

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y  
ELÉCTRICA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO  
BASADO EN TECNOLOGÍAS DE INTERNET DE LAS  
COSAS EN EL VIVERO MUNICIPAL DE TABACONAS –  
SAN IGNACIO**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE MECÁNICO  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**Autores: Bach. Juan Manuel Adrianzen Yajahuanca  
Bach. José Nelo Neira Galvez**

**Asesores: Dr. Freddi Roland Rodriguez Ordoñez  
Mg. Correa Chilon David Geremias**

**Línea de investigación: Automatización y control industrial**

**JAÉN – PERÚ, DICIEMBRE, 2025**




## 2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

### Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**  
566 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

*Dr. Alexander Huamán Mera*  
Responsable de la Unidad de Investigación  
de la Facultad de Ingeniería



### FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día jueves 18 de diciembre del 2025, siendo las 14:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente : Mg. José Andrés Fernández Mera  
Secretario : Dr. Edwin Carlos Lenin Félix Poicon  
Vocal : Mg. Lenin Franchescoletth Núñez Pintado

Para evaluar la Sustentación del Informe Final:

- ( ) Trabajo de Investigación  
( X ) Tesis  
( ) Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: "DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO BASADO EN TECNOLOGÍAS DE INTERNET DE LAS COSAS EN EL VIVERO MUNICIPAL DE TABACONAS-SAN IGNACIO"

Presentado por los bachilleres: **Juan Manuel Adrianzen Yajahuanca y Jose Nelo Neira Galvez**, de la Escuela Profesional de INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA.

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:


- ( ) Aprobar      ( ) Desaprobar      ( ) Unanimidad      ( ) Mayoría

Con la siguiente mención:

- |                |            |        |
|----------------|------------|--------|
| a) Excelente   | 18, 19 20  | ( )    |
| b) Muy bueno   | 16, 17     | ( )    |
| c) Bueno       | 14, 15     | ( 14 ) |
| d) Regular     | 13         | ( )    |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | ( )    |

Siendo las 14:30 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando con la suscripción de la presente.

  
Mg. José Andrés Fernández Mera  
Presidente Jurado Evaluador

  
Dr. Edwin Carlos Lenin Félix Poicon  
Secretario Jurado Evaluador

  
Mg. Lenin Franchescoletth Núñez Pintado  
Vocal Jurado Evaluador

## “Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia”

### ANEXO N°06:

#### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)

Yo, **Juan Manuel Adrianzen Yajahuanca**, identificado con DNI **76182218**, y **Jose Nelo Neira Galvez**, identificado con DNI **76641650**, egresados de la carrera **Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica** de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén.

Declaro bajo juramento que:

1. Somos Autores del trabajo titulado:



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO BASADO EN TECNOLOGÍAS DE INTERNET DE LAS COSAS EN EL VIVERO MUNICIPAL DE TABACONAS – SAN IGNACIO”**.  
Asesorados por el **Dr. Freddi Roland Rodriguez Ordoñez** y **Mg. Correa Chilon David Geremias**.



El mismo que presento bajo la modalidad de **tesis** para optar; el Título Profesional/Grado Académico de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 07, febrero, 2026

  
  
Juan Manuel Adrianzen Yajahuanca

  
  
Jose Nelo Neira Galvez

## ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMEN .....</b>                                  | <b>7</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                 | <b>8</b>  |
| <b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>                          | <b>9</b>  |
| <b>1.1 Antecedentes de la investigación .....</b>     | <b>10</b> |
| <b>1.1.1. A nivel internacional. ....</b>             | <b>10</b> |
| <b>1.1.2. A nivel nacional.....</b>                   | <b>14</b> |
| <b>1.1.3. A nivel local. ....</b>                     | <b>16</b> |
| <b>1.2 Planteamiento del Problema.....</b>            | <b>16</b> |
| Formulación del problema.....                         | 17        |
| <b>1.3 Justificación.....</b>                         | <b>17</b> |
| 1.3.1 Justificación Social.....                       | 17        |
| 1.3.2 Justificación Económica.....                    | 18        |
| 1.3.3 Justificación Ambiental:.....                   | 18        |
| 1.3.4 Justificación Tecnológica:.....                 | 18        |
| 1.3.5 Justificación práctica:.....                    | 19        |
| 1.3.6 Justificación metodológica:.....                | 19        |
| <b>1.4 Hipótesis. ....</b>                            | <b>19</b> |
| <b>1.5 Objetivos.....</b>                             | <b>20</b> |
| 1.5.1 Objetivo general .....                          | 20        |
| 1.5.2 Objetivos específicos.....                      | 20        |
| <b>II. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>                 | <b>21</b> |
| <b>2.1. Objeto de estudio:.....</b>                   | <b>21</b> |
| <b>Ubicación geográfica del área de estudio. ....</b> | <b>21</b> |
| <b>Métodos .....</b>                                  | <b>22</b> |
| <b>Diseño del Estudio:.....</b>                       | <b>23</b> |
| <b>Población:.....</b>                                | <b>23</b> |

|  |    |
|--|----|
| <b>Muestra:</b> .....  | 23 |
| <b>Muestreo:</b> .....   | 23 |
| <b>Variables, operacionalización y definición conceptual y operacional</b> ..... | 24 |
| <b>Procedimiento:</b> .....  | 24 |
| <b>Definición de los parámetros actuales del sistema de riego en el Vivero</b>   |    |
| <b>Municipal de Tabaconas, San Ignacio.</b> .....                                | 25 |
| <b>III. RESULTADOS</b> .....   | 63 |
| <b>DISCUSIÓN</b> .....   | 86 |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....                                      | 88 |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....  | 90 |
| <b>AGRADECIMIENTO</b> .....  | 92 |
| <b>DEDICATORÍA</b> .....   | 93 |
| <b>ANEXOS</b> .....  | 94 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables .....   | 24 |
| <b>Tabla 2</b> Tipos de sensores de humedad del suelo considerados en la evaluación técnica<br>..... | 30 |
| <b>Tabla 3</b> Tipos de bombas para riego en vivero y sus características .....                      | 32 |
| <b>Tabla 4</b> Tipos de controladores y sus características para riego automatizado .....            | 34 |
| <b>Tabla 5</b> Interfaces de comunicación consideradas en la evaluación técnica .....                | 36 |
| <b>Tabla 6</b> Tipos de drivers de potencia considerados en la evaluación técnica.....               | 38 |
| <b>Tabla 7</b> <i>Opciones de módulos relay consideradas en la evaluación técnica</i> .....          | 41 |
| <b>Tabla 8</b> <i>Tipos de sensores de caudal considerados en la evaluación técnica</i> .....        | 43 |
| <b>Tabla 9</b> <i>Tipos de microaspersores considerados en la evaluación técnica</i> .....           | 45 |
| <b>Tabla 10</b> Características de los Cables Jumper .....   | 47 |
| <b>Tabla 11</b> Características de la Batería de 12 V .....  | 48 |
| <b>Tabla 12</b> Características del Panel Solar de 40 W .....  | 50 |
| <b>Tabla 13</b> <i>Presupuesto de los materiales hidráulicos y eléctricos</i> .....                  | 58 |
| <b>Tabla 14</b> <i>Presupuesto del costo de instalación</i> .....                                    | 59 |
| <b>Tabla 15</b> <i>Presupuesto de los componentes principales</i> .....                              | 60 |
| <b>Tabla 16</b> <i>Presupuesto del mantenimiento preventivo anual</i> .....                          | 60 |
| <b>Tabla 17</b> <i>Presupuesto resumen</i> .....   | 61 |
| <b>Tabla 18</b> <i>Resultados obtenidos de la revisión documental</i> .....                          | 63 |
| <b>Tabla 19</b> <i>Resultados de la entrevista al personal encargado del Vivero Municipal</i> .....  | 64 |
| <b>Tabla 20</b> <i>Requerimientos hidráulicos del sistema de riego</i> .....                         | 67 |
| <b>Tabla 21</b> <i>Requerimientos electrónicos y de automatización</i> .....                         | 67 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 22</b> <i>Selección de componentes IoT del sistema de riego automatizado</i> .....     | 69 |
| <b>Tabla 23</b> <i>Dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el sistema de riego</i> ..... | 74 |
| <b>Tabla 24</b> <i>Lista de equipos y componentes del sistema de riego automatizado</i> .....   | 79 |
| <b>Tabla 25</b> <i>Recursos técnicos y humanos del Vivero Municipal de Tabaconas</i> .....      | 82 |
| <b>Tabla 26</b> <i>Presupuesto del sistema automatizado de riego</i> .....                      | 84 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> Ubicación geográfica del distrito de Tabaconas .....   | 22 |
| <b>Figura 2</b> Aplicación de entrevista estructurada al personal encargado del vivero. ....   | 26 |
| <b>Figura 3</b> Medición del caudal mediante el método de volumen–tiempo.....  | 27 |
| <b>Figura 4</b> Sensor de humedad del suelo capacitivo v1.2 utilizado en el prototipo. ....  | 31 |
| <b>Figura 5</b> Bomba centrífuga multietapa seleccionada para el sistema de riego.....   | 33 |
| <b>Figura 6</b> Controlador seleccionado integrado en el prototipo de riego automatizado..   | 35 |
| <b>Figura 7</b> Interfaz de comunicación seleccionada para el sistema de riego automatizado.<br>.....                                | 37 |
| <b>Figura 8</b> Driver de potencia seleccionado para el accionamiento de válvulas y bomba.<br>.....                                  | 40 |
| <b>Figura 9</b> módulo relay de 8 canales 5 V optoaislado. ....  | 42 |
| <b>Figura 10</b> Sensor de flujo tipo turbina Hall instalado en la línea principal, aguas arriba<br>de las válvulas del módulo. .... | 44 |
| <b>Figura 11</b> Microaspersores 360° de 30 L/h instalados en cama de 1 m con trama 1×1<br>m. ....                                   | 46 |
| <b>Figura 12</b> Cables jumper utilizados para la interconexión de sensores y módulos en la<br>etapa de prototipado.....             | 47 |
| <b>Figura 13</b> . Batería recargable de 12 V – 25 Ah empleada en el prototipo del sistema de<br>riego automatizado. ....            | 49 |
| <b>Figura 14</b> Panel solar de 40 W utilizado en el sistema de riego automatizado. ....   | 50 |
| <b>Figura 15</b> Diagrama general del sistema de control de riego automatizado basado en<br>IoT. ....                                | 54 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 16</b> interfaz móvil para el monitoreo y control del sistema de riego mediante Bluetooth. .... | 55 |
| <b>Figura 17</b> Estado actual del Vivero Municipal de Tabaconas.....                                     | 57 |
| <b>Figura 18</b> Diagrama hidráulico del sistema de riego automatizado .....                              | 71 |
| <b>Figura 19</b> Plano eléctrico del sistema de riego automatizado .....                                  | 73 |
| <b>Figura 20</b> Diagrama electrónico del sistema de control IoT del riego automatizado...                | 75 |
| <b>Figura 21</b> Diagrama de flujo operativo del sistema de control IoT del riego automatizado.....       | 77 |
| <b>Figura 22</b> Diagrama general del sistema de riego automatizado.....                                  | 78 |

## **RESUMEN**

El presente trabajo desarrolla el diseño de un sistema de riego automatizado basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) para el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio, con el propósito de optimizar el uso eficiente del recurso hídrico y promover la sostenibilidad energética en entornos rurales sin acceso a la red eléctrica. La investigación se realizó bajo un enfoque de diseño técnico–analítico, considerando las condiciones reales de operación del vivero. El sistema propuesto integra sensores de humedad del suelo, válvulas solenoides, una bomba de 12 VDC, el microcontrolador Arduino Mega 2560 R3, el módulo Bluetooth HC-05 y un panel solar de 40 W, implementados mediante una lógica de control por histéresis ( $H_{min} = 40 \%$ ,  $H_{max} = 60 \%$ ).

Los resultados del diseño demuestran la viabilidad técnica, económica y ambiental del sistema, con un costo estimado de S/ 7 667.00, capaz de reducir el consumo de agua hasta en un 40 % y garantizar autonomía energética mediante energía solar. Asimismo, el estudio evidencia la pertinencia de aplicar soluciones IoT accesibles y sostenibles en la gestión del riego forestal, contribuyendo a la eficiencia hídrica, al desarrollo tecnológico local y a la conservación ambiental en el distrito de Tabaconas.

**Palabras Clave:** Riego automatizado, IoT, eficiencia hídrica, sensores de humedad, energía solar

## **ABSTRACT**

This study develops the design of an automated irrigation system based on Internet of Things (IoT) technologies for the Municipal Nursery of Tabaconas – San Ignacio, with the purpose of optimizing efficient water use and promoting energy sustainability in rural environments without access to the electrical grid. The research was conducted under a technical–analytical design approach, considering the actual operating conditions of the nursery. The proposed system integrates soil moisture sensors, solenoid valves, a 12 VDC water pump, an Arduino Mega 2560 R3 microcontroller, an HC-05 Bluetooth module, and a 40 W solar panel, implemented through a hysteresis control logic ( $H_{min} = 40\%$ ,  $H_{max} = 60\%$ ).

The design results demonstrate the technical, economic, and environmental feasibility of the system, with an estimated cost of S/ 7,667.00, capable of reducing water consumption by up to 40% and ensuring energy autonomy through solar power. Furthermore, the study highlights the relevance of applying accessible and sustainable IoT solutions in forest irrigation management, contributing to water efficiency, local technological development, and environmental conservation in the district of Tabaconas.

