo tradicional mostró vulnerabilidad ante la falta de luz o el exceso de agua, el sistema automatizado compensa estas deficiencias mediante nebulizadores y luminarias LED controladas por sensores. Este análisis permitirá validar la hipótesis de que la implementación de tecnologías inteligentes en el FVH reduce drásticamente la aparición de patógenos y maximiza el índice de conversión de la semilla, transformando un proceso artesanal en una unidad de producción eficiente y escalable. El objetivo de este apartado es demostrar cómo la implementación de tecnologías en el cultivo no solo aumenta la biomasa final, sino que estandariza la calidad nutricional y sanitaria del forraje.

Para mantener la coherencia metodológica y permitir una comparación válida entre ambos sistemas, el montaje experimental del cultivo asistido por IoT conservó las mismas dimensiones que el método tradicional. En este sentido, se utilizaron 10 bandejas de producción, manteniendo una densidad de siembra idéntica de 1 kg de semilla por cada bandeja. Esta estandarización en el uso de insumos y espacio físico asegura que las diferencias observadas en el rendimiento, la altura y la calidad sanitaria se deban exclusivamente a la precisión en el control de las variables ambientales mediante sensores y actuadores, y no a una variación en la carga inicial del cultivo.

#### **4.7.2.1 Altura del forraje**

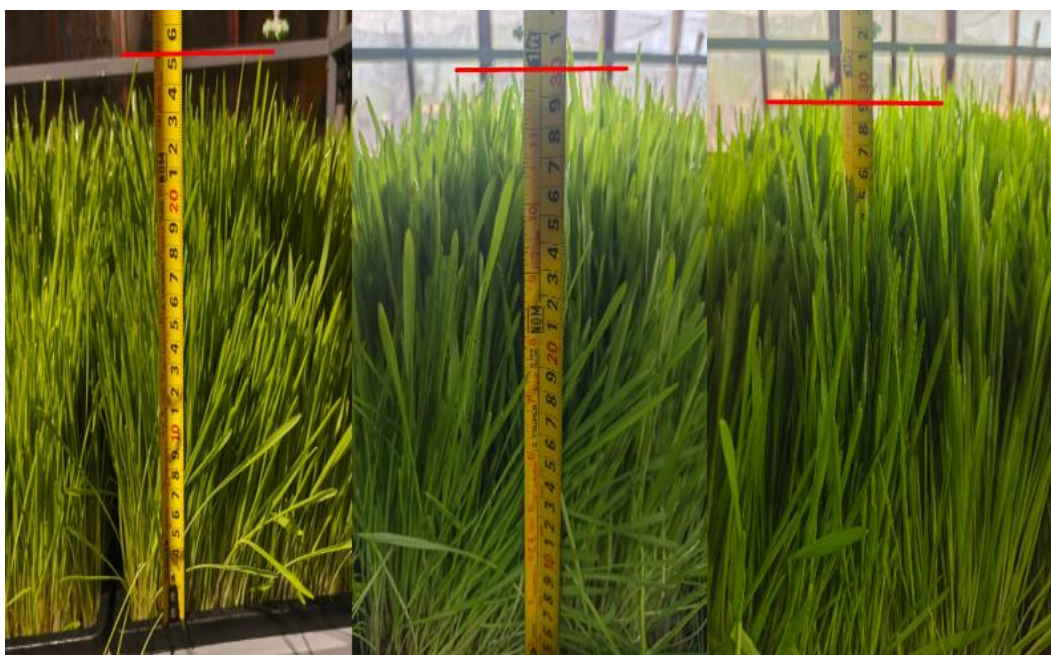
El análisis del crecimiento longitudinal bajo el sistema asistido por IoT demostró una optimización significativa en la eficiencia del desarrollo fenológico de la semilla. A diferencia del método tradicional, donde la altura máxima se estancó en los 20 cm, el monitoreo constante de las variables ambientales permitió alcanzar una altura de entre 26 y 30 cm como máximo al concluir el mismo ciclo de producción (12 días). Este incremento, que representa una mejora de entre el 30% y 50% en la longitud de la plántula es una prueba directa de que el

mantenimiento de la temperatura (16-22 °C) y la humedad (60-80 %) en niveles óptimos ininterrumpidos maximiza el alargamiento celular y la actividad metabólica del cultivo.

Como se observa en la Figura 86 del registro fotográfico del sistema IoT la altura no solo es superior en términos absolutos, sino que presenta una homogeneidad excepcional en toda la extensión de las 10 bandejas.

### **Figura 86**

*Longitud del FVH con el sistema IoT*



Fuente: Autoría

Mientras que en el sistema tradicional se observaban variaciones por zonas de riego desigual, la automatización del riego por microaspersión y la compensación lumínica de 2,000 a 3,000 lux garantizaron que todas las plántulas tuvieran acceso equitativo a los recursos. Esta uniformidad en la altura de 26-30 cm asegura un tapiz de forraje más estandarizado, facilitando una cosecha uniforme y garantizando que el índice de conversión de la semilla a biomasa aérea alcance su potencial máximo sin signos de etiolación o debilidad estructural.

#### **4.7.2.2 Coloración del forraje**

La evaluación del aspecto cromático bajo el sistema IoT revela una mejora cualitativa sustancial en comparación con el método tradicional. Como se aprecia en la Figura 87 de los

registros visuales del sistema automatizado, el forraje exhibe una coloración verde esmeralda intensa y homogénea en la totalidad de la biomasa aérea. Esta tonalidad es el resultado directo de un control de precisión sobre la luminosidad, manteniendo el rango de 2,000 a 3,000 lux de manera constante, lo que optimiza la biosíntesis de clorofila y evita los gradientes de color que se observaban anteriormente por el auto-sombreado o la falta de luz uniforme.

**Figura 87**

*Coloración del FVH con el sistema IoT*



Fuente: Autoría

Un aspecto crítico diferenciador en este análisis es la ausencia total de amarillamiento o puntas reseca. Gracias a que los sensores de humedad ambiental activan los actuadores para mantener un rango estricto del **60 al 80 %**, se logra que la planta respire de forma equilibrada, permitiendo que el agua llegue con fuerza hasta las puntas de las hojas y se mantengan firmes y bien hidratadas. La consistencia en el color no solo indica un estado fitosanitario óptimo y la ausencia de estrés hídrico, sino que también asegura que el forraje posee una concentración máxima de nutrientes, pigmentos naturales y materia orgánica, cumpliendo con los estándares de calidad más exigentes para la suplementación animal.

### 4.7.2.3 Frondosidad

La evaluación de la frondosidad en el sistema con arquitectura IoT muestra una mejora drástica en la densidad y uniformidad del cultivo en comparación con el método tradicional. Como se puede observar en la Figura 88, el forraje ha desarrollado un tapiz vegetal sumamente denso y compacto, cubriendo la totalidad de las bandejas sin dejar espacios vacíos o zonas con poco crecimiento. Esta abundancia de follaje es el resultado de un ambiente controlado donde cada semilla recibió exactamente la misma cantidad de recursos, permitiendo que todas las plántulas crecieran con la misma fuerza y al mismo tiempo.

#### **Figura 88**

*Frondosidad del FVH con el sistema IoT*



Fuente: Autoría

A diferencia del sistema manual, donde aparecían "parches" o huecos debido a un riego desigual, el uso de sensores permitió que el agua y la humedad se distribuyeran de forma perfecta en cada rincón. Esto evitó que algunas semillas se secaran y otras se ahogaran, logrando que el cultivo crezca como una alfombra verde totalmente uniforme. Esta frondosidad no solo mejora el aspecto visual del forraje, sino que garantiza que se aproveche al máximo el

espacio de las bandejas, lo que se traduce directamente en una mayor cantidad de alimento producido al final del ciclo.