**Keywords:** Automated irrigation, IoT, water efficiency, soil moisture sensors, solar energy.

## **I. INTRODUCCIÓN**

El crecimiento de la población y la expansión de las actividades agrícolas han incrementado la demanda de recursos hídricos, generando la necesidad de implementar tecnologías que optimicen el uso del agua en los sistemas de riego. En zonas rurales, como Tabaconas, el riego aún se realiza de manera manual, lo cual implica un consumo excesivo del recurso, mayor esfuerzo operativo y baja uniformidad en la irrigación. Este escenario afecta directamente la eficiencia productiva de los viveros forestales, los cuales cumplen un rol importante en los programas de reforestación y conservación ambiental de la región.

En este contexto, la automatización del riego mediante el uso de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) se presenta como una alternativa viable para mejorar la gestión hídrica. La IoT permite monitorear y controlar variables ambientales en tiempo real, asegurando que el suministro de agua responda a las necesidades específicas de las plantas. De esta manera, es posible reducir el desperdicio de agua, optimizar la producción y disminuir el esfuerzo manual del personal encargado.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un sistema de riego automatizado basado en tecnologías IoT para el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio. El diseño integra sensores de humedad del suelo, válvulas solenoides, una bomba de 12 VDC, un microcontrolador Arduino Mega 2560 R3, un módulo Bluetooth HC-05 y un panel solar de 40 W, configurados mediante una lógica de control por histéresis. Este enfoque permite garantizar una aplicación eficiente del agua y autonomía energética mediante energía solar, lo cual es fundamental en entornos rurales sin acceso a la red eléctrica.

Además, la investigación busca contribuir al desarrollo tecnológico local mediante la adopción de soluciones accesibles y sostenibles, que puedan ser replicadas en otros viveros y comunidades agrícolas de la región. Con ello, se pretende fortalecer la gestión del recurso hídrico, promover la sostenibilidad ambiental y mejorar la capacidad de producción de plántones destinados a la recuperación de áreas degradadas.

## **1.1 Antecedentes de la investigación**

### **1.1.1. A nivel internacional.**

En Ecuador, Jiménez Albán (2024) llevó a cabo una investigación titulada "Sistema de riego inteligente de corto alcance para jardines a partir de visión artificial" con el propósito de implementar un sistema de riego inteligente eficiente para césped utilizando tecnologías de visión artificial. Para ello, emplearon un algoritmo de detección entrenado con YOLOv5 y componentes electrónicos como la ESP32-CAM, el sensor de humedad FC-28, válvulas solenoides, servomotores TD-8120MG y un módulo relé, además de la ESP32 WROOM 32 y una fuente de alimentación de 5V y 12V, analizando una población compuesta por un jardín residencial en la ciudad de Ambato. Se utilizó la técnica de reconocimiento de imágenes y el instrumento válvulas solenoides y servomotores para controlar el flujo y la dirección del agua. Los resultados destacaron que el sistema logró una precisión del 95,6% en la detección del césped y un control eficiente del riego automatizado. Las conclusiones señalan que la implementación del sistema permite optimizar el uso del agua al identificar con precisión los contornos de las áreas verdes y los objetos presentes. Este estudio aporta evidencia relevante para el desarrollo de sistemas de riego automatizados, especialmente en el contexto de jardines y áreas verdes urbanas, subrayando la importancia de integrar tecnologías avanzadas como la visión artificial y la electrónica para optimizar los recursos.

En Guatemala, Oliva España (2023) llevó a cabo una investigación titulada "Diseño de sistema de riego por goteo automatizado utilizando una placa programable Raspberry Pi Pico y módulo ESP8266, en la finca Moralfa, departamento de Quetzaltenango, municipio de Coatepeque", con el Propósito de diseñar un sistema de riego por goteo automatizado para plantaciones de aguacate. Para ello, emplearon componentes clave como la Raspberry Pi Pico, el módulo ESP8266, una pantalla OLED de 0.96 pulgadas, electroválvulas, un módulo de relé y botones de selección, analizando una población compuesta por plantaciones de aguacate en la finca Moralfa. Se utilizó la técnica de riego

por goteo y el módulo ESP8266 para controlar una electroválvula que gestionaba el flujo de agua. Los resultados destacaron que el sistema de riego automatizado permitió una gestión eficiente del agua, contribuyendo significativamente a su conservación, especialmente en áreas donde el acceso a este recurso es limitado. Las conclusiones señalan que la implementación de este sistema puede optimizar el riego en áreas rurales y mejorar la productividad de los cultivos. Este estudio aporta evidencia relevante para el desarrollo de sistemas de riego automatizados en plantaciones agrícolas, subrayando la importancia de integrar tecnologías accesibles, como la Raspberry Pi Pico y el módulo ESP8266, para mejorar la eficiencia hídrica en la agricultura rural.

En Ecuador, Delgado Bravo (2021) llevó a cabo una investigación titulada "Estudio de un sistema de riego automatizado para mejorar la producción agrícola en la Hacienda 'Las Cabezas' del Cantón Flavio Alfaro" con el propósito de implementar un sistema de riego automatizado en la hacienda. Para ello, se emplearon componentes principales como una computadora portátil con procesador Intel Core i5, una tarjeta Arduino, un sensor de humedad de suelo, un servomotor para control de posición y dos aspersores de impacto Rainbird para riego, analizando una población compuesta por cultivos de pasto en la Hacienda "Las Cabezas". Se utilizó la técnica de entrevista al propietario y el método de observación para determinar la ubicación óptima de los equipos de riego. Los resultados destacaron que la implementación del sistema automatizado mejoró significativamente la eficiencia en el uso del agua, optimizando el riego y reduciendo el consumo innecesario del recurso. Las conclusiones señalan que este tipo de sistemas tiene el potencial de incrementar la producción agrícola al proporcionar un riego más preciso y continuo. Este estudio aporta evidencia relevante para proyectos de riego en entornos similares, subrayando la importancia de integrar tecnologías modernas en la agricultura para optimizar los recursos hídricos y aumentar la productividad agrícola.

En Ecuador, Crespo Santander (2022) llevó a cabo una investigación titulada "Diseño e Implementación de un Sistema Automático de Riego para Jardines o Cultivos Domésticos" con el propósito de diseñar un sistema automatizado para optimizar el riego en huertos domésticos. Para ello, se emplearon componentes principales como un módulo Bluetooth para la transmisión de datos, un sensor de humedad para detectar la humedad del suelo, un aspersor de riego, un relé para el control de encendido y apagado, una electroválvula como llave de paso eléctrica, un dispositivo móvil Android para la gestión remota y un microcontrolador Arduino Mega, con una fuente de alimentación de 9V y 12V. El sistema fue controlado mediante una aplicación móvil, analizando una población compuesta por jardines y cultivos domésticos. Los resultados destacaron que la implementación del sistema automatizado permitió una reducción significativa en el consumo de agua y energía, garantizando la adecuada hidratación del suelo y facilitando su gestión. Las conclusiones señalaron que este sistema puede ser una solución eficaz para personas que no tienen el tiempo ni el conocimiento para mantener sus jardines, automatizando el proceso de riego y optimizando el uso de los recursos. Este estudio aporta evidencia relevante para el "Diseño de un Sistema de Riego Automatizado Basado en Tecnologías de Internet de las Cosas en el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio", subrayando la importancia de la automatización para el uso eficiente de los recursos hídricos y la simplificación del trabajo en áreas similares.

En Colombia, Mejía Idárraga (2022) desarrolló una investigación titulada "Desarrollo de prototipo de sistema de riego automatizado para cultivo de plantas medicinales ubicado en la granja agroecológica UCEVA" con el propósito de optimizar el riego en cultivos de plantas medicinales. Para ello, se emplearon componentes principales como el sensor Fs200 para medir la humedad y temperatura del suelo, el sensor PCE-PH20S para determinar el pH del suelo, un panel solar mono PERC de 455W junto con un inversor cargador POWEST MPPT de 1KVA para generar y gestionar energía fotovoltaica, y una batería GEL de 100Ah para almacenar la energía. Además,

se incluyen dispositivos de protección eléctrica como protección DPS contra sobrevoltajes, mini disyuntores y fusibles, junto con conectores MC4 y cableado específico para el sistema fotovoltaico. Los resultados demostraron que el sistema automatizado optimizó el control del riego, reduciendo el desperdicio de agua y promoviendo un crecimiento adecuado de las plantas. Las conclusiones subrayaron la relevancia de la automatización en la gestión eficiente de recursos hídricos y la sostenibilidad agrícola. Este estudio aporta evidencia significativa para el proyecto "Diseño de un Sistema de Riego Automatizado Basado en Tecnologías de Internet de las Cosas en el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio", destacando la importancia de la automatización para optimizar el uso de agua y fomentar la sostenibilidad en la agricultura.

En Colombia, Gutiérrez et al., (2022) llevaron a cabo una investigación titulada "Sistema de Riego Automatizado" con el propósito de diseñar e implementar un sistema automatizado en el vivero Villa Campestre, ubicado en Bugalagrande, Valle del Cauca. Para ello, se utilizaron componentes clave como el comparador de voltaje dual LM393, un puente en H para controlar la dirección del motor, una bomba de salida de agua para mover el agua, y un sensor de humedad YL-69 para medir la humedad del suelo y determinar las necesidades de riego. También se incorporan resistencias para limitar el flujo de corriente, condensadores para almacenar energía, un potenciómetro para ajustar los valores en el circuito, y diodos LED como indicadores de funcionamiento. Los resultados demostraron que el sistema automatizado mejoró significativamente el control del riego, optimizando el uso del agua y reduciendo el consumo de este recurso. Las conclusiones destacaron que la automatización en riego es clave para una gestión hídrica eficiente, reduciendo costos y mejorando la sostenibilidad. Este estudio proporciona evidencia relevante para el proyecto "Diseño de un Sistema de Riego Automatizado Basado en Tecnologías de Internet de las Cosas en el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio", destacando el papel de la tecnología en la optimización de recursos y la precisión en el manejo del riego.

### **1.1.2. A nivel nacional.**

En Perú, Rojas Asto (2022) desarrolló un sistema de riego automatizado para cultivos de uva utilizando el vehículo autónomo Summit XL, con el objetivo de reducir el consumo de agua. La plataforma mecatrónica incluyó componentes principales como una placa Arduino Mega para el control del sistema (suministrada por Creatividad Ahora), electroválvulas de Naylamp Mechatronics para regular el flujo de agua, un motor DC con codificador y un driver de motor de Pololu para la locomoción del vehículo, y un LiDAR de RobotShop para la navegación autónoma. El sistema incorpora además una cámara infrarroja de Optris para análisis visual, un sensor de nivel de voltaje de Electrotec, un buzzer de Buerklin como alarma y una batería de Hobbyking para la energía del sistema, todo dentro de una caja electrónica para la protección de los componentes. Utilizando la metodología VID 2222 y el sistema operativo de robótica ROS, el prototipo demostró una mayor eficiencia en el uso del agua y una navegación precisa con un margen de error menor a 2 cm/min. Este estudio respalda el uso de vehículos autónomos en la agricultura para un riego optimizado y un monitoreo en tiempo real, lo cual es esencial para la gestión eficiente del agua en entornos agrícolas.

En Perú, Rojas Ipanaqué (2021) diseñó un sistema de potencia y control automatizado para el riego agrícola en Paramonga, optimizando el uso de agua y fertilizantes. El sistema se basó en controladores lógicos programables (PLC) de Control Logix y en sensores que monitorean la humedad del suelo, niveles de agua y precipitaciones. Entre los componentes principales se incluyen sensores de humedad, electroválvulas para agua y fertilización, bombas de riego, tuberías de polietileno de 1.5”, goteros y flotantes de agua, además de un inyector tipo Venturi para la dosificación de fertilizantes y un sensor de lluvia. para ajustar el riego según las precipitaciones. La programación de los PLC se realizó con RSLogix 5000, mientras que la interfaz de usuario fue desarrollada en Factory Talk View. Este sistema automatizado no solo reduce el consumo de agua, sino que también permite una gestión remota y continua sin requerir personal altamente capacitado, lo

cual es esencial para incrementar la productividad agrícola. La investigación enfatiza la importancia de sensores y PLC para la optimización en tiempo real de los recursos hídricos según las condiciones del terreno y las necesidades del cultivo, una contribución relevante para el "Diseño de un Sistema de Riego Automatizado Basado en Tecnologías de Internet de las Cosas en el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio", promoviendo una agricultura sostenible en contextos de escasez hídrica.

En Perú, Ventura Palomino y Lima Esperilla (2020) diseñan un sistema automatizado de riego por aspersión con generación fotovoltaica para optimizar el uso del agua en cultivos de aguaymanto en el CPM de Mayobamba. El sistema se compuso de tres subsistemas: hidráulico, eléctrico y de control, e incluyó componentes clave como electroválvulas Hunter, baterías Tensite de 12 V 300 Ah, inversores y cargadores Victron Energy, PLC Siemens S1200 para control, y paneles solares Seraphim. Además, se utilizaron geomembranas Orbes agrícolas, tubos HDPE de diferentes tamaños de Acorsa Perú, válvulas check Agromax, electrobombas Evans, y estructuras de montaje AutoSolar. El sistema también incorporó cables eléctricos Novum Solar, relés Finder, y lámparas piloto plásticas Green Premium, entre otros componentes eléctricos y de control, que permitieron una irrigación eficiente y rentable, optimizando tanto el consumo de agua como la energía solar, alcanzando una eficiencia hídrica del 86,6%. Este estudio proporciona evidencia valiosa para proyectos similares, como el "Diseño de un Sistema de Riego Automatizado Basado en Tecnologías de Internet de las Cosas en el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio", destacando la importancia de integrar energía solar y automatización para mejorar la sostenibilidad en la agricultura.