#### 4.7.2.4 Peso del FVH con arquitectura IoT

El éxito definitivo del sistema con tecnología IoT se manifiesta en la capacidad de maximizar la conversión de semilla a biomasa, superando ampliamente los rendimientos obtenidos de forma convencional. Mientras que en el cultivo tradicional el peso promedio por bandeja se estimó en apenas 4.45 kg, la implementación del sistema automatizado permitió alcanzar un peso de 5.70 kg por bandeja como se muestra en la Figura 89. Este incremento de 1.25 kg por unidad no es una cifra menor; representa un aumento del 28.1 % en la productividad total, demostrando que el control inteligente del entorno permite extraer el máximo potencial biológico de la semilla de cebada.

**Figura 89**  
*Peso final del FVH con Arquitectura IoT*



Fuente: Autoría

La eficacia del sistema IoT reside en su capacidad para mantener un equilibrio perfecto entre la hidratación y la absorción de nutrientes sin desperdicio de recursos. En el método tradicional, el peso se ve afectado por la evaporación no controlada y un desarrollo radicular inconsistente; sin embargo, con la automatización de la luminosidad, humedad y la temperatura, se garantiza que cada plántula acumule la mayor cantidad de agua y materia orgánica posible. Como se observa en la Figura 89 del pesaje digital, el sistema IoT logra un bloque de forraje mucho más denso y pesado, lo que se traduce en una mayor eficiencia hídrica: cada gota de agua gestionada por los sensores se convierte efectivamente en peso fresco aprovechable.

Finalmente, este aumento en el pesaje final valida la inversión tecnológica como una solución altamente rentable para la producción de forraje. Lograr 5.70 kg de alimento a partir de solo 1 kg de semilla en un ciclo tan corto es el resultado directo de eliminar el error humano y el estrés ambiental. La consistencia en el peso entre todas las bandejas bajo el sistema IoT asegura una oferta constante de alimento de alta calidad, demostrando que la agricultura de precisión es el camino necesario para transformar la producción de FVH en un proceso industrializado, eficiente y con resultados garantizados que superan cualquier método de cultivo tradicional.

#### **4.8 Comparativa del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT**

La evaluación comparativa entre el cultivo de Forraje Verde Hidropónico (FVH) tradicional y el sistema optimizado con tecnología IoT revela una brecha tecnológica significativa en términos de eficiencia, calidad biológica y rentabilidad. Mientras que el método tradicional se encuentra sujeto a la alta variabilidad del factor humano y las condiciones climáticas reducidas, el sistema IoT establece un entorno de producción industrializado. La principal diferencia radica en la estabilidad del microclima; mientras que en el sistema manual se registraron picos de estrés térmico e hídrico que afectaron el metabolismo del forraje, el

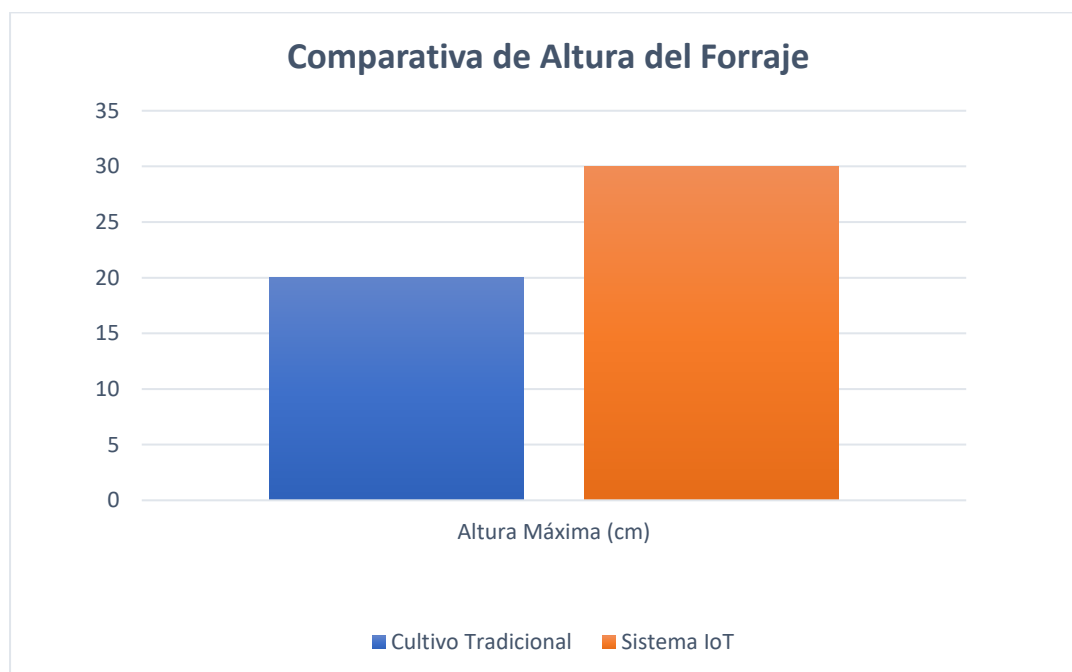
sistema automatizado mantuvo los rangos de luminosidad entre 2000 y 3000 lux, temperatura entre 16 y 22 °C y la humedad entre 60 y 80 % de manera ininterrumpida. Esta constancia ambiental es la que permite que el entorno IoT transforme la semilla en biomasa de forma acelerada, eliminando los tiempos muertos metabólicos que ocurren en ambientes no controlados.

#### ***4.8.1 Comparativa de Altura del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT***

El análisis comparativo de los resultados finales referentes a la altura del forraje, como se muestran en la Figura 90 representados en las gráficas de barras, demuestra de manera irrefutable la superioridad del sistema supervisado mediante IoT sobre el método tradicional. En cuanto a la altura máxima, el sistema automatizado logró un estándar de 30 cm, superando significativamente los 20 cm del cultivo convencional. Este resultado favorable no es fortuito; es la consecuencia directa de mantener un microclima optimizado y constante mediante sensores y actuadores. Mientras que en el sistema tradicional la planta sufre periodos de estrés que frenan su crecimiento, la tecnología IoT garantiza que la cebada se mantenga en su zona de máximo confort metabólico las 24 horas del día, permitiendo un desarrollo longitudinal más agresivo y uniforme.

**Figura 90**

*Comparativa de altura del forraje entre cultivo tradicional y el sistema IoT*



Fuente: Autoría

Esta ventaja competitiva no es solo un número, es la prueba de que el control de precisión sobre la humedad y la temperatura maximiza la conversión de cada semilla en alimento útil. En el sistema tradicional, la planta gasta energía sobreviviendo a los cambios del entorno; en cambio, en el sistema optimizado, toda la energía se canaliza hacia la acumulación de biomasa.

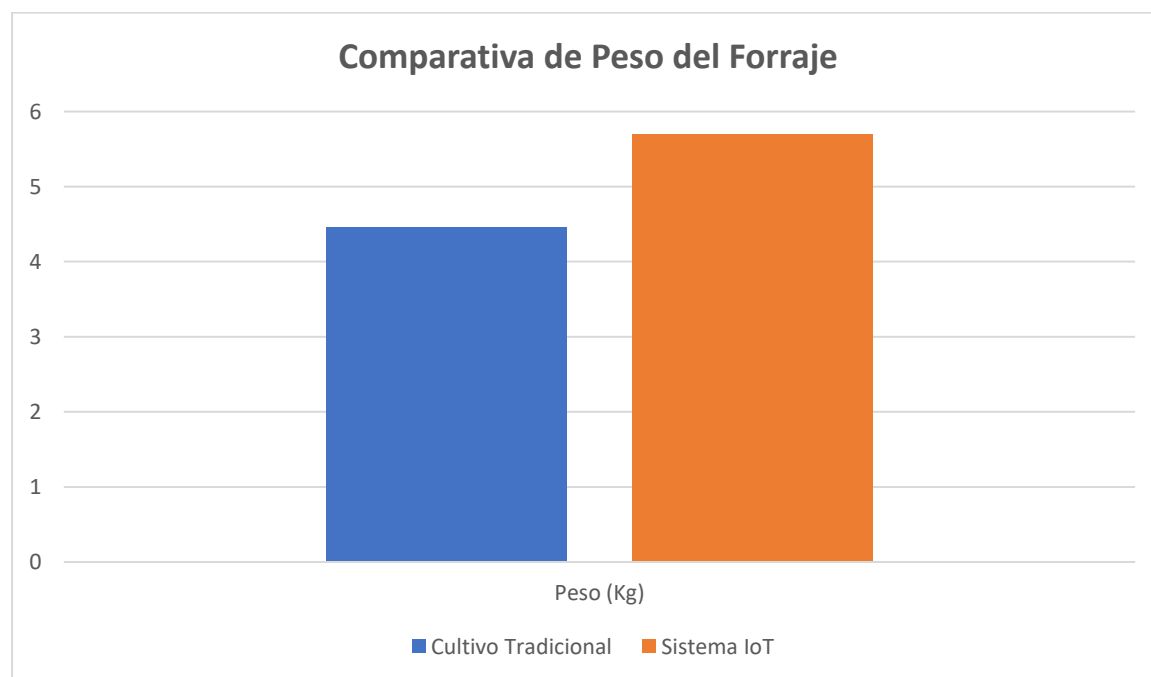
#### ***4.8.2 Comparativa del Peso del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT***