### **1.1.3. A nivel local.**

En Perú, Ordoñez y Cieza (2023) diseñan un sistema automatizado de riego mediante tecnología Arduino para optimizar el uso del agua en el vivero municipal de Jaén. El sistema de relé incluyó componentes clave como la placa Arduino Mega, módulos de 8 canales, sensores de humedad (12 unidades), microaspersores para riego (434 unidades), mangueras de polietileno (de 3/8" y 1/2"), electroválvulas para agua (6 unidades), y sensores de nivel de agua. Además, se utilizarán accesorios como válvulas check, bombas de 3 HP, contactos, cables contra incendios, tableros de distribución y pantallas LCD alfanuméricas para la visualización de datos. Otros elementos esenciales fueron las válvulas de alivio de presión, flotadores, codos y tees de PVC, y materiales como alambre galvanizado, soldadura PVC y tapones galvanizados. El sistema propuesto no solo mejoró la eficiencia en el uso del agua, reduciendo el consumo anual de 5,783.6 m<sup>3</sup> a 1,560.6 m<sup>3</sup>, sino que también mostró viabilidad económica con un VAN de S/. 5.976,95 y una TIR del 23%, resaltando la importancia de la automatización para la sostenibilidad en la gestión del recurso hídrico.

## **1.2 Planteamiento del Problema**

El eje central de esta investigación es el diseño de un sistema de riego automatizado basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), orientado a optimizar el uso del agua en el Vivero Municipal de Tabaconas, provincia de San Ignacio. En un contexto global marcado por la creciente escasez de agua, la gestión eficiente de este recurso se ha convertido en un desafío prioritario, especialmente en el sector agrícola, responsable de aproximadamente el 70 % del consumo mundial de agua dulce (FAO, 2020). En este sentido, el diseño de sistemas automatizados constituye una estrategia fundamental para mejorar la eficiencia hídrica y contribuir a la sostenibilidad ambiental en la región.

El principal problema identificado en el Vivero Municipal de Tabaconas es la ausencia de un sistema automatizado que permita una gestión precisa y eficiente del riego. Los métodos manuales actualmente utilizados generan un consumo excesivo de agua y pérdidas significativas del recurso, afectando tanto la

productividad del vivero como el equilibrio hídrico local. Entre las causas más relevantes se encuentran la falta de infraestructura tecnológica, la carencia de dispositivos de control automatizado y la limitada capacitación técnica del personal encargado del riego (Shamshiri et al., 2018; Chauhan et al., 2021). Estas limitaciones impiden la adopción de tecnologías IoT que podrían optimizar la distribución y el monitoreo del agua.

Las consecuencias de esta gestión ineficiente del recurso hídrico son notables. A corto plazo, se evidencia una reducción en la productividad y calidad de los plántones debido a la falta de uniformidad en la irrigación. A largo plazo, la situación podría agravarse, incrementando la escasez de agua en la zona, afectando la economía local y comprometiendo los esfuerzos de conservación ambiental (IPCC, 2022). Ante este panorama, resulta indispensable diseñar un sistema de riego automatizado que permita establecer indicadores de desempeño hídrico y sentar las bases para una futura implementación práctica, garantizando la eficiencia, sostenibilidad y resiliencia del vivero frente a los desafíos ambientales actuales.

### **Formulación del problema**

¿Cómo diseñar un sistema de riego automatizado basado en tecnologías IoT que minimice el uso de agua en el Vivero Municipal de Tabaconas, San Ignacio?

## **1.3 Justificación.**

### **1.3.1 Justificación Social**

El diseño de un sistema de riego automatizado basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) en el Vivero Municipal de Tabaconas responde a la necesidad de optimizar el uso del agua, un recurso esencial para la sostenibilidad de la región. Este diseño establece las bases para una mejora futura en la eficiencia del riego, beneficiando tanto a la comunidad como al entorno natural. El vivero cumple un papel fundamental en la conservación de especies vegetales y en los programas de reforestación local, por lo que resulta necesario implementar un enfoque que garantice su productividad y sostenibilidad ambiental. De esta

manera, el proyecto contribuye directamente al bienestar de la población al fortalecer la gestión responsable de los recursos naturales.

### **1.3.2 Justificación Económica**

Desde una perspectiva económica, el diseño propuesto busca establecer un marco de referencia para la futura implementación de un sistema de riego automatizado, con el propósito de mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos y reducir los costos operativos derivados del desperdicio de agua. Este enfoque no solo facilita una gestión más racional del recurso, sino que también puede incrementar la producción de plántones, generando mayores ingresos por su comercialización y promoviendo la autosostenibilidad financiera del vivero a largo plazo.

### **1.3.3 Justificación Ambiental:**

La creciente escasez de recursos hídricos subraya la necesidad de diseñar sistemas que promuevan un uso eficiente del agua. Aunque este estudio se enfoca en la etapa de diseño, sus resultados servirán como guía para futuras implementaciones orientadas a reducir el impacto ambiental de las actividades agrícolas en Tabaconas. Un sistema capaz de ajustar el riego en función de las necesidades reales de las plantas y de las condiciones climáticas contribuirá a preservar los ecosistemas locales, fomentar prácticas agrícolas sostenibles y fortalecer los esfuerzos de conservación ambiental en la región.

### **1.3.4 Justificación Tecnológica:**

La integración de tecnologías IoT en el diseño de un sistema de riego automatizado representa un avance relevante para la modernización agrícola en Tabaconas. El diseño plantea la posibilidad de implementar sistemas de monitoreo en tiempo real de las condiciones del suelo y del riego, permitiendo una toma de decisiones basada en datos confiables. Esta propuesta fortalece las competencias técnicas del personal del vivero, mejora la eficiencia operativa y promueve la digitalización de los procesos agrícolas, contribuyendo a un manejo más profesional, sostenible y tecnológicamente avanzado del recurso hídrico.

### **1.3.5 Justificación práctica:**

La justificación práctica se sustenta en la aplicabilidad del diseño propuesto. Aunque la investigación no implica una implementación inmediata, el sistema de riego automatizado diseñado constituye una solución viable y replicable para mejorar la gestión hídrica del vivero. El modelo integra sensores y actuadores que, al ser implementados, permitirán reducir el esfuerzo manual del personal, optimizar los tiempos de riego y asegurar una irrigación uniforme y oportuna. Además, servirá como referencia técnica para proyectos similares en otros viveros municipales o comunidades agrícolas, demostrando la utilidad práctica y escalabilidad de la propuesta.

### **1.3.6 Justificación metodológica:**

Desde el punto de vista metodológico, la investigación se justifica por la aplicación de un enfoque integral mixto que combina métodos cualitativos y cuantitativos para analizar la situación actual y plantear una solución técnica viable. El diseño se apoya en la revisión de literatura científica, en la entrevista a responsables del vivero y en el dimensionamiento de componentes tecnológicos, garantizando rigurosidad y coherencia en el proceso investigativo. Asimismo, el uso de modelos de simulación y herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) permite validar el funcionamiento esperado del sistema, otorgando solidez, precisión y confiabilidad a los resultados. Esta metodología puede ser replicada y adaptada en futuros estudios orientados a optimizar sistemas agrícolas en contextos rurales y sostenibles.

## **1.4 Hipótesis.**

El diseño de un sistema de riego automatizado basado en tecnologías IoT permite minimizar el uso del agua en el Vivero Municipal de Tabaconas, San Ignacio, al ajustar automáticamente el suministro de agua según las necesidades específicas de las plantas

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

Diseñar un Sistema de Riego Automatizado Basado en Tecnologías de Internet de las Cosas en el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- ✓ Definir los parámetros actuales del sistema de riego en el Vivero Municipal de Tabaconas, San Ignacio.
- ✓ Dimensionar el sistema de riego automatizado basado en IoT.
- ✓ Evaluar la viabilidad técnica y económica del sistema automatizado de riego.

## **II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Objeto de estudio:**

El objeto de estudio de la presente investigación es el diseño de un sistema de riego automatizado basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), aplicado al Vivero Municipal de Tabaconas. Este vivero constituye un espacio estratégico para la conservación, producción y repoblación de especies forestales y ornamentales en la región, siendo fundamental para los programas de reforestación y el fortalecimiento de la sostenibilidad ambiental.

La investigación se centra en establecer las bases técnicas y metodológicas que permitan, en un futuro, la implementación de un sistema de riego eficiente que optimice el uso del agua, incremente la productividad del vivero y promueva prácticas agrícolas modernas y sostenibles adaptadas al contexto rural de Tabaconas.

### **2.2 Ubicación geográfica del área de estudio.**

El área de estudio se localiza en el Vivero Municipal de Tabaconas, distrito de Tabaconas, provincia de San Ignacio, región Cajamarca, en el norte del Perú. Esta zona se caracteriza por un clima templado-húmedo, con temperaturas que oscilan entre 15 °C y 22 °C, y con precipitaciones concentradas principalmente en la temporada de lluvias (de noviembre a abril).

El vivero se ubica en un entorno estratégico para la producción de especies vegetales destinadas a proyectos de conservación y reforestación en la cuenca del río Tabaconas y en zonas aledañas, contribuyendo directamente al desarrollo ambiental, social y económico de la comunidad local.

## Figura 1

*Ubicación geográfica del distrito de Tabaconas*



*Nota.* Se señala en color amarillo la localización del distrito de Tabaconas, provincia de San Ignacio, donde se encuentra el vivero objeto de estudio.

[https://www.familysearch.org/es/wiki/San\\_Ignacio,\\_Cajamarca,\\_Per%C3%BA\\_-\\_Genealog%C3%ADa](https://www.familysearch.org/es/wiki/San_Ignacio,_Cajamarca,_Per%C3%BA_-_Genealog%C3%ADa)

### 2.3 Métodos

Se empleó un método descriptivo y exploratorio, según lo definido por Hernández, Fernández y Baptista (2014), el cual permite analizar y caracterizar fenómenos sin manipular las variables del entorno, obteniendo información detallada sobre la situación actual del sistema de riego en el Vivero Municipal de Tabaconas.

Este método fue elegido por su pertinencia para estudios técnicos de diagnóstico y diseño, ya que permite identificar problemáticas reales, definir requerimientos técnicos y plantear soluciones de ingeniería basadas en evidencias observadas.

#### **2.4 Diseño del Estudio:**

El estudio se desarrolló bajo un diseño no experimental de tipo transversal, consistente en recopilar y analizar información en un único momento temporal, sin alterar las condiciones naturales del vivero.

Este diseño facilitó la descripción de la infraestructura existente, la evaluación de la eficiencia hídrica actual y la formulación del diseño técnico del sistema automatizado. Se aplicaron técnicas de observación directa, entrevistas estructuradas al personal técnico y revisión documental de registros y planos operativos del vivero.

#### **2.5 Población:**

La población de estudio estuvo conformada por las áreas de cultivo y especies vegetales producidas en el vivero, así como por el personal encargado del riego y mantenimiento del sistema. Estos elementos representan la totalidad de las unidades de análisis sobre las cuales se proyecta la aplicación del sistema automatizado.

#### **2.6 Muestra:**

La muestra fue el área de las ocho camas de especies vegetales que actualmente se produce en el vivero y el personal técnico responsable del riego, con el propósito de recopilar información sobre los procedimientos actuales, las limitaciones identificadas y los requerimientos técnicos para el diseño propuesto.

#### **2.7 Muestreo:**

Se aplicó un muestreo no probabilístico por conveniencia, dado que la selección de las áreas de cultivo y del personal del vivero se realizó según su accesibilidad y relevancia para los objetivos del estudio. Esta técnica permitió obtener información específica y contextualizada, útil para el diseño del sistema automatizado y adaptable a las condiciones reales del vivero.

## 2.8 Variables, operacionalización y definición conceptual y operacional

### Variable independiente (VI).

Diseño del sistema automatizado de riego basado en IoT.

### Variable dependiente (VD).

Eficiencia del uso del agua en el sistema de riego automatizado.

## 2.9 Operacionalización de variables

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

| Variable   | Dimensiones               | Indicadores  | Definición Conceptual   | Definición Operacional   |
|--|---------------------------|--|---|--|
| Diseño del sistema automatizado de riego basado en IoT.          | Configuración de hardware | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Tipos y número de sensores IoT</li> <li>➤ Tipo de microcontrolador</li> <li>➤ Componentes del sistema de riego</li> </ul>               | Conjunto de componentes y mecanismos que permiten la automatización del proceso de riego para optimizar la distribución de agua en el vivero. | Especificación del diseño que incluye sensores de humedad, válvulas de control y un sistema de programación que automatiza el riego según las necesidades del suelo.                   |
| Eficiencia del uso del agua en el sistema de riego automatizado. | Consumo de agua           | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Volumen de agua por ciclo de riego</li> <li>➤ Frecuencia de activación del riego</li> <li>➤ Cantidad total de agua utilizada</li> </ul> | Medida en la que el sistema de riego utiliza el agua de manera óptima para maximizar la cobertura de riego y minimizar el desperdicio.        | Relación entre la cantidad de agua suministrada y la cantidad de agua realmente absorbida por el suelo, evaluada a través de mediciones de consumo y cobertura en el sistema simulado. |

Fuente: Elaboración Propia.

## 2.10 Procedimiento:

## **A. Definición de los parámetros actuales del sistema de riego en el Vivero Municipal de Tabaconas, San Ignacio.**

- **Revisión documental**

Se realizó una revisión documental con el propósito de identificar información técnica referida al sistema de riego del Vivero Municipal de Tabaconas. Para ello, se solicitaron reportes de mantenimiento, registros operativos y documentos administrativos vinculados a la gestión del recurso hídrico.

Sin embargo, durante el proceso de recopilación se constató que no existen registros institucionales sistematizados sobre el riego en el vivero. Ante esta situación, se procedió a registrar la información disponible de manera indirecta, mediante entrevistas al personal encargado y observación en campo.

Para el tratamiento de la información se emplearon fichas de registro y una matriz de análisis documental, en las cuales se consignó la información obtenida oralmente y aquella observada durante las visitas técnicas.

- **Entrevistas con el personal encargado**

Con el objetivo de complementar la información derivada de la revisión documental, se realizaron entrevistas estructuradas al personal responsable del riego y mantenimiento del Vivero Municipal de Tabaconas. Estas entrevistas permitieron recabar información relacionada con las actividades operativas, los procedimientos de riego empleados y las condiciones generales de manejo del recurso hídrico.

Para la elaboración del instrumento de entrevista se diseñó un cuestionario estructurado, el cual fue sometido a validación mediante juicio de expertos en las áreas de ingeniería agrícola, gestión ambiental y producción agroforestal. La validación consideró criterios de coherencia, pertinencia y claridad, obteniéndose la aprobación para su aplicación (véanse Anexos A, B y C).

## Figura 2

*Aplicación de entrevista estructurada al personal encargado del vivero.*



*Nota:* La imagen muestra el proceso de levantamiento de información mediante entrevista dirigida al personal responsable del riego. Fotografía tomada durante la visita técnica al Vivero Municipal de Tabaconas (2025).

- **Estimación del consumo actual de agua**

Con la finalidad de determinar el consumo de agua utilizado en las labores de riego del vivero, se realizó la medición del caudal en la tubería de abastecimiento proveniente de la captación localizada en la quebrada Guayaquil. Esta actividad permitió obtener el valor promedio de caudal disponible para el sistema. La estimación del caudal se llevó a cabo mediante el método de volumen - tiempo, el cual consiste en medir el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido con el flujo de agua en condiciones normales de operación. Para ello, se empleó un balde de 20 litros de capacidad y un cronómetro digital para el registro del tiempo.

Posteriormente, se registró el tiempo promedio de riego manual por módulo y el número total de módulos atendidos, con el fin de calcular el volumen total de agua empleado durante una jornada típica. La determinación del volumen se efectuó mediante la siguiente relación:

$$Q_T = Q \times t \times n$$

donde:

$Q_T$ : volumen total de agua (L)

$Q$ : caudal promedio (L/min)

$t$ : tiempo de riego por módulo (min)

$n$ : número de módulos

Finalmente, se expresaron los valores obtenidos en unidades de volumen por día y se convirtieron a metros cúbicos, con el propósito de facilitar su análisis y comparación con los periodos de riego observados en distintas épocas del año,

### Figura 3

*Medición del caudal mediante el método de volumen–tiempo*



*Nota:* La imagen muestra el proceso de recolección y medición de agua en un recipiente de volumen conocido para determinar el caudal de abastecimiento. Fotografía propia (2025).

- **Definición de requerimiento técnicos del sistema**

Para la definición de los requerimientos técnicos del sistema de riego, se integró la información obtenida durante la revisión documental, las entrevistas estructuradas y la estimación del consumo actual de agua. Este proceso se complementó con una evaluación en campo orientada a identificar las características físicas y operativas del sistema existente.

La evaluación incluyó la inspección visual de la infraestructura hidráulica, la medición de longitudes y diámetros de tuberías, la identificación de puntos de distribución y el registro de la disposición espacial de las áreas de riego. Las dimensiones del área de producción fueron verificadas mediante cinta métrica, y los puntos principales de captación, conducción y distribución fueron georreferenciados con GPS portátil.

Con la información recopilada, se elaboró una matriz de requerimientos técnicos, en la cual se organizaron los aspectos funcionales y operativos necesarios para el diseño del sistema automatizado de riego.

- **Identificación del componente hidráulico del sistema**

Para caracterizar el componente hidráulico del sistema de riego del vivero, se llevó a cabo una inspección técnica en campo orientada a identificar y registrar los elementos de captación, conducción y distribución del agua. Esta actividad permitió reconocer la configuración física del sistema y los componentes involucrados en el suministro hídrico hacia las áreas de producción.

La inspección consistió en el recorrido de la línea hidráulica desde el punto de captación hasta las áreas de descarga, registrándose características como diámetros de tubería, longitudes, tipo de conexiones, ubicación de derivaciones y métodos de distribución aplicados. Las mediciones fueron realizadas mediante cinta métrica, mientras que la ubicación de los puntos clave se determinó mediante GPS portátil. La información recogida fue registrada en hojas de campo y posteriormente organizada en una matriz descriptiva, utilizada para el diseño del sistema automatizado.

## **B. Dimensionar el sistema de riego automatizado basado en IoT.**

- **Selección de componentes IoT:**

Para el dimensionamiento del sistema de riego automatizado basado en tecnologías IoT, se partió del diagnóstico del sistema de riego actualmente utilizado en el Vivero Municipal de Tabaconas, identificando los requerimientos hidráulicos y electrónicos necesarios para garantizar su funcionamiento. A partir de esta caracterización, se establecieron los criterios de desempeño para cada subsistema, considerando caudal, presión de operación, durabilidad de los materiales, precisión en la medición de variables, compatibilidad eléctrica y capacidad de integración dentro de una arquitectura IoT.

Con base en dichos criterios, se realizó la evaluación de alternativas comerciales disponibles en el mercado nacional, priorizando componentes con alta confiabilidad, disponibilidad de soporte técnico y facilidad de mantenimiento. Para ello, se consultaron proveedores especializados como HTS Perú (instrumentación y sensores para riego), IESTA SAC (accesorios y tuberías para riego tecnificado), ACORSA Perú (tuberías y conexiones hidráulicas), ASOCIE Perú (módulos y equipos de automatización y control), PROMART (bombas y accesorios hidráulicos) y Riego Tecnificado Perú (válvulas, microaspersores y sistemas de distribución).

La comparación técnica de las opciones disponibles permitió seleccionar los componentes que mejor se ajustan a los requerimientos hidráulicos y electrónicos definidos, asegurando su integración operativa dentro del sistema de riego automatizado basado en IoT en el Vivero Municipal de Tabaconas.

### **Sensor de Humedad del Suelo**

Para la selección del sensor de humedad del suelo destinado al sistema de riego automatizado, se realizó una evaluación técnica basada en las condiciones de operación del Vivero Municipal de Tabaconas. Para ello, se consideraron las características del sustrato utilizado en los módulos de producción, la profundidad radicular promedio de los plantones y los rangos de humedad requeridos para mantener un adecuado desarrollo vegetativo.

Asimismo, se establecieron criterios funcionales de selección, entre los cuales se incluyeron la estabilidad de lectura en condiciones de campo, la resistencia a la humedad, la compatibilidad eléctrica con el microcontrolador de control central y el consumo energético del dispositivo.

Con el propósito de identificar la opción más adecuada, se efectuó una revisión técnico - documental de los sensores de humedad comúnmente empleados en sistemas de riego agrícola. La información obtenida de las fichas técnicas de fabricantes, manuales de operación y literatura especializada fue sistematizada en una matriz comparativa, a fin de analizar de manera ordenada sus características y alcances funcionales.

**Tabla 2**

*Tipos de sensores de humedad del suelo considerados en la evaluación técnica*

| Nº | Tipo de sensor                                | Principio de funcionamiento                                      | Rango de medición                | Características principales   |
|----|---|--|----------------------------------|---|
| 1  | Resistivo (FC-28, YL-69)                      | Variación de resistencia eléctrica entre electrodos              | 0–100 %<br>humedad<br>relativa   | Económicos, pero con desgaste acelerado por corrosión; requieren mantenimiento periódico.                   |
| 2  | Capacitivo (v1.2, DFRobot, SEN0193)           | Variación de capacitancia según contenido de agua en el sustrato | 0–100 %<br>humedad<br>relativa   | Mayor estabilidad y resistencia a la humedad; bajo consumo energético; adecuada compatibilidad electrónica. |
| 3  | FDR (Reflectometría en dominio de frecuencia) | Medición de constante dieléctrica del suelo                      | 0–80 %<br>humedad<br>volumétrica | Alta precisión; costo medio–alto; calibración especializada.  |

Considerando las condiciones específicas del vivero y los criterios de desempeño establecidos, se seleccionó el sensor capacitivo de humedad del suelo v1.2 como la alternativa más adecuada para el diseño del sistema. Este sensor ofrece mayor estabilidad de medición frente a variaciones de humedad, cuenta con un recubrimiento protector que reduce el riesgo de corrosión y proporciona una señal analógica continua que facilita su calibración y procesamiento. Asimismo, permite una integración directa con el microcontrolador Arduino Mega 2560 R3, asegurando una operación confiable y sostenible del sistema automatizado.

Si bien los sensores FDR presentan una precisión superior, su costo y requerimientos de calibración avanzada limitan su viabilidad para una implementación a escala municipal. Por su parte, los sensores resistivos fueron descartados debido a su baja vida útil en ambientes húmedos. En consecuencia, el sensor capacitivo v1.2 constituye la mejor opción técnica y económica para garantizar la eficiencia hídrica y confiabilidad del sistema de riego en el Vivero Municipal de Tabaconas.

#### **Figura 4**

*Sensor de humedad del suelo capacitivo v1.2 utilizado en el prototipo.*



*Nota:* El sensor capacitivo proporciona mediciones estables y vida útil prolongada, lo que favorece la operación del sistema de riego automatizado.

### Bomba de impulsión de agua

Para determinar la bomba de impulsión adecuada para el sistema de riego automatizado, se realizó una evaluación técnico - hidráulica basada en los requerimientos de caudal y presión del sistema de microaspersión del Vivero Municipal de Tabaconas. Este proceso consideró el caudal requerido para el riego simultáneo de las camas de producción, la presión mínima necesaria para asegurar la correcta operación de los emisores, y las pérdidas de carga en las tuberías de captación, conducción y distribución. Adicionalmente, se incluyeron criterios operativos como la compatibilidad con el sistema de control automatizado mediante válvulas solenoides y la disponibilidad energética del vivero.

Para la comparación de alternativas, se recopilaron fichas técnicas y curvas características de diferentes tipos de bombas empleadas en sistemas de riego agrícola, las cuales fueron organizadas en una matriz comparativa. Esta matriz permitió analizar la capacidad de cada tipo de bomba para satisfacer los requerimientos hidráulicos del sistema, así como sus ventajas, limitaciones y adecuación a las condiciones del vivero. La Tabla 5 muestra la síntesis del análisis realizado.

**Tabla 3**

*Tipos de bombas para riego en vivero y sus características*

| Nº | Tipo de bomba                                 | Rango típico de presión | Caudal típico   | Ventajas                                      | Limitaciones                            | Adecuación al proyecto                   |
|----|---|-------------------------|-----------------|---|---|--|
| 1  | Diafragma<br>12 V DC                          | 0.5–1.2 bar             | 5–15<br>L/min   | Bajo consumo y compatible con energía solar   | Flujo pulsante y vida útil limitada     | Adecuada solo para riego localizado      |
| 2  | Centrífuga periférica (superficie)<br>220 VAC | 1.5–3.0 bar             | 20–60<br>L/min  | Económica y de fácil instalación              | Requiere cebado y sensible a sedimentos | Adecuada para pequeñas áreas             |
| 3  | Centrífuga multietapa (superficie)<br>220 VAC | 2.5–5.0 bar             | 60–150<br>L/min | Proporciona presión estable y caudal uniforme | Costo medio–alto                        | Adecuada para módulos completos de riego |

|   |                         |             |             |  |                                       |   |
|---|-------------------------|-------------|-------------|--|---------------------------------------|---|
| 4 | Sumergible              | 1.5–4.0 bar | 20–80 L/min | No requiere cebado y opera dentro del reservorio | Mantenimiento en sitio reducido       | Adecuada en sistemas con pozo o cisterna profunda |
| 5 | Solar DC sin escobillas | 1.0–2.5 bar | 10–40 L/min | Aprovecha energía renovable                      | Requiere mayor capacidad fotovoltaica | Adecuada para sistemas solares autónomos          |

Considerando las necesidades hidráulicas del sistema - riego simultáneo de las tres camas de un módulo ( $\approx 100$  L/min con emisores de 40 L/h) y presión de trabajo de 1.5 a 2.0 bar en los microaspersores - se seleccionó una bomba centrífuga multietapa de 1.5 HP (220 VAC), con curva característica igual o superior a 100 L/min a 30 mca. Esta configuración asegura: (i) el caudal y la presión requeridos para garantizar uniformidad de aplicación de agua; (ii) compatibilidad con el accionamiento automático mediante válvulas solenoides y relé/MOSFET; (iii) estabilidad hidráulica en los tres ramales del módulo; y (iv) posibilidad de operación autónoma futura mediante sistema fotovoltaico e inversor dimensionado adecuadamente.