En la Figura 91 se evidencia el análisis del rendimiento final en términos de biomasa producida confirma una superioridad operativa determinante del sistema asistido por IoT, alcanzando un peso total de 5.70 kg por bandeja frente a los 4.45 kg obtenidos mediante el método tradicional. Esta diferencia de 1.25 kg adicionales por unidad de producción representa un incremento del 28.1% en la productividad neta, validando la eficiencia del sistema automatizado para maximizar la conversión de la semilla en alimento aprovechable.

Este éxito se basa en la acumulación de peso que se atribuye a la eliminación de las deficiencias propias del manejo manual. Mientras que en el cultivo tradicional el peso se ve limitado por periodos de estrés hídrico o saturación desigual de las raíces, el sistema inteligente garantiza una hidratación técnica de precisión. La causa fundamental de este resultado favorable es la capacidad de los sensores para mantener un equilibrio hídrico constante, lo que permite que el tapiz radicular absorba nutrientes sin interrupciones metabólicas. Al integrar tecnología de monitoreo en tiempo real, se logra transformar un proceso artesanal en una unidad de producción industrializada y predecible, que no solo entrega mayor volumen de forraje, sino que garantiza la rentabilidad y seguridad alimentaria al obtener el máximo potencial productivo de cada kilogramo de semilla sembrado.

### Figura 91

*Comparativa de peso del forraje entre cultivo tradicional y el sistema IoT*



Fuente: Autoría

Lograr 1.25 kg adicionales por bandeja con la misma inversión inicial de semilla (1 kg) posiciona a este proyecto como una solución altamente rentable y escalable, garantizando un

flujo constante de forraje de alta densidad que el método artesanal simplemente no puede igualar.

#### ***4.8.3 Comparativa de Rendimiento del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT***

El análisis del Rendimiento (Eficiencia) porcentual constituye la prueba definitiva de la superioridad operativa del proyecto, situando al Sistema con IoT en un nivel de desempeño del 100% frente a un 60% obtenido por el método tradicional. Esta brecha del 40% en la eficiencia productiva no solo cuantifica la mejora en volumen y altura, sino que traduce el éxito técnico en una ventaja competitiva de alto impacto para la producción de forraje verde hidropónico.

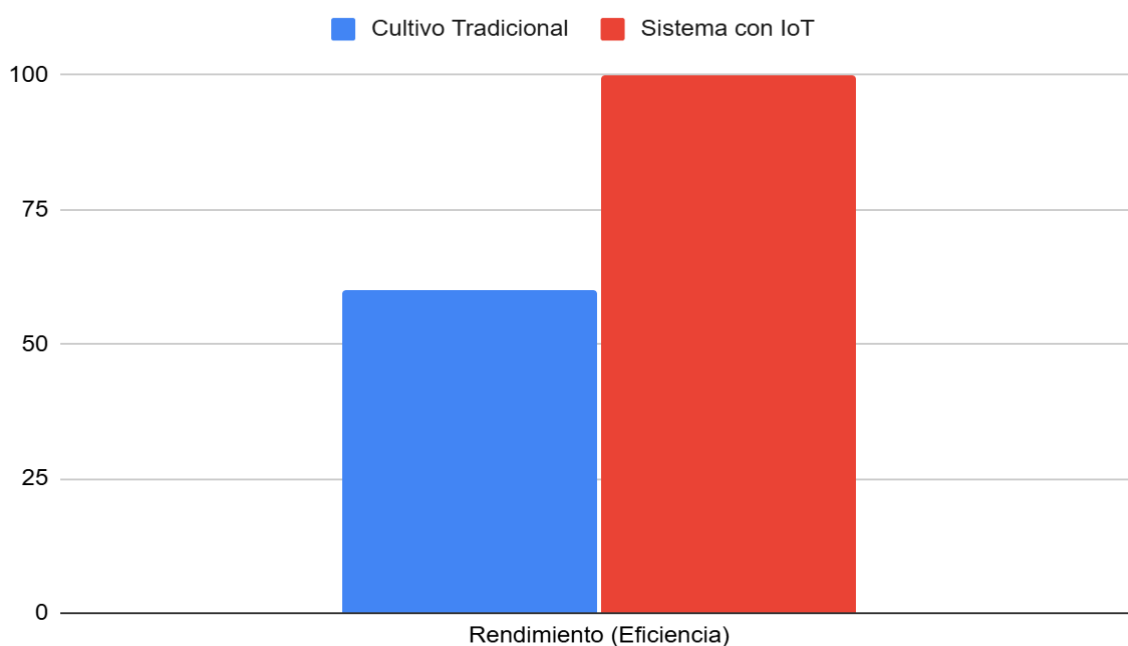
Para obtener los valores presentados en la Figura 92 de rendimiento y eficiencia, intervienen diversas variables críticas que fueron monitoreadas y ajustadas con precisión por el sistema inteligente. Los parámetros fundamentales que determinan el éxito del sistema IoT sobre el tradicional incluyen el control estricto de la temperatura (entre 16-22 °C) y la humedad ambiental (optimizada entre el 60-80 %), factores que evitan el estrés metabólico y aseguran una hidratación constante. A estos se suma la gestión de la intensidad lumínica, proporcionada por el panel LED de espectro completo de 2,000 a 3,000 lux, que garantiza una fotosíntesis ininterrumpida y uniforme en todas las bandejas. La interacción de estos datos recolectados por los sensores permite que el sistema tome decisiones en tiempo real sobre el riego y la iluminación, lo que resulta en una tasa de conversión superior que se traduce en los 5.70 kg de peso y los 30 cm de altura que fundamentan el 100 % de eficiencia registrado.

Los factores determinantes que impulsaron este rendimiento máximo en el sistema controlado se centran en la eliminación del error humano y la mitigación de factores ambientales adversos. Mientras que el cultivo tradicional operó con una eficiencia limitada debido a la falta de precisión en el suministro de recursos, el sistema IoT optimizó cada variable crítica como luz, temperatura y humedad mediante una supervisión inteligente 24/7. Esta

gestión automatizada aseguró que el ciclo biológico del cultivo no se viera interrumpido, logrando un aprovechamiento total de los insumos y del tiempo de cultivo. En conclusión, estos resultados demuestran que la integración de tecnología IoT transforma radicalmente la productividad del sector, ofreciendo un sistema de alto rendimiento garantizado que maximiza la rentabilidad y asegura una oferta de alimento superior en calidad y cantidad.