### Figura 5

*Bomba centrífuga multietapa seleccionada para el sistema de riego.*



**Nota:** La bomba seleccionada asegura presión estable y compatibilidad con el accionamiento automatizado mediante válvulas solenoides.

### Controlador del sistema.

La selección del controlador central del sistema de riego automatizado se realizó considerando los requerimientos de operación del vivero, particularmente la cantidad de sensores y actuadores a integrar en cada módulo de riego. Para ello, se identificaron las necesidades de número de entradas y salidas digitales para el accionamiento de válvulas solenoides y bomba, así como las entradas analógicas necesarias para la lectura de sensores de humedad del suelo y caudal. Además, se consideró la disponibilidad de buses de comunicación (UART, I<sup>2</sup>C y SPI) para la conexión de módulos de transmisión de datos y posibles expansiones futuras.

Con el fin de analizar alternativas viables, se efectuó una revisión técnica de diferentes plataformas de control empleadas en sistemas de automatización agrícola. La información recopilada de fichas técnicas, documentación de fabricantes y literatura especializada fue organizada en una matriz comparativa, permitiendo evaluar cada alternativa según su capacidad de expansión, compatibilidad con sensores y actuadores, facilidad de programación y costos de implementación y mantenimiento. La Tabla 6 presenta la síntesis del análisis comparativo realizado.

**Tabla 4**

*Tipos de controladores y sus características para riego automatizado*

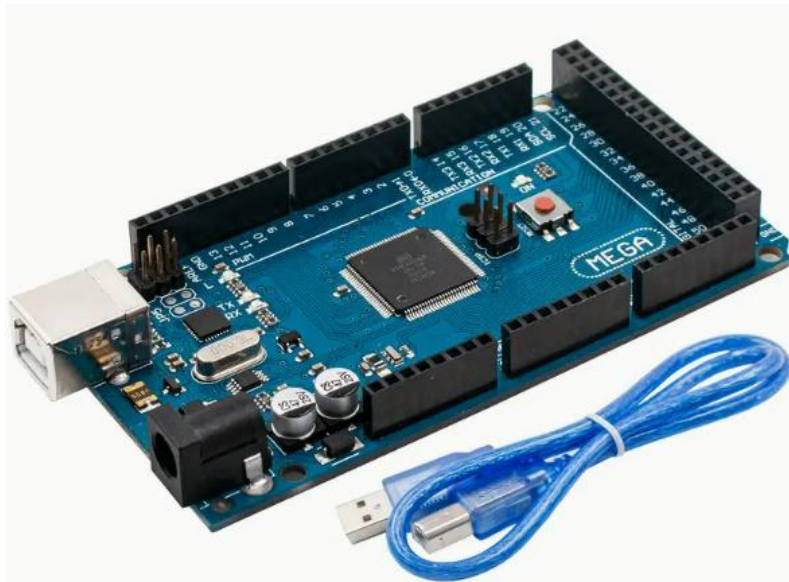
| N° | Controlador                       | E/S y ADC                                      | Comunicaciones                         | Ventajas  | Limitaciones  | Adecuación al proyecto                                     |
|----|-----------------------------------|--|--|---|---|--|
| 1  | Arduino Uno (ATmega328P)          | 14 DIO (6 PWM), 6 ADC / 10 bit                 | 1×UART, I <sup>2</sup> C, SPI          | Económico y de fácil uso                        | Pocas entradas analógicas y memoria limitada                  | Adecuado solo para prototipos simples                      |
| 2  | Arduino Mega 2560 R3 (ATmega2560) | 54 DIO (15 PWM), 16 ADC / 10 bit, 256 KB Flash | 4×UART, I <sup>2</sup> C, SPI          | Amplia capacidad de expansión y operación a 5 V | Sin conectividad inalámbrica integrada                        | Adecuado para sistemas con múltiples sensores y actuadores |
| 3  | ESP32                             | 30–34 GPIO, ADC 12 bit                         | Wi-Fi/BLE, UART, I <sup>2</sup> C, SPI | Conectividad inalámbrica integrada              | Requiere adaptación de nivel (3.3 V) y configuración avanzada | Apropiado cuando se prioriza telemetría avanzada           |

|   |              |   |  |                                       |   |  |
|---|--------------|---|--|---------------------------------------|---|--|
| 4 | STM32 Nucleo | GPIO amplia, ADC 12–16 bit                      | UART, I <sup>2</sup> C, SPI, CAN       | Alta precisión en medición y potencia | Desarrollo más complejo                     | Adecuado para sistemas avanzados                     |
| 5 | PLC compacto | Entradas y salidas industriales, AI/AO opcional | RS-485/Modbus, Ethernet (según modelo) | Alta robustez y operación industrial  | Costo elevado y mantenimiento especializado | Adecuado para instalaciones industriales permanentes |

Con base en esta evaluación, se seleccionó la plataforma Arduino Mega 2560 R3 como controlador central del sistema, debido a su amplia disponibilidad de entradas y salidas, su compatibilidad directa con sensores y módulos de potencia a 5 V, y su facilidad de programación mediante el entorno Arduino IDE. Estas características permiten implementar la lógica de control por histéresis definida para el riego automatizado, garantizar una operación estable en campo y facilitar futuras ampliaciones en el vivero sin modificar la arquitectura principal del sistema.

### Figura 6

*Controlador seleccionado integrado en el prototipo de riego automatizado.*



*Nota:* La selección del controlador garantiza la lectura simultánea de sensores y el accionamiento seguro de la bomba y válvulas, permitiendo además la integración de comunicación IoT mediante módulo Bluetooth.

## Interfaz de comunicación

Para la definición de la interfaz de comunicación del sistema de riego automatizado, se analizaron los requerimientos de supervisión, control y transmisión de datos entre el controlador principal y los módulos de campo. Este análisis consideró el alcance físico del vivero, la disponibilidad de infraestructura de red, las condiciones de interferencia electromagnética asociadas a la operación de la bomba y válvulas solenoides, así como la necesidad de permitir mantenimiento y monitoreo local sin depender de conexión a Internet. Para ello, se revisaron alternativas de comunicación cableada e inalámbrica comúnmente empleadas en sistemas agrícolas y automatización distribuida.

La información técnica de cada interfaz (protocolos, topologías, consumo energético, alcance y robustez) fue organizada en una matriz comparativa, elaborada a partir de fichas técnicas de fabricantes, manuales de implementación y bibliografía especializada en comunicaciones industriales. Esta matriz permitió evaluar la pertinencia operativa de cada alternativa en función de su adecuación a las características del vivero y a la arquitectura del sistema de control propuesto. La Tabla 7 presenta el resumen del análisis realizado.

**Tabla 5**

*Interfaces de comunicación consideradas en la evaluación técnica*

| Nº | Interfaz            | Medio / Capa                   | Alcance típico | Topología           | Ventajas  | Limitaciones                             | Adecuación al proyecto                        |
|----|---------------------|--------------------------------|----------------|---------------------|---|--|---|
| 1  | RS-485 (Modbus RTU) | Par trenzado, señal diferencia | Hasta 1200 m   | Bus maestro-esclavo | Alta robustez frente a ruido, bajo costo, adecuada para campo | Requiere cableado y terminación          | Adecuada para red de campo entre módulos      |
| 2  | Bluetooth HC-05     | Inalámbrico 2.4 GHz            | 10–20 m        | Punto a punto       | Fácil configuración y útil para mantenimiento local           | Alcance reducido y sensible a obstáculos | Adecuada para monitoreo y diagnóstico in situ |

|   |                       |                       |                        |                      |  |  |  |
|---|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|--|--|--|
| 3 | Wi-Fi (vía ESP32)     | Inalámbrico 2.4/5 GHz | 30–80 m por AP         | Estrella             | Permite dashboards y telemetría            | Requiere infraestructura estable y mayor consumo | Útil si el vivero dispone de red Wi-Fi       |
| 4 | LoRa/LoRaWAN          | Inalámbrico sub-GHz   | 0.5–2 km               | Estrella con gateway | Largo alcance y bajo consumo               | Baja tasa de datos y hardware adicional          | Viable para expansiones a parcelas distantes |
| 5 | GSM/4G (LTE-M/NB-IoT) | Red celular           | Cobertura del operador | Punto–nube           | Monitoreo remoto sin infraestructura local | Costos de datos y dependencia del operador       | Adecuada para alertas y telemetría remota    |

Con base en el análisis realizado, se adoptó RS-485 con protocolo Modbus RTU para la comunicación entre el controlador principal y los módulos de riego, debido a su alta inmunidad al ruido, bajo costo de implementación y alcance adecuado para la extensión del vivero. La implementación se definió mediante transceptores MAX485, cableado de par trenzado apantallado y terminación con resistencias de 120  $\Omega$ , asegurando estabilidad del enlace y minimizando interferencias eléctricas. Complementariamente, se integró el módulo Bluetooth HC-05 como interfaz de mantenimiento local para la supervisión del sistema mediante dispositivos móviles, permitiendo visualizar humedad, caudal y estado del sistema sin necesidad de conexión a Internet. Finalmente, se consideró la posibilidad de incorporar GSM/4G para telemetría remota en fases futuras, sin alterar la estructura de control principal.

### Figura 7

*Interfaz de comunicación seleccionada para el sistema de riego automatizado.*



### Driver de potencia

Para definir el driver de potencia adecuado para el sistema de riego automatizado, se analizaron las características eléctricas de las cargas presentes en el vivero, particularmente las válvulas solenoides de 12 VDC y la bomba centrífuga de 220 VAC. El procedimiento de evaluación consideró aspectos como la corriente de arranque de las cargas, la necesidad de aislamiento eléctrico entre el microcontrolador y los dispositivos de potencia, la inmunidad al ruido electromagnético producido por bobinas y motor, y la facilidad de mantenimiento en el contexto operativo del vivero municipal. Asimismo, se tuvo en cuenta la compatibilidad del driver con la plataforma de control seleccionada y la confiabilidad requerida para el accionamiento repetitivo de los componentes hidráulicos.

Para ello, se realizó una revisión técnica de diferentes tecnologías de drivers comúnmente utilizadas en sistemas de automatización agrícola y control de cargas eléctricas. La información procedente de fichas técnicas, experiencias de implementación y manuales de operación fue organizada en una matriz comparativa, permitiendo evaluar las ventajas, limitaciones y adecuación de cada alternativa frente a las condiciones del sistema de riego. La Tabla 8 presenta el análisis comparativo desarrollado.

**Tabla 6**

*Tipos de drivers de potencia considerados en la evaluación técnica*

| Nº | Driver / Tecnología                             | Cargas típicas             | Ventajas                               | Limitaciones                                     | Adecuación al proyecto                    |
|----|---|----------------------------|--|--|---|
| 1  | MOSFET canal N<br>“logic-level” + diodo flyback | Solenoides y cargas 12 VDC | Alta eficiencia y conmutación rápida   | Requiere protección adecuada contra transitorios | Adecuado para maniobra de válvulas 12 VDC |
| 2  | Módulo relé 5 V (optoacoplado)                  | AC/DC hasta 10 A           | Fácil integración y aislamiento básico | Desgaste mecánico en                             | Útil solo como interfaz de control        |

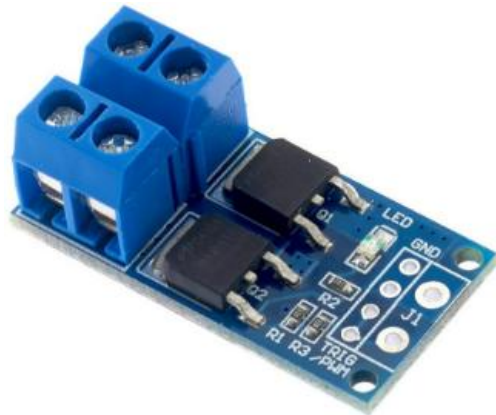
|   |  |                        |  |   |  |
|---|--|------------------------|--|---|--|
|   |  |                        |  | cargas inductivas                                       |  |
| 3 | Relé de estado sólido (SSR) para AC              | Cargas AC moderadas    | Silencioso y sin partes móviles          | Pérdida en conducción y selección según tipo de carga   | Adecuado para mando de cargas AC con baja exigencia    |
| 4 | Contactador magnético AC-3 con relé/SSR de mando | Motor 220 VAC          | Alta robustez frente a picos y arranques | Mayor costo y volumen                                   | Adecuado para control de bomba en sistemas hidráulicos |
| 5 | Puente H / PWM                                   | Motores DC reversibles | Permite control de velocidad/sentido     | No aplicable cuando solo se requiere conmutación ON/OFF | No necesario en este diseño                            |

Tras el análisis, se adoptó una arquitectura mixta. Para la maniobra de las válvulas solenoides de 12 VDC, se seleccionó un MOSFET canal N “logic-level” (AOD4184A) con protección mediante diodo flyback y supresor de transientes TVS, además de optoacoplador para garantizar aislamiento respecto al controlador. Esta configuración asegura baja disipación, conmutación rápida y larga vida útil. Para el accionamiento de la bomba centrífuga multietapa de 220 VAC (1.0–1.5 HP), se definió el uso de un contactor magnético AC-3, cuyo mando se realiza mediante un relé o SSR controlado desde el Arduino, incorporando protección adicional mediante guardamotor térmico y snubber para mitigar transientes.

La instalación considera separación física entre circuitos de señal y potencia, masa en estrella, uso de par trenzado para bobinas, cajas IP65 y fusibles por canal, garantizando seguridad, confiabilidad y mantenibilidad del sistema. Esta configuración permite una operación estable en condiciones reales de campo y asegura la compatibilidad con el esquema de control propuesto.

## Figura 8

*Driver de potencia seleccionado para el accionamiento de válvulas y bomba.*



*Nota:* El driver debe garantizar aislamiento eléctrico, protección contra transitorios y fiabilidad en maniobras repetitivas en campo.

## Módulo Relay

Para definir el módulo relay destinado al accionamiento de los módulos de riego, se analizaron las características eléctricas y operativas del sistema de automatización, particularmente la necesidad de aislamiento entre el microcontrolador (Arduino Mega 2560 R3) y los dispositivos de campo. El análisis consideró el número de salidas de control requeridas, la capacidad de corriente y tensión de los contactos para maniobra de cargas de mando, la susceptibilidad a interferencia electromagnética generada por la bomba y las válvulas solenoides, así como la facilidad de cableado y mantenimiento dentro del tablero de control.

Con este propósito, se realizó una revisión comparativa de diferentes opciones de módulos relay disponibles comercialmente, organizando sus características técnicas en una matriz de análisis. La matriz permitió evaluar cada alternativa en función de la capacidad de aislamiento, topología de disparo, durabilidad, y posibilidad de escalamiento del sistema hacia más módulos en el futuro. La Tabla 7 presenta el resumen del análisis realizado.

**Tabla 7***Opciones de módulos relay consideradas en la evaluación técnica*

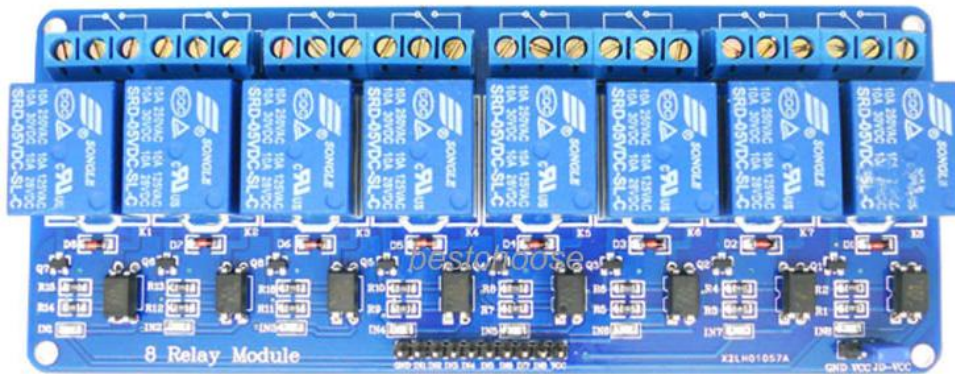
| N <sup>o</sup> | Opción   | Canales | Entrada mando              | Contacto/salida                    | Ventajas  | Limitaciones  | Adecuación al proyecto                                   |
|----------------|--|---------|----------------------------|------------------------------------|---|---|--|
| 1              | Relay electromecánico o optoacoplado (8 canales, 5 V, Low-Level Trigger) | 8       | 5 V con aislamiento JD-Vcc | 10 A/250 VAC o 10 A/30 VDC (NO/NC) | Aislamiento galvánico, económico, fácil integración con Arduino, señalización por LED | Desgaste mecánico en maniobra intensiva               | Adecuado para habilitación de módulos y señales de mando |
| 2              | Banco SSR AC 8 canales   | 8       | 3–32 VDC                   | 2–25 A AC (según modelo)           | Sin partes móviles, operación silenciosa  | Mayor costo y pérdidas por conducción                 | Adecuado solo cuando todas las cargas son AC             |
| 3              | Módulo transistor/MOSFET 8 canales                                       | 8       | 5 V                        | 12–24 VDC                          | Conmutación rápida y sin desgaste   | No conmutan cargas AC y pueden carecer de aislamiento | Adecuado únicamente para cargas DC de baja potencia      |

En función de los requerimientos del sistema, se seleccionó un módulo relay electromecánico optoacoplado de 8 canales, 5 V, con disparo por nivel bajo (Low-Level Trigger) y alimentación aislada JD-Vcc. Esta alternativa garantiza compatibilidad directa con el Arduino Mega 2560 R3, proporciona aislamiento galvánico por canal y permite direccionar cada módulo de riego mediante salidas independientes (CH1...CH8). Es importante señalar que estos relés no conmutan directamente la carga de potencia de la bomba, sino que actúan sobre la bobina de un contactor magnético, asegurando protección y vida útil adecuada en la operación de motores AC.

Como prácticas de instalación se estableció mantener separación entre circuitos de señal y potencia, el uso de snubber o MOV para bobinas AC y diodos flyback en bobinas DC, así como la incorporación de fusibles por canal y bornes identificados para facilitar el mantenimiento. Este esquema garantiza escalabilidad, seguridad y confiabilidad en la operación del sistema de riego en el vivero.

**Figura 9**

*módulo relay de 8 canales 5 V optoaislado.*



*Nota:* El módulo de 8 relés actúa como interfaz de mando; la carga de la bomba es conmutada siempre mediante un contactor magnético.

### **Sensor de flujo de agua**

Para la selección del sensor de flujo de agua del sistema de riego automatizado, se evaluaron los requerimientos hidráulicos del vivero, especialmente el caudal promedio utilizado durante el riego de cada módulo, la estabilidad de la señal de medición y la compatibilidad con el controlador del sistema (Arduino Mega 2560 R3). El análisis consideró aspectos como el rango de caudal de operación, la pérdida de carga que introduce el sensor en la línea, la facilidad de integración eléctrica (señal digital por pulsos), la resistencia del dispositivo frente a partículas finas y la disponibilidad de modelos de bajo costo para aplicaciones municipales. Con este propósito, se revisaron diferentes tecnologías de medición de caudal empleadas en sistemas agrícolas y automatizados, recopilando información técnica, fichas de fabricante y referencias de instalación. La información fue organizada en una matriz comparativa para analizar las ventajas, limitaciones y condiciones de uso de cada alternativa en el contexto del vivero. La Tabla 8 presenta el resumen del análisis realizado.

**Tabla 8***Tipos de sensores de caudal considerados en la evaluación técnica*

|   |  |  |  |   |
|---|--|--|--|---|
| 1 | Turbina con efecto Hall (series FS/YF) | Giro de turbina con imán + captor Hall; salida digital por pulsos proporcional al caudal | 1–120 L/min según diámetro ( $\frac{3}{4}$ "–1") | Económicos, baja pérdida de carga, señal compatible con microcontroladores; requieren filtración y tramos rectos. |
| 2 | Electromagnético (magmeter)            | Inducción electromagnética proporcional a la velocidad del flujo                         | 0.1–300+ L/min                                   | Alta precisión y sin partes móviles; requiere conductividad mínima y alimentación 24 V; costo elevado.            |
| 3 | Ultrasónico clamp-on                   | Diferencia en tiempo de tránsito ultrasónico   | Amplio según tubería                             | No intrusivo y de fácil instalación; sensible a burbujas y perfiles de flujo; alto costo.                         |
| 4 | Vórtice                                | Frecuencia de desprendimiento de vórtices  | Medio–alto                                       | Robusto en industria; exige tramos rectos largos y presión mínima; costo medio–alto.                              |
| 1 | Turbina con efecto Hall (series FS/YF) | Giro de turbina con imán + captor Hall; salida digital por pulsos proporcional al caudal | 1–120 L/min según diámetro ( $\frac{3}{4}$ "–1") | Económicos, baja pérdida de carga, señal compatible con microcontroladores; requieren filtración y tramos rectos. |

Durante la etapa de prototipado se empleó el modelo FS300A ( $\frac{3}{4}$ "); sin embargo, considerando que el diseño definitivo contempla un caudal aproximado de 75 L/min en la operación de un módulo completo, se seleccionó para la implementación el sensor de turbina con efecto Hall FS400A de 1", con capacidad de operación en el rango de 60–120 L/min. Este modelo ofrece una señal digital por pulsos directamente interpretable mediante interrupciones del Arduino Mega 2560 R3, presenta una baja pérdida de carga y mantiene un costo accesible para la escala municipal. La señal generada permite calcular el caudal instantáneo y el volumen aplicado, así como detectar condiciones de falla como obstrucciones o ausencia de flujo durante el riego.

## Figura 10

*Sensor de flujo tipo turbina Hall instalado en la línea principal, aguas arriba de las válvulas del módulo.*



*Nota:* El sensor seleccionado debe operar con señal TTL de 5 V, mantener baja pérdida de carga y cubrir el caudal de diseño previsto para el sistema.

## Microaspersión

Para la definición del sistema de microaspersión en el riego automatizado del vivero, se evaluaron las condiciones agronómicas de los plántones en producción, la geometría de las camas (1 m de ancho) y la necesidad de garantizar una distribución uniforme del agua en toda la superficie de cultivo. El análisis consideró el caudal requerido por planta, el radio efectivo de mojado, la presión de operación necesaria para asegurar el desempeño adecuado de los emisores, y las pérdidas permitidas en la red hidráulica del módulo. Asimismo, se tomó en cuenta la compatibilidad del sistema de microaspersión con la automatización del riego mediante válvulas solenoides y medición de caudal.

Con el propósito de seleccionar el tipo de microaspersor más adecuado, se revisaron diferentes modelos utilizados en viveros y sistemas agrícolas de producción intensiva. La información se recopiló mediante fichas técnicas de fabricantes, literatura especializada y experiencias de campo en sistemas similares, organizándose posteriormente en una matriz comparativa. Este análisis permitió evaluar la eficiencia de distribución, facilidad de instalación, mantenimiento y costo operativo. La Tabla 11 presenta el resumen del análisis realizado.

**Tabla 9***Tipos de microaspersores considerados en la evaluación técnica*

| N° | Tipo de microaspersor             | Caudal típico (L/h) | Radio nominal (m) | Presión de servicio (bar) | Características principales   |
|----|-----------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|---|
| 1  | 360° sobre estaca (boquilla fija) | 20–60               | 0.4–1.0           | 1.0–2.0                   | Mojado uniforme en patrón circular; adecuado para tramas 1×1 m; fácil instalación y mantenimiento.  |
| 2  | 180° / 90° (borde / esquina)      | 20–50               | 0.4–0.8           | 1.0–2.0                   | Permite cobertura direccional para bordes; reduce pérdidas fuera de la cama.                        |
| 3  | Compensado de presión (PC)        | 25–50               | 0.4–0.8           | 1.5–3.0                   | Mantiene caudal constante incluso con variaciones de presión; mejora uniformidad en ramales largos. |
| 4  | Con válvula anti-drenaje (AD)     | 20–50               | 0.4–1.0           | 1.5–2.5                   | Evita vaciamiento de líneas y encharcamiento al apagado; útil en instalaciones con desnivel.        |
| 5  | Regulable (boquilla ajustable)    | 0–70                | 0–1.0             | 1.0–2.0                   | Permite ajuste fino de caudal y radio; requiere calibración frecuente y mayor supervisión.          |

Considerando la distribución uniforme requerida en camas de 1 m, la compatibilidad con la presión de operación del sistema (1.5–2.0 bar) y la facilidad de mantenimiento, se seleccionaron microaspersores de 360° de 30 L/h, con radio efectivo de mojado aproximado de 0.5 m, instalados sobre estacas con trama 1×1 m, complementados con boquillas de 180° en los bordes para evitar pérdidas fuera del área de cultivo. Esta configuración asegura una cobertura homogénea, facilita la sectorización mediante válvulas solenoides y se integra adecuadamente con el sensor de caudal para la verificación del volumen aplicado. Para mantener la uniformidad de aplicación, se recomienda la incorporación de filtración de malla 120 en cabecera y purgas terminales en los laterales del módulo.

## **Figura 11**

*Microaspersores 360° de 30 L/h instalados en cama de 1 m con trama 1×1 m.*



*Nota:* Para asegurar uniformidad de aplicación se recomienda filtración de malla 120 y purgas terminales en los ramales laterales.

## **Cables jumper**

Para la etapa de montaje y pruebas del prototipo del sistema de riego automatizado, se utilizaron cables jumper como elementos de interconexión entre el microcontrolador Arduino Mega 2560 R3, los sensores, y los módulos de actuación. Estos cables permitieron establecer conexiones de señal y alimentación de baja tensión de manera ordenada y flexible, facilitando la integración de los componentes electrónicos durante el desarrollo experimental del sistema. Su empleo resultó fundamental para la construcción del prototipo funcional previo al montaje definitivo en tablero.

Los cables jumper seleccionados correspondieron a configuraciones hembra - macho y macho-macho, con una longitud estándar de 20 cm, lo cual posibilitó su uso sobre protoboard y terminales tipo pin header. Su estructura con conectores plásticos de ajuste permitió evitar falsos contactos y asegurar la estabilidad de la señal durante el proceso de pruebas. La información relevante de los cables jumper utilizados se presenta en la Tabla 10.