### Figura 92

*Comparativa de eficiencia del forraje entre cultivo tradicional y el sistema IoT*



Fuente: Autoría

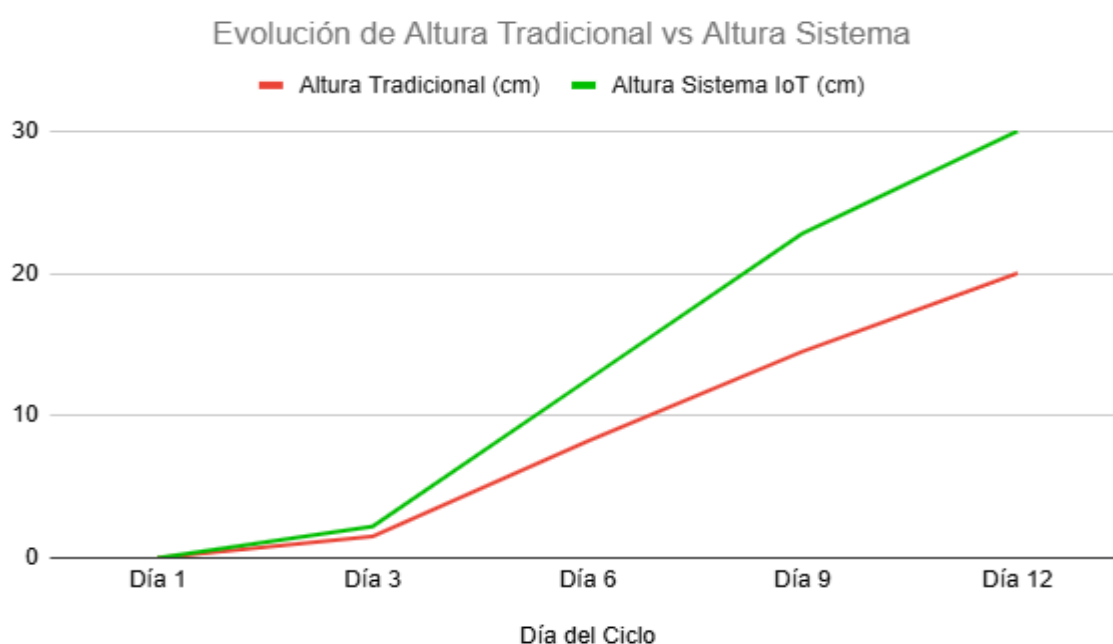
#### ***4.8.4 Evolución de Altura del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT***

El análisis del crecimiento longitudinal revela una ventaja competitiva determinante al emplear el sistema supervisado mediante IoT, logrando una altura máxima de 30 cm frente a los 20 cm alcanzados en el cultivo tradicional. Como se observa en la Figura 93 la progresión de los datos, durante los primeros tres días de germinación la diferencia es sutil; sin embargo, a partir del día 6, el control preciso de las variables ambientales permite que el sistema inteligente dispare el crecimiento foliar, manteniendo una brecha de superioridad constante hasta la cosecha.

Mientras que el método manual muestra una curva de crecimiento más aplanada debido a las fluctuaciones en el riego y la temperatura, la automatización garantiza que la plántula de cebada se mantenga en su punto de máxima eficiencia metabólica, logrando un forraje un 50% más alto en el mismo periodo de tiempo. Esta optimización no solo representa un mayor volumen de biomasa aérea, sino que valida la implementación tecnológica como la solución definitiva para estandarizar la producción y maximizar el rendimiento biológico del cultivo.

### Figura 93

*Comparativa de crecimiento del forraje entre cultivo tradicional y el sistema IoT*



Fuente: Autoría

Este éxito en la dinámica de tiempo-crecimiento es la consecuencia directa de la eliminación de los "tiempos muertos" metabólicos que ocurren en el cultivo tradicional. La causa fundamental de esta aceleración es la supervisión constante de las variables ambientales; el sistema **IoT** compensa instantáneamente cualquier fluctuación lumínica o térmica, garantizando que la plántula nunca detenga su desarrollo por estrés. Esta estabilidad permite que el forraje no solo sea un **50% más alto** al final del ciclo, sino que presente una estructura más robusta y uniforme en todas las bandejas, como se evidencia en el registro físico con flexómetro. En conclusión, la implementación tecnológica "vende" un sistema de alta precisión

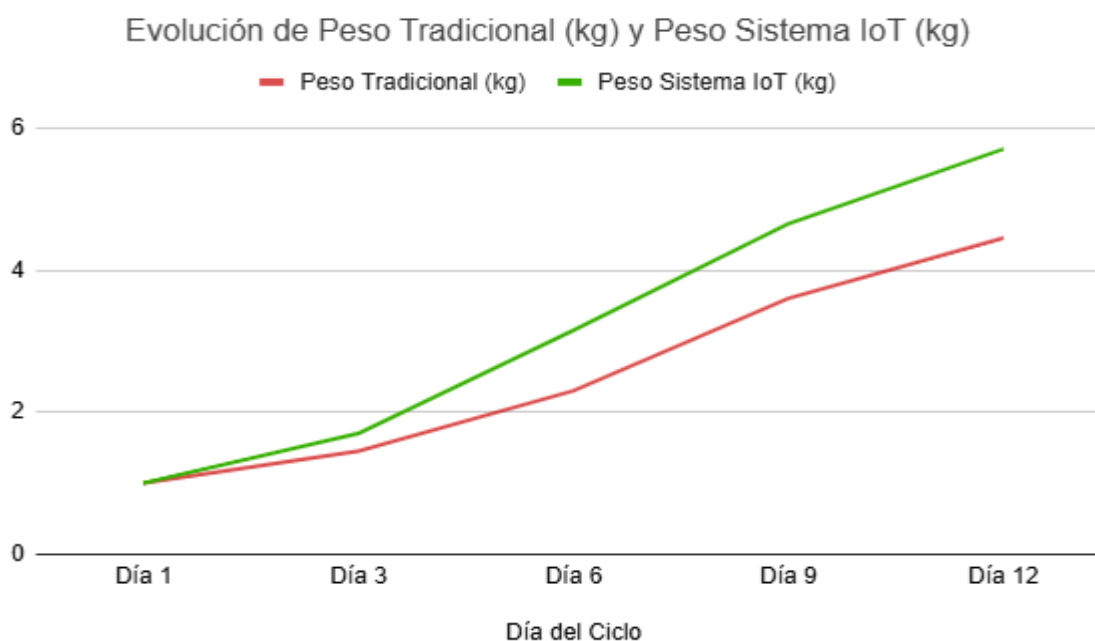
que optimiza los tiempos biológicos de la planta, asegurando una producción de biomasa aérea máxima que el manejo artesanal no puede replicar en el mismo periodo.

#### ***4.8.4 Evolución de Peso del cultivo tradicional vs Arquitectura IoT***

El análisis del peso acumulado a lo largo del ciclo de producción confirma la superioridad tecnológica del sistema automatizado frente al manejo convencional. Como se evidencia en la Figura 94 de comparación de peso, el sistema asistido por IoT genera una curva de crecimiento mucho más pronunciada y eficiente.

Mientras que el cultivo tradicional inicia con una ganancia de peso lenta debido a la irregularidad en la hidratación, el sistema inteligente acelera el desarrollo radicular y la absorción de agua desde los primeros días. Al llegar a la cosecha, la diferencia es contundente: el sistema IoT logra un peso total de 5.70 kg, superando en un 28.1% el rendimiento del método tradicional, que apenas alcanza los 4.45 kg

Figura 94  
*Comparativa de cantidad de biomasa del forraje entre cultivo tradicional y el sistema IoT*



Fuente: Autoría

Esta progresión favorable es el resultado directo de la estabilidad de los parámetros ambientales y la precisión del riego que el sistema IoT garantiza. En el cultivo tradicional, las variaciones en la humedad y la temperatura generan lapsos de inactividad biológica que limitan el peso final. En contraste, la tecnología implementada elimina estas barreras, permitiendo que la plántula absorba agua y nutrientes de manera ininterrumpida las 24 horas del día. Esta optimización posiciona al sistema como una herramienta rentable para el productor moderno, ya que no solo incrementa la producción en un 50%, sino que asegura que cada día del ciclo se traduzca en una ganancia de biomasa real, maximizando el rendimiento de la inversión inicial en semilla.

En términos de desarrollo fenológico, la superioridad del IoT es contundente. La altura máxima alcanzada por el forraje bajo control digital (26 a 30 cm) superó en un 50% al promedio del sistema tradicional (18-20 cm), lo cual se traduce en un aprovechamiento foliar mucho más agresivo. No obstante, la ventaja no es solo cuantitativa, sino cualitativa: el análisis de las muestras demostró que el sistema IoT erradica problemas comunes del cultivo manual como la coloración amarillenta y las puntas reseca. Al garantizar que el agua llegue correctamente a los ápices foliares mediante una hidratación equilibrada, el sistema inteligente produce un forraje con un verde esmeralda uniforme y una turgencia superior, lo que garantiza una mayor concentración de nutrientes y palatabilidad para el ganado.

Finalmente, al analizar la eficiencia de conversión y el peso final, el sistema IoT se posiciona como una opción viable para una producción a escala y de alta calidad. La diferencia de peso 5.70 kg frente a los 4.45 kg del sistema tradicional representa una ganancia neta de 1.25 kg por cada bandeja utilizando la misma cantidad de semilla 1kg. Este incremento del 28.1% en el rendimiento no solo optimiza el uso del insumo base, sino que reduce el costo operativo por kilo producido. En conclusión, la implementación de IoT convierte un proceso artesanal y riesgoso en una unidad de producción predictiva y eficiente, donde la tecnología

actúa como un escudo contra patógenos y deficiencias ambientales, garantizando resultados estables que el método tradicional simplemente no puede replicar.

#### **4.9 Costos del sistema**

En este apartado se detalla la estructura financiera requerida para la implementación del sistema de control y monitoreo automatizado para Forraje Verde Hidropónico (FVH). El análisis de costos se ha desglosado estratégicamente para diferenciar la inversión en componentes electrónicos, la adecuación de la infraestructura física y el valor del desarrollo intelectual y de software. Es fundamental entender que este presupuesto no representa un gasto operativo convencional, sino una inversión en tecnología de precisión diseñada para maximizar la rentabilidad del cultivo.

##### ***4.9.1 Costos de Hardware***

El hardware constituye la arquitectura sensorial y de control del proyecto, siendo el responsable de capturar los datos ambientales en tiempo real para la toma de decisiones automatizada. En este apartado se cuantifica la inversión en dispositivos semiconductores, sensores de precisión y actuadores que integran el nodo de control IoT. Cada componente ha sido seleccionado bajo criterios de robustez y compatibilidad, asegurando que el monitoreo de la temperatura, humedad y luminosidad sea constante y preciso.

**Tabla 11**  
*Costos de Hardware*

<b>EQUIPOS</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (USD)</b>	<b>SUBTOTAL (USD)</b>
Esp32s 38 Pines	2	8.65	17.30
RASPBERRY Pi4 / 4GB	1	121.74	121.74
Modulo Sensor Temperatura y Humedad Dht22	2	5.64	11.29
Modulo Sensor Intensidad Luz I2c Bh1750	2	3.65	7.30

Modulo Rele 5v 1 Canal Con Led	2	2.39	4.28
Indicadores			
Ventilador 5V 3X3X1cm 3010	1	3.26	3.26
MEMORIA SANDISK 32GB MICROSD	1	8.26	8.26
Adaptador 5V 3A Fuente Cargador Tipo C	1	8.61	8.61
Lampara Led	1	75	75
		TOTAL	226

Fuente: Autoría

#### 4.9.2 Costos de Infraestructura

La infraestructura representa el soporte físico y el entorno controlado donde se desarrolla el ciclo biológico del forraje, abarcando desde la estructura de soporte hasta los sistemas de distribución hídrica y luminosa. En este apartado se cuantifica la inversión en materiales como la estantería metálica de alta resistencia, las bandejas de cultivo diseñadas para optimizar el drenaje y la red de microaspersión que garantiza la hidratación uniforme de la semilla.

**Tabla 12**  
*Costos de Infraestructura*

<b>INFRAESTRUCTURA</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (USD)</b>	<b>SUBTOTAL (USD)</b>
CONECTOR P/TANQUE 1"	1	6.40	6.41
VALVULA 1" R/H GRIS/AZUL PVC - 1 UNIVERSAL	2	3.64	7.28
ADAPTADOR M 32 X 1" PVC PN16 AM3	7	0.30	2.17
CODO 32 X 90	14	0.34	4.80

UNIVERSAL 1" PVC BL ROSCADA - M46	2	1.32	2.65
NEPLO 1" CORRIDO PLAST	2	0.40	0.80
BOMBA 1/2 HP PEDROLLO PKM60 1"X1" 110 V	1	65.95	65.95
VALVULA 1" BOLA HG	1	12.91	12.91
UNION 1 1/4" X 1" ROSC PLAST	2	1.57	3.15
FILTRO A 1 1/4" X 120 MESH ANILLOS C - FLE	1	13.87	13.87
TUBO EC 32MM X 6M 1,25MPa (181psi)	3	4.16	12.92
TEE 32 PVC PN16	4	0.46	3.15
ADAPTADOR M 32 X 1" PVC PN16 AM3	8	0.30	2.48
ADAPTADOR H 32 X 1" PVC PN16	4	0.38	1.55
ELECTROVALVULA 1" BERMAD 210 2W	4	25	100
BUSHING 1" M X 1/2"	4	0.35	1.40
ADAPTADOR 16 X 1/2"	8	0.91	7.28
TAPA 1/2" HEMBRA ROSC PLAST	4	0.20	0.80
MANGUERA 16 MM /2.5	10	0.15	1.57
NEBULIZADOR FOGGER COOLNET	8	2.43	19.50
MONTURA 32 X 3/4"	1	1.23	1.24
VALVULA AIRE 3/4" CINETICA	1	7.31	7.31
ARR MAC3 - ELECTRONIVEL T	1	15.94	15.95
CABLE # 3 X16 SUCRE FLEXIBLE	20	1.04	20.93

ARRANCADOR P. 1HP	1	136.57	136.57
ARR RELE 24 VAC SIMPLE	1	6.39	6.39
PEGA 1/16 DE GALON	1	8.64	8.64
TEFLON AZUL/BLANCO 1/2"	20	0.20	4
INSTALACION Y/O ASESORIA TECNICA	1	200	200
		Total	747.52

Fuente: Autoría

#### **4.9.3 Costos de Ingeniería**

Los costos de ingeniería comprenden la inversión en capital intelectual y técnico necesaria para la conceptualización, diseño y puesta en marcha del sistema automatizado. Este rubro abarca las horas-hombre dedicadas al diseño de los planos eléctrico, la lógica de control, el ensamblaje de los circuitos y la calibración de los sensores para asegurar que la lectura de variables como temperatura y humedad fuera exacta.

La construcción de la estructura presentó un costo total de 85 USD, con un tiempo estimado de ejecución de 5 horas, lo que corresponde a un costo promedio de 17 USD por hora. Por su parte, la instalación del sistema de riego tuvo un costo total de 200 USD, con una duración de 8 horas, equivalente a 25 USD por hora. Estos valores permiten justificar técnicamente la inversión realizada en la etapa de implementación física del sistema.

**Tabla 13**  
*Costos de Ingeniería*

<b>INFRAESTRUCTURA</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (USD)</b>	<b>SUBTOTAL (USD)</b>
<b>Estudio de campo, diseño, revisión e implementación de la infraestructura del sistema.</b>	1	85	85
<b>Instalación del sistema de riego</b>	1	200	200

<b>Documentación</b>	1	20	20
<b>Mantenimiento del sistema Indoor</b>	1	40	40
		<b>TOTAL</b>	<b>345</b>

Fuente: Autoría

#### ***4.9.4 Costos de Software***

El software representa el componente intangible que dota de inteligencia al sistema, permitiendo que los datos recolectados por el hardware se traduzcan en acciones automáticas y visualización remota. Como se puede evidenciar en la Tabla 14, este rubro contempla la programación del firmware en el microcontrolador, el desarrollo de los algoritmos de lógica de control para el riego y la iluminación, así como la configuración de la plataforma IoT para el monitoreo en tiempo real desde dispositivos móviles.