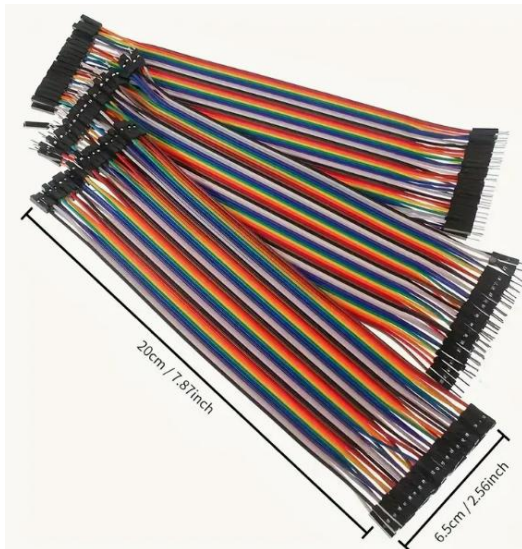
**Tabla 10**

Características de los Cables Jumper

| Nº | Característica        | Especificación  |
|----|-----------------------|---|
| 1  | Tipo de cable         | Jumper hembra–macho y macho–macho                       |
| 2  | Longitud              | 20 cm   |
| 3  | Coloración            | Variada, para facilitar la identificación de conexiones |
| 4  | Aplicación            | Interconexión de señales y alimentación en baja tensión |
| 5  | Compatibilidad        | Protoboard, Arduino Mega 2560 R3, sensores y módulos    |
| 6  | Seguridad de conexión | Conectores plásticos de ajuste seguro                   |
| 7  | Ventajas              | Reutilizables, económicos y fáciles de instalar         |
| 8  | Limitaciones          | No aptos para manejo de potencia elevada                |

**Figura 12**

*Cables jumper utilizados para la interconexión de sensores y módulos en la etapa de prototipado.*



*Nota:* Los cables jumper permiten realizar ajustes rápidos y seguros durante el montaje experimental del sistema, garantizando continuidad de señal y orden en el cableado.

## **Batería de 12V**

Para asegurar el suministro continuo de energía durante la operación del prototipo del sistema de riego automatizado, se utilizó una batería recargable de 12 V como elemento de almacenamiento energético. La batería permitió alimentar la bomba de agua, los actuadores y los sensores electrónicos durante la fase de pruebas, manteniendo la autonomía del sistema incluso en períodos sin radiación solar directa. La selección de la batería se realizó considerando la demanda energética del sistema, la duración de los ciclos de riego y la capacidad necesaria para mantener la operación estable sin interrupciones.

La información técnica del modelo seleccionado fue obtenida a partir de su ficha de especificaciones y validada mediante el cálculo de autonomía requerido para un ciclo completo de riego. Se verificó su compatibilidad con el panel solar empleado como fuente de generación y con el controlador de carga, garantizando un proceso de recarga seguro y eficiente. La Tabla 11 presenta las características principales de la batería utilizada en el prototipo.

**Tabla 11**

Características de la Batería de 12 V

| <b>N°</b> | <b>Característica</b>  | <b>Especificación</b>                                |
|-----------|------------------------|--|
| 1         | Tipo de batería        | Recargable, ciclo profundo                           |
| 2         | Voltaje nominal        | 12 V   |
| 3         | Capacidad              | 25 Ah  |
| 4         | Marca / Modelo         | CAFINI CN-DC26200QS                                  |
| 5         | Método de recarga      | Panel solar de 18 V – 40 W                           |
| 6         | Autonomía estimada     | 1 ciclo completo de riego                            |
| 7         | Aplicación principal   | Alimentación de bomba, relés, controlador y sensores |
| 8         | Compatibilidad         | Sistemas de automatización y monitoreo IoT           |
| 9         | Ventajas               | Portátil, eficiente y adecuada para zonas rurales    |
| 10        | Recomendaciones de uso | Utilizar con controlador de carga para protección    |

### **Figura 13**

*. Batería recargable de 12 V – 25 Ah empleada en el prototipo del sistema de riego automatizado.*



*Nota:* La batería de 12 V garantiza la autonomía energética del prototipo, permitiendo alimentar la bomba, el módulo relay y los sensores incluso en condiciones de baja disponibilidad eléctrica.

### **Panel solar de 40 W**

Para el suministro autónomo de energía del prototipo del sistema de riego automatizado, se empleó un panel solar policristalino de 40 W como fuente primaria de generación eléctrica. La selección de este panel se realizó con base en la disponibilidad de radiación solar en la zona de Tabaconas y en la necesidad de garantizar la recarga continua de la batería de 12 V encargada de alimentar el microcontrolador, los sensores y los actuadores del sistema. La información técnica del panel fue obtenida a partir de su ficha de características y verificada para asegurar su compatibilidad con el controlador de carga utilizado en el prototipo.

El panel solar se integró al sistema mediante un controlador de carga de 12 V, encargado de regular el proceso de transferencia energética hacia la batería y protegerla contra sobrecargas y descargas profundas. Durante el montaje, se consideró la orientación y exposición solar del área de instalación, evitando sombras parciales y asegurando un aprovechamiento eficiente de la radiación. La caracterización del panel empleado se presenta en la Tabla 12.

**Tabla 12**

Características del Panel Solar de 40 W

| N° | Característica        | Especificación                                 |
|----|-----------------------|--|
| 1  | Tipo de celda         | Policristalina                                 |
| 2  | Potencia nominal      | 40 W   |
| 3  | Voltaje de salida     | 18 V   |
| 4  | Corriente nominal     | ~2.2 A   |
| 5  | Compatibilidad        | Baterías de 12 V mediante controlador de carga |
| 6  | Dimensiones           | Compacto y portátil                            |
| 7  | Aplicación principal  | Recarga de batería del sistema de riego IoT    |
| 8  | Ventajas              | Energía renovable, autónoma y sostenible       |
| 9  | Limitaciones          | Dependencia de radiación solar disponible      |
| 10 | Ubicación recomendada | Áreas abiertas con plena exposición solar      |

**Figura 14**

*Panel solar de 40 W utilizado en el sistema de riego automatizado.*



*Nota:* El panel solar de 40 W asegura la recarga continua de la batería de 12 V, proporcionando autonomía energética y reforzando el enfoque sostenible del prototipo.

### **Infraestructura de conexión y control**

Para la interconexión y control de los componentes electrónicos del prototipo, se empleó una infraestructura básica compuesta por elementos de comunicación,

distribución de energía y montaje de circuitos. El cable USB tipo B permitió establecer la conexión entre el microcontrolador Arduino Mega 2560 R3 y la computadora portátil, facilitando la programación y verificación en tiempo real de la lógica de control mediante el entorno Arduino IDE. Asimismo, se utilizó una protoboard como superficie de montaje temporal, lo que permitió realizar modificaciones y ajustes en el circuito sin necesidad de soldadura permanente durante la fase de pruebas.

El suministro eléctrico se realizó mediante un interruptor de dos pines conectado a un enchufe de 220 V, utilizando cable eléctrico calibre 14 AWG para garantizar seguridad y estabilidad en la conducción. Esta infraestructura permitió integrar los componentes electrónicos de manera ordenada, asegurando la operatividad y seguridad del sistema durante su fase experimental.

### **Subsistema hidráulico de distribución de agua**

El prototipo incorporó una red hidráulica construida con materiales de uso común en instalaciones agrícolas y domésticas, con el fin de asegurar disponibilidad local y facilidad de mantenimiento. La red se conformó mediante tubería de PVC, reducciones de  $\frac{3}{4}$ " a  $\frac{1}{2}$ ", uniones mixtas y codos de  $\frac{1}{2}$ ", permitiendo la conexión entre el sensor de flujo FS400A y los microaspersores que representan el punto de aplicación de agua. La selección de estos componentes consideró criterios de resistencia a la presión, durabilidad, compatibilidad entre diámetros y facilidad de montaje.

Este subsistema permitió reproducir condiciones similares a las previstas en la implementación definitiva, posibilitando la evaluación del comportamiento hidráulico y del control automatizado del riego.

### **Implementos de instalación y seguridad**

Para la protección y organización del sistema se utilizó una caja de paso de  $20 \times 15 \times 8$  cm, destinada a alojar los componentes electrónicos y protegerlos de la humedad y contacto accidental. Se empleó cinta aislante y precintos para el ordenamiento de conductores, así como cinta de teflón en las conexiones hidráulicas para evitar fugas. Asimismo, las uniones permanentes entre componentes electrónicos fueron aseguradas mediante soldadura con estaño, garantizando estabilidad mecánica y conducción eléctrica adecuada.

Estos implementos resultaron esenciales para mantener la operatividad y seguridad del prototipo durante su montaje y pruebas.

### **Diseño del Sistema de Control**

El diseño del sistema de control se planteó con el propósito de automatizar el proceso de riego mediante la integración de sensores, un microcontrolador central y actuadores hidráulicos, aplicando una lógica de control con histéresis basada en la humedad del suelo. Este enfoque permitió asegurar un uso eficiente del agua y evitar ciclos repetitivos de activación y desactivación del sistema.

#### ➤ **Estructura general del sistema**

La estructura general del sistema se organizó en tres niveles integrados que operan de forma coordinada:

##### **Nivel de sensado:**

Se consideró la instalación de sensores capacitivos de humedad del suelo v1.2 en las camas de cultivo, y de un sensor de flujo tipo turbina FS400A (1") en la línea principal de riego. Estos dispositivos permiten monitorear en tiempo real la disponibilidad de humedad en el sustrato y verificar la continuidad del caudal durante el riego.

##### **Nivel de control:**

Se definió el uso del microcontrolador Arduino Mega 2560 R3 como unidad central, debido a su capacidad para manejar múltiples señales de entrada y salida. La lógica de control se basa en umbrales de humedad: activación cuando la humedad es menor al 40 % y desactivación cuando supera el 60 %. Para la supervisión local, se integró el módulo Bluetooth HC-05, operando bajo el protocolo UART.

##### **Nivel de actuación:**

Se estableció el accionamiento de una bomba centrífuga multietapa de 1.5 HP y válvulas solenoides de 12 VDC para la sectorización del riego. El control eléctrico se realizó mediante un módulo relé optoaislado de 8 canales y un driver MOSFET canal N, asegurando aislamiento entre señal y potencia.

➤ **Plataforma, protocolo IoT y aplicación utilizada**

Para el diseño del sistema de supervisión y control del riego, se seleccionó una arquitectura IoT de alcance local, con el fin de permitir el monitoreo en tiempo real sin depender de infraestructura de red externa. En este sentido, se definió la plataforma Arduino Mega 2560 R3 como unidad de procesamiento central, debido a su capacidad para gestionar múltiples señales de entrada y salida, y su compatibilidad con los sensores y actuadores seleccionados. Para la comunicación inalámbrica entre el sistema y el usuario se empleó el módulo Bluetooth HC-05, el cual opera mediante el protocolo UART, permitiendo el envío y recepción de datos de forma estable y con bajo consumo energético.

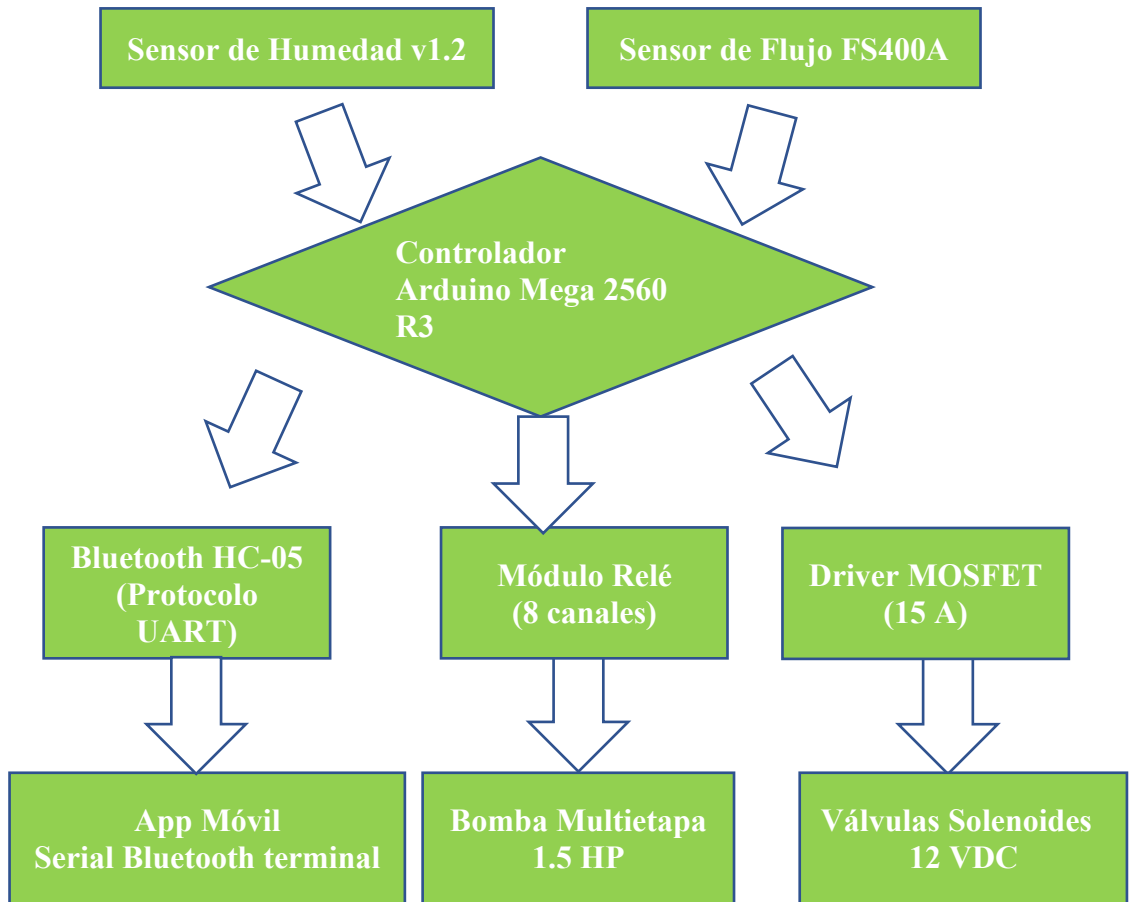
La supervisión del sistema se estableció a través de la aplicación móvil Serial Bluetooth Terminal (Android), mediante la cual el usuario puede visualizar el nivel de humedad del suelo, el estado de la bomba y las válvulas solenoides, así como ejecutar comandos de control local. La elección de esta modalidad de IoT local se fundamentó en las condiciones del Vivero Municipal de Tabaconas, donde no se dispone de red Wi-Fi estable, por lo que la comunicación Bluetooth asegura una operación autónoma, confiable y acorde a las posibilidades tecnológicas del entorno. Este esquema de control garantiza una operación confiable, autónoma y adaptable a las condiciones del vivero, promoviendo la eficiencia hídrica y energética del sistema automatizado.