**Tabla 14**  
*Costos de Software*

<b>SOFTWARE</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (USD)</b>	<b>SUBTOTAL (USD)</b>
IDE Arduino	1	\$0	\$0
Python	1	\$0	\$0
Sistema Operativo Raspbain	1	\$0	\$0
Fritzing	1	\$0	\$0
Sketchup	1	\$0	\$0
Andriod Studio	1	\$0	\$0
Firebase	1	\$0	\$0
		<b>TOTAL</b>	<b>0</b>

Fuente: Autoría

Durante el desarrollo y validación experimental del sistema se utilizó el plan gratuito de Firebase Realtime Database, el cual fue suficiente para la ejecución de pruebas,

almacenamiento temporal de datos y sincronización con la aplicación móvil. No obstante, en caso de que el sistema sea implementado de manera permanente en un entorno productivo, deberá considerarse la contratación de un plan de pago que garantice mayor capacidad de almacenamiento, estabilidad operativa y disponibilidad continua del servicio. Los costos referenciales asociados a dichos planes se encuentran publicados oficialmente por Firebase y deberán ser evaluados según el volumen de datos generado y el tiempo de operación proyectado.

#### ***4.9.5 Costo Global del Sistema***

El Costo Global del Sistema representa la consolidación financiera de la investigación, unificando la inversión en hardware, infraestructura, ingeniería y software para determinar el capital total requerido en la implementación del proyecto. Este valor final no debe ser interpretado de forma aislada, sino en función de la rentabilidad y eficiencia obtenidas; la inversión total es la que permite desplazar la eficiencia del 60 % del método tradicional hacia un 100 % de rendimiento garantizado por la tecnología IoT.

**Tabla 15**  
*Costo Global del Sistema*

<b>Descripción</b>	<b>Subtotal (USD)</b>
Costos de Hardware	226.46
Costos de Infraestructura	747.52
Costos de Ingeniería	345
Costos de Software	0
<b>TOTAL</b>	<b>1318.98</b>

Fuente: Autoría

#### **4.10 Beneficios del Sistema**

La implementación del sistema automatizado basado en Internet de las Cosas representa una mejora integral en la producción de forraje verde hidropónico, consolidando un modelo de

control preciso que optimiza variables críticas del entorno de cultivo. La inversión total requerida para su desarrollo asciende a 1318.98 USD, valor que contempla la infraestructura tecnológica, los dispositivos electrónicos, la integración de sensores y el diseño del sistema de control. Este monto se traduce en una mejora significativa del rendimiento productivo, evidenciada en una altura promedio de 30 cm y un peso final de 5.70 kg por bandeja a partir de 1 kg de semilla, superando ampliamente los 20 cm y 4.45 kg obtenidos mediante manejo convencional.

El sistema alcanza una eficiencia operativa del 100 % al mantener condiciones paramétricas estables con temperaturas comprendidas entre 16 y 22 °C y niveles de humedad relativa entre 60 y 80 %, eliminando el estrés hídrico y térmico que comúnmente afecta el desarrollo fenológico del cultivo. La automatización del riego y el uso de iluminación LED de espectro completo en un rango de 2000 a 3000 lux garantizan una fotosíntesis uniforme, favoreciendo una conversión de biomasa superior en un 28.1 % respecto al método tradicional. Esta mejora no solo incrementa el volumen de producción, sino que asegura uniformidad estructural, coloración verde intensa y calidad nutricional constante en cada ciclo de 12 días.

Desde la perspectiva económica, el sistema presenta una estructura flexible que permite optimizar la inversión inicial. Si el diseño e instalación son asumidos por el propio productor y se excluyen los costos de ingeniería externa equivalentes a 345.00 USD, la inversión se reduce a 973.98 USD, fortaleciendo la viabilidad financiera y acelerando el retorno de inversión. La integración de monitoreo remoto permanente y la reducción de intervención humana posicionan al modelo como una solución escalable, técnicamente sólida y económicamente competitiva para el sector agropecuario, transformando la producción de forraje en un proceso predecible, eficiente y sostenible.

## Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

- Se definieron y validaron los requerimientos técnicos necesarios para la implementación de un sistema automatizado de monitoreo y control aplicado al cultivo de forraje verde hidropónico. La arquitectura IoT desarrollada permitió integrar de manera eficiente los procesos de adquisición de datos, almacenamiento, procesamiento y visualización remota, garantizando un funcionamiento estable, escalable y orientado a la optimización de variables críticas del entorno productivo.
- El diseño del sistema integró de forma coherente las capas de percepción, comunicación y aplicación, logrando una automatización efectiva de las condiciones ambientales relacionadas con temperatura, humedad e iluminación. La implementación del riego por microaspersión y el control programado de luminarias permitió mantener parámetros controlados durante el proceso de germinación, asegurando condiciones favorables para el desarrollo del cultivo y reduciendo la dependencia de intervención manual.
- Las pruebas experimentales realizadas validaron el cumplimiento del objetivo general del proyecto, evidenciando una mejora significativa respecto al método tradicional. Se registró un incremento del 28.1% en la producción de biomasa, alcanzando 5.70 kg por bandeja, así como un crecimiento vertical promedio de 30 cm en un periodo de 12 días. Estos resultados demuestran que la automatización del sistema contribuye de manera directa a la optimización del rendimiento productivo bajo las mismas condiciones de insumo.
- En términos generales, el sistema implementado constituye una solución técnicamente viable para la optimización del cultivo de forraje verde hidropónico, al mejorar la estabilidad de las condiciones ambientales, incrementar la productividad y establecer

una base tecnológica sólida para futuras ampliaciones o mejoras del proceso productivo.

### **Recomendaciones**

- Se recomienda considerar la implementación de un plan de suscripción para el servicio de base de datos en la nube en caso de que el sistema sea utilizado de manera permanente en un entorno productivo. Aunque el plan gratuito fue suficiente para la etapa experimental y validación del proyecto, una operación continua a largo plazo requerirá garantizar disponibilidad, estabilidad y capacidad de almacenamiento adecuadas mediante un esquema de pago.
- Se recomienda que en futuras implementaciones la separación vertical entre niveles de la estructura de cultivo sea de aproximadamente 40 cm, con el fin de permitir un desarrollo adecuado del forraje durante todo el ciclo productivo. Esta distancia favorece que el sistema de aspersión logre una cobertura uniforme sobre la biomasa a medida que aumenta su altura, evitando zonas con riego insuficiente y garantizando una distribución homogénea de humedad en todas las bandejas.
- Se recomienda que, en caso de ampliarse la capacidad del cultivo o incrementarse el área de producción, se considere la incorporación de nodos adicionales de monitoreo y control distribuidos estratégicamente dentro del entorno. La expansión del sistema mediante nuevos puntos de adquisición de datos permitirá mantener precisión en la medición de variables ambientales, evitar zonas con control insuficiente y garantizar uniformidad en las condiciones de temperatura, humedad e iluminación en estructuras de mayor escala.
- Se recomienda incorporar luminarias LED con espectros específicos para cultivos indoor y con capacidad de regulación de potencia, de manera que puedan adaptarse a

las distintas fases del ciclo de crecimiento del forraje. La posibilidad de ajustar intensidad y composición espectral permitiría optimizar los procesos fotosintéticos, mejorar el desarrollo vegetativo y aumentar la eficiencia energética del sistema en función de los requerimientos particulares de cada etapa del cultivo.

## Bibliografía

- Acosta Tenelema, A. F. (2022). *Sistema hidropónico inteligente aplicado a la producción del forraje verde con arquitectura IoT* [B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas ...].  
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/36511/1/t2104ec.pdf>
- Arduino Docs / Arduino Documentation. (s. f.). Recuperado 8 de julio de 2024, de  
[https://docs.arduino.cc/?\\_gl=1\\*1i26hu0\\*\\_gl\\_au\\*MjA4MDc0MDMyOS4xNzIwNDM3NDg2\\*FPAU\\*MjA4MDc0MDMyOS4xNzIwNDM3NDg2\\*\\_ga\\*MTg1MTU1OD A5MC4xNzIwNDM3NDgw\\*\\_ga\\_NEXN8H46L5\\*MTcyMDQzNzQ3OS4xLjEuMTcyMDQzNzUzMC4wLjAuMTU0MjMwMTkwNQ..\\*\\_fplc\\*a1FsYkUIMkI1REJ1R3NFVjJkQ3FZUEh3MTBZQU1JTTJCdFRxNFVYzlsNk9mVjY3Mklja3pPWHFUyTV3SzkIMkZrRyUyQkc5bklxeTNIOWV5a2RtRUIQRklvalBPbmg0V2RnQ2FUSkRvQXEwUWhJOFh5Ske2Ung0a2lsJTJCR05adlg3YIM2USUzRCUzRA..](https://docs.arduino.cc/?_gl=1*1i26hu0*_gl_au*MjA4MDc0MDMyOS4xNzIwNDM3NDg2*FPAU*MjA4MDc0MDMyOS4xNzIwNDM3NDg2*_ga*MTg1MTU1OD A5MC4xNzIwNDM3NDgw*_ga_NEXN8H46L5*MTcyMDQzNzQ3OS4xLjEuMTcyMDQzNzUzMC4wLjAuMTU0MjMwMTkwNQ..*_fplc*a1FsYkUIMkI1REJ1R3NFVjJkQ3FZUEh3MTBZQU1JTTJCdFRxNFVYzlsNk9mVjY3Mklja3pPWHFUyTV3SzkIMkZrRyUyQkc5bklxeTNIOWV5a2RtRUIQRklvalBPbmg0V2RnQ2FUSkRvQXEwUWhJOFh5Ske2Ung0a2lsJTJCR05adlg3YIM2USUzRCUzRA..)
- Bandyopadhyay, D., & Sen, J. (2011). Internet of Things: Applications and Challenges in Technology and Standardization. *Wireless Personal Communications*, 58(1), 49-69.  
<https://doi.org/10.1007/s11277-011-0288-5>
- BeagleBone® Black. (s. f.). *BeagleBoard*. Recuperado 8 de julio de 2024, de  
<https://www.beagleboard.org/boards/beaglebone-black>
- Beltrano, J., & Giménez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). <https://doi.org/10.35537/10915/46752>
- Cama-Pinto, A., De-La-Hoz-Franco, E., & Cama-Pinto, D. (2012). Las redes de sensores inalámbricos y el Internet de las cosas. *INGE CUC*. <http://hdl.handle.net/11323/1546>
- Canovas, F. (1993). Principios básicos de la hidroponía. Aspectos comunes y diferenciales de los cultivos con y sin suelo. *Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo*. IEA/FIAPA, Almería, 29-42.

Carballo, C. (2000). Manual de procedimientos para germinar granos para la alimentación animal. *Culiacán, México.* [En línea]: (<http://www.zoetecnocampo.com/Documentos.28 ene. 2012>).

*Define IoT - IEEE Internet of Things.* (s. f.). Recuperado 8 de julio de 2024, de <https://iot.ieee.org/definition.html>

*ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC | Espressif Systems.* (s. f.). Recuperado 8 de julio de 2024, de <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>

FAO. (2015). *Report 14—Hazards associated with animal feed.*

FAO, M. (2002). Forraje Verde Hidropónico. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Oficina Regional de la FAO para América latina y el Caribe. Santiago: Caribe.* [https://guiaspdf.net/wp-content/uploads/2021/02/Guia-para-Hacer-Forraje-Verde-Hidroponico-GuiasPDF.Net\\_.pdf](https://guiaspdf.net/wp-content/uploads/2021/02/Guia-para-Hacer-Forraje-Verde-Hidroponico-GuiasPDF.Net_.pdf)

Forraje Verde Hidropónico (F.V.H) Para La Alimentación De Animales (Guia completa). (2019, junio 3). *Pastos y Forrajes* < **【Información Actualizada】** .

<https://infopastosyforrajes.com/suplementacion/forraje-verde-hidroponico/>

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>

Juarez Lopez, P., Morales Rodriguez, H. J., Sandoval Villa, M., Gomez Danes, A. A., Cruz Crespo, E., Juarez Rosete, C. R., Aguirre Ortega, J., Alejo Santiago, G., & Ortiz Caton, M. (2013). PRODUCCION DE FORRAJE VERDE HIDROPONICO.

[https://www.researchgate.net/profile/Porfirio\\_Juarez-](https://www.researchgate.net/profile/Porfirio_Juarez-Lopez/publication/275715557_PRODUCCION_DE_FORRAJE_VERDE_HIDROPO)

[Lopez/publication/275715557\\_PRODUCCION\\_DE\\_FORRAJE\\_VERDE\\_HIDROPO](https://www.researchgate.net/profile/Porfirio_Juarez-Lopez/publication/275715557_PRODUCCION_DE_FORRAJE_VERDE_HIDROPO)  
[NICO/links/554518420cf23ff716869954.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Porfirio_Juarez-Lopez/publication/275715557_PRODUCCION_DE_FORRAJE_VERDE_HIDROPO).

<http://dspace.uan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/2126>

- Larrauri Quispe, J., & Manrique Quinto, E. L. (2022). *Efecto del Biol en la producción de forraje verde hidropónico de maíz (zea mays l.) en la Universidad Nacional de Huancavelica*. <https://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/4958>
- Liñán Colina, A., Vives, A., Bagula, A., Zennaro, M., & Erm. (2015). *INTERNET DE LAS COSAS*. <https://www.lawebdelprogramador.com/pdf/2439-INTERNET-DE-LAS-COSAS.html>
- Martínez, L. Á. L. (2005). *ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA*.
- Noroña, Á., Javier, F., Quijije Zambrano, E. P., & Singaña Amaguaña, M. A. (2022). *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*. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/29359/1/T-ESPEL-MEC-0243.pdf>
- Pastizal: Características, tipos, relieve, flora, clima, fauna*. (2019, septiembre 16). Lifeder. <https://www.lifeder.com/pastizal/>
- Ramírez, L. G. C., Jiménez, G. S. A., & Carreño, J. M. (2014). *Sensores y actuadores*. Grupo Editorial Patria. <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=wMm3BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=L.+G.+C.+Ram%C3%ADrez,+G.+S.+A.+Jim%C3%A9nez,+y+J.+M.+Carre%C3%B1o,+Sensores+y+Actuadores.+Grupo++Editorial+Patria,+2014&ots=6P3jdEa02w&sig=zU4MjfISW45luwVGBikc21e8SCw>
- Ramírez Víquez, C., Soto Bravo, F., Ramírez Víquez, C., & Soto Bravo, F. (2017). Efecto de la nutrición mineral sobre la producción de forraje verde hidropónico de maíz. *Agronomía Costarricense*, 41(2), 79-91. <https://doi.org/10.15517/rac.v41i2.31301>

*Raspberry Pi Documentation*. (s. f.). Recuperado 8 de julio de 2024, de

<https://www.raspberrypi.com/documentation/>

*Riego por Microaspersión / Sistemas de Riego por Difusión y Nebulización*. (s. f.).

Recuperado 4 de julio de 2024, de <https://www.novagric.com/es/riego/sistemas-de-riego/riego-por-microaspersion>

Tarrillo, H. (2008). *Manual de producción de forraje verde hidropónico*. Ed. Forraje

Hidropónico EIRL Perú.

Técnico, M. (2002). Forraje Verde Hidropónico. *Organización de las Naciones Unidas para*

*la Agricultura y la Alimentación. Oficina Regional de la FAO para América latina y el Caribe. Santiago: Caribe*. [https://guiaspdf.net/wp-content/uploads/2021/02/Guia-para-Hacer-Forraje-Verde-Hidroponico-GuiasPDF.Net\\_.pdf](https://guiaspdf.net/wp-content/uploads/2021/02/Guia-para-Hacer-Forraje-Verde-Hidroponico-GuiasPDF.Net_.pdf)

Whitmore, A., Agarwal, A., & Da Xu, L. (2015). The Internet of Things—A survey of topics and trends. *Information Systems Frontiers*, 17(2), 261-274.

<https://doi.org/10.1007/s10796-014-9489-2>

## ANEXOS

### Anexo 1: Código de la aplicación móvil

```
import 'package:flutter/material.dart';
import 'package:firebase_core/firebase_core.dart';
import 'package:firebase_database/firebase_database.dart';
import 'firebase_options.dart';

void main() async {
  WidgetsFlutterBinding.ensureInitialized();
```

```
await Firebase.initializeApp(options: DefaultFirebaseOptions.currentPlatform);  
runApp(const MyApp());  
}
```

```
class MyApp extends StatelessWidget {  
  const MyApp({super.key});  
  
  @override  
  Widget build(BuildContext context) {  
    return MaterialApp(  
      debugShowCheckedModeBanner: false,  
      theme: ThemeData(  
        scaffoldBackgroundColor: const Color(0xFFFF4F6F8),  
        primaryColor: const Color(0xFF2E7D32),  
        fontFamily: 'Roboto',  
        appBarTheme: const AppBarTheme(  
          backgroundColor: Color(0xFF2E7D32),  
          elevation: 0,  
          centerTitle: true,  
        ),  
      ),  
      home: const DashboardPage(),  
    );  
  }  
}
```

```
class DashboardPage extends StatelessWidget {  
  const DashboardPage({super.key});  
  
  DatabaseReference refNodo(String nodo) {  
    return FirebaseDatabase.instance.ref("nodos/$nodo/actual");  
  }  
  
  @override  
  Widget build(BuildContext context) {  
    final nodo1Ref = refNodo("nodo1");  
    final nodo2Ref = refNodo("nodo2");  
  
    return Scaffold(  
      appBar: AppBar(  
        title: const Text(  
          "Sistema de Monitoreo FVH",  
          style: TextStyle(fontWeight: FontWeight.bold),  
        ),  
      ),  
      body: ListView(  
        padding: const EdgeInsets.all(16),  
        children: [  
          NodoCard(titulo: "Nodo Sensor 1", ref: nodo1Ref),  
          const SizedBox(height: 16),  
        ],  
      ),  
    );  
  }  
}
```

```

        NodoCard(titulo: "Nodo Sensor 2", ref: nodo2Ref),
    ],
),
);
}
}

```

```

class NodoCard extends StatefulWidget {
    final String titulo;
    final DatabaseReference ref;

    const NodoCard({super.key, required this.titulo, required this.ref});

    @override
    State<NodoCard> createState() => _NodoCardState();
}

```

```

class _NodoCardState extends State<NodoCard> {
    double temperatura = 0.0;
    double humedad = 0.0;
    double lux = 0.0;
    bool estadoRiego = false;
    String ultimaActualizacion = "--:--";

    double _toDouble(dynamic v) {

```

```

if (v == null) return double.nan;

if (v is num) return v.toDouble();

return double.tryParse(v.toString()) ?? double.nan;
}

```

```

void _applyUpdate(Map<String, dynamic> sensores) {

  final t = _toDouble(sensores["temperatura"]);

  final h = _toDouble(sensores["humedad"]);

  final l = _toDouble(sensores["lux"]);

  setState() {

    if (!t.isNaN) temperatura = t;

    if (!h.isNaN) humedad = h;

    if (!l.isNaN) lux = l;

    final now = DateTime.now();

    ultimaActualizacion =

      "${now.hour.toString().padLeft(2, '0')}:${now.minute.toString().padLeft(2, '0')}";

  });
}

```

```
@override
```

```

Widget build(BuildContext context) {

  return Card(

    elevation: 4,

```

```

shape: RoundedRectangleBorder(borderRadius: BorderRadius.circular(16)),
child: Padding(
  padding: const EdgeInsets.all(16),
  child: StreamBuilder<DatabaseEvent>(
    stream: widget.ref.onValue,
    builder: (context, snapshot) {
      if (snapshot.hasData && snapshot.data?.snapshot.value != null) {
        final raw = snapshot.data!.snapshot.value;
        final map = Map<String, dynamic>.from(raw as Map);

        final sensoresRaw = map["sensores"];
        final actuadoresRaw = map["actuadores"];
        if (actuadoresRaw is Map && actuadoresRaw["riego"] != null) {
          estadoRiego = actuadoresRaw["riego"] == true;
        }
        final sensores = sensoresRaw is Map
          ? Map<String, dynamic>.from(sensoresRaw)
          : <String, dynamic>{};

        if (sensores.isNotEmpty) {
          WidgetsBinding.instance.addPostFrameCallback((_) {
            if (!mounted) return;
            _applyUpdate(sensores);
          });
        }
      }
    }
  )
)

```

```
}  
  
return Column(  
  crossAxisAlignment: CrossAxisAlignment.start,  
  children: [  
    Text(  
      widget.titulo,  
      style: const TextStyle(  
        fontSize: 20,  
        fontWeight: FontWeight.bold,  
        color: Color(0xFF2E7D32),  
      ),  
    ),  
    const SizedBox(height: 12),  
  
    if (widget.titulo == "Nodo Sensor 1") ...[  
      Container(  
        margin: const EdgeInsets.only(bottom: 12),  
        padding: const EdgeInsets.symmetric(  
          vertical: 6,  
          horizontal: 12,  
        ),  
        decoration: BoxDecoration(  
          color: estadoRiego ? Colors.green[100] : Colors.red[100],  
          borderRadius: BorderRadius.circular(12),
```

```

),
child: Row(
  children: [
    Icon(
      estadoRiego ? Icons.water_drop : Icons.cancel,
      color: estadoRiego ? Colors.green : Colors.red,
    ),
    const SizedBox(width: 8),
    Text(
      estadoRiego ? "Riego ACTIVO" : "Riego INACTIVO",
      style: TextStyle(
        fontWeight: FontWeight.bold,
        color: estadoRiego
          ? Colors.green[800]
          : Colors.red[800],
      ),
    ),
  ],
),
const SizedBox(height: 12),
],
_DatoRow(
  label: "Temperatura",

```

```

        value: "${temperatura.toStringAsFixed(1)} °C",
    ),
    _DataRow(
        label: "Humedad",
        value: "${humedad.toStringAsFixed(1)} %",
    ),
    _DataRow(label: "Luz", value: "${lux.toStringAsFixed(0)} lux"),
    const SizedBox(height: 12),
    Text(
        "Última actualización: $ultimaActualizacion",
        style: const TextStyle(fontSize: 12, color: Colors.grey),
    ),
  ],
);
},
),
),
);
}
}

```

```

class _DataRow extends StatelessWidget {
    final String label;
    final String value;
}

```

```
const _DataRow({required this.label, required this.value});
```

```
IconData _getIcon() {  
  switch (label) {  
    case "Temperatura":  
      return Icons.thermostat;  
    case "Humedad":  
      return Icons.water_drop;  
    case "Luz":  
      return Icons.lightbulb;  
    default:  
      return Icons.device_unknown;  
  }  
}
```

```
@override
```

```
Widget build(BuildContext context) {  
  return Padding(  
    padding: const EdgeInsets.symmetric(vertical: 6),  
    child: Row(  
      mainAxisAlignment: MainAxisAlignment.spaceBetween,  
      children: [  
        Row(  
          children: [  
            Icon(_getIcon(), color: const Color(0xFF2E7D32)),
```

```
    const SizedBox(width: 8),  
    Text(label, style: const TextStyle(fontSize: 16)),  
  ],  
),  
Text(  
  value,  
  style: const TextStyle(  
    fontSize: 16,  
    fontWeight: FontWeight.bold,  
    color: Color(0xFF2E7D32),  
  ),  
),  
],  
),  
);  
}  
}
```