➤ **Implementación del control IoT**

La lógica de control se desarrolló bajo un esquema de retroalimentación con histéresis, leyendo continuamente la humedad del sustrato. Cuando la humedad es menor al 40 %, el sistema activa la bomba y las válvulas; cuando supera el 60 %, las desactiva. Durante el riego, el sensor FS400A verifica el flujo para detectar posibles obstrucciones. Los datos se envían a la interfaz móvil por Bluetooth, permitiendo supervisión directa sin necesidad de Internet.

**Figura 15**

*Diagrama general del sistema de control de riego automatizado basado en IoT.*



*Nota:* Se muestra la relación entre los sensores, el controlador Arduino Mega 2560 R3, los módulos de potencia hidráulica y la interfaz IoT mediante Bluetooth para supervisión local.

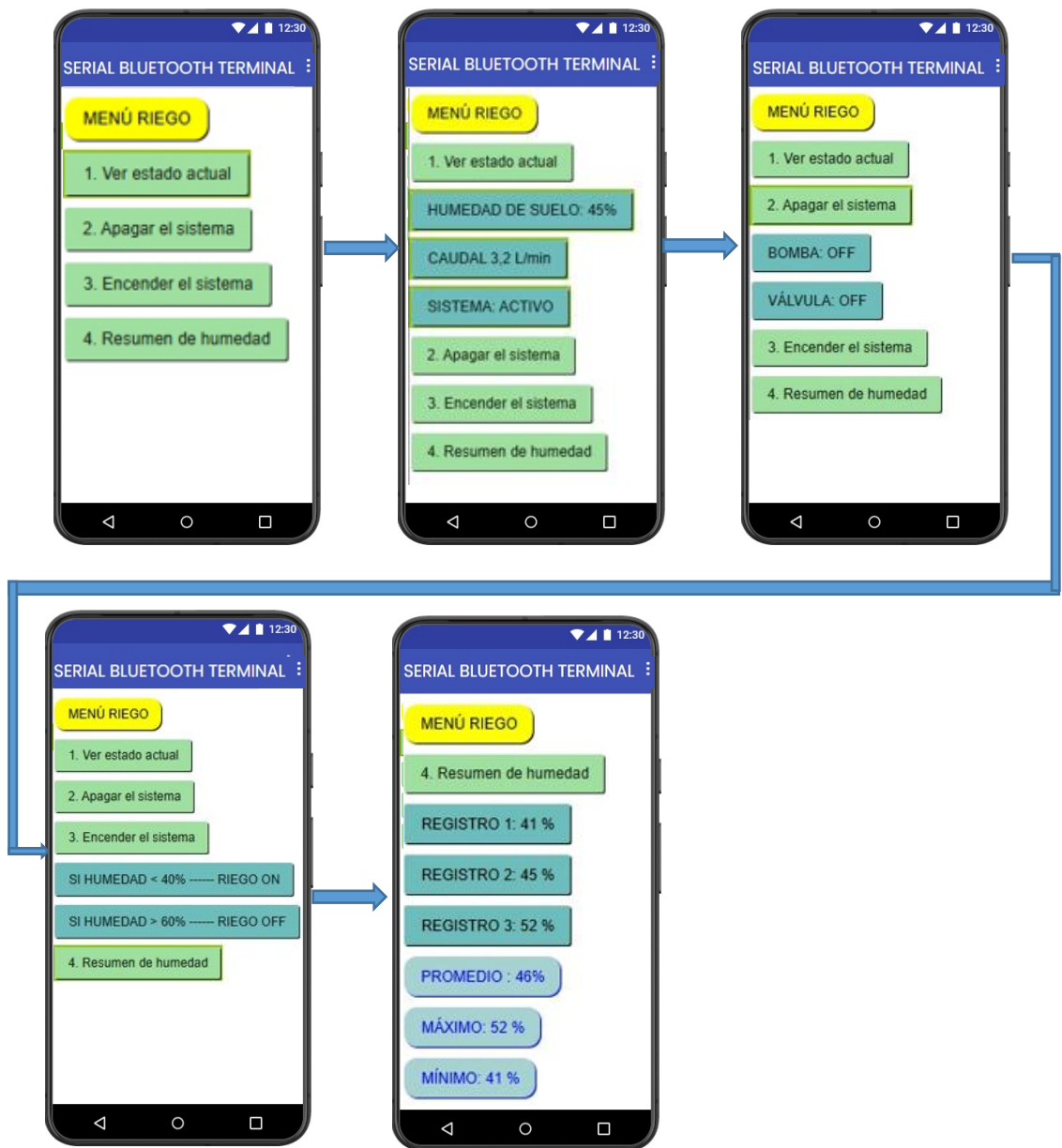
➤ **Interfaz IoT de monitoreo y control**

La interfaz IoT del sistema permite la supervisión local mediante la aplicación Serial Bluetooth Terminal, disponible de forma gratuita para dispositivos Android, desde la cual el usuario puede visualizar en tiempo real las variables operativas del sistema, incluyendo el porcentaje de humedad promedio del suelo, el caudal instantáneo, el volumen acumulado de agua aplicada, y el estado actual de la bomba y de cada válvula solenoide. Asimismo, la aplicación muestra mensajes de diagnóstico como alertas de humedad fuera de rango, ausencia de flujo, fallas de comunicación o activación manual del riego, permitiendo al operador ejecutar acciones de control como encendido y apagado de la bomba,

activación individual de válvulas o reinicio del sistema. La comunicación mediante el módulo Bluetooth HC-05 garantiza una operación autónoma en el vivero, donde no existe infraestructura Wi-Fi, ofreciendo un medio simple, accesible y confiable para el monitoreo y la gestión del sistema desde cualquier teléfono Android con conectividad Bluetooth habilitada.

**Figura 16**

*interfaz móvil para el monitoreo y control del sistema de riego mediante Bluetooth.*



### **C. Evaluación de la viabilidad técnica y económica del sistema automatizado de riego**

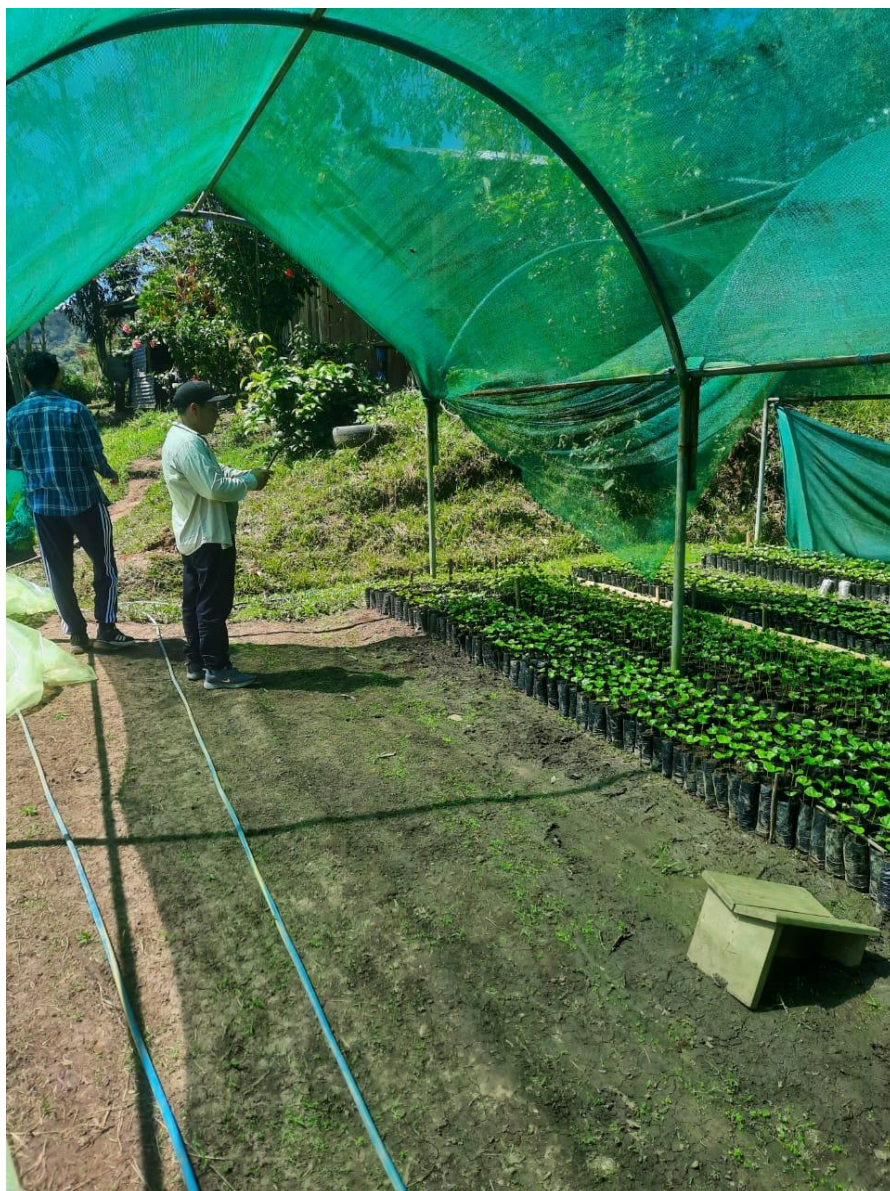
- **Evaluación de recursos técnicos y humanos:**

La evaluación de los recursos técnicos y humanos se realizó con el propósito de determinar las condiciones operativas del Vivero Municipal de Tabaconas para la posible implementación del sistema de riego automatizado. Para ello, se efectuó una visita técnica en campo, acompañada de observación directa, registro fotográfico y entrevistas breves al personal responsable del riego. En esta inspección se verificó el método manual actualmente empleado, las fuentes de abastecimiento, la ausencia de infraestructura eléctrica y la falta de conectividad a redes de comunicación. Ante esta condición, se estableció que el sistema de riego debía considerar una fuente autónoma de energía mediante paneles solares y batería recargable, además de una interfaz de supervisión local a través de comunicación Bluetooth (HC-05), lo que permite el funcionamiento del sistema sin depender de conexión a Internet o red eléctrica pública.

En cuanto a los recursos humanos, se identificó que el personal del vivero desarrolla las labores de riego basándose en experiencia empírica y sin capacitación previa en sistemas automatizados. No obstante, se evidenció disposición para recibir orientación en el funcionamiento y mantenimiento básico del sistema. Por tal motivo, el diseño del control prioriza una interfaz de operación sencilla, la aplicación de una lógica de histéresis para la activación y desactivación del riego, y el uso de módulos y componentes fácilmente reemplazables en campo. En conjunto, estas consideraciones permiten plantear una implementación técnicamente viable y operativamente sostenible en el vivero, siempre que se contemple la instalación de la infraestructura mínima (tablero IP65 y soporte para paneles solares) y un programa básico de capacitación al personal encargado.

## Figura 17

### *Estado actual del Vivero Municipal de Tabaconas*



*Nota:* Actualmente el riego se realiza de manera manual y sin soporte de infraestructura eléctrica o de comunicaciones, lo que fundamenta la necesidad de un sistema autónomo con energía solar y supervisión local.

- **Elaboración del presupuesto detallado:**

Para determinar la viabilidad económica del diseño del sistema de riego automatizado, se elaboró un presupuesto detallado correspondiente a los componentes electrónicos, elementos hidráulicos, materiales de instalación y actividades de montaje. Para ello, se identificaron primero los dispositivos y equipos requeridos de acuerdo con el diseño técnico desarrollado (Arduino Mega 2560 R3, válvulas solenoides 12 VDC, sensor de caudal FS400A, bomba centrífuga multietapa, módulos relé, panel solar y batería). Posteriormente, se recopilaron costos referenciales mediante cotizaciones de proveedores locales y distribuidores en línea del mercado nacional. Finalmente, los costos fueron organizados en tablas para su análisis y posterior planificación de implementación por etapas o módulos. Asimismo, se consideraron los costos de instalación y el mantenimiento preventivo anual, debido a que la sostenibilidad operativa del sistema depende de actividades periódicas como calibración de sensores, revisión de conexiones eléctricas y limpieza de microaspersores. La estructura presupuestal se divide en cuatro categorías: componentes electrónicos e hidráulicos, materiales para la instalación, mano de obra técnica y mantenimiento preventivo. Esta organización permite visualizar las inversiones necesarias y facilita la programación económica de la implementación en el vivero.

**Tabla 13**

*Presupuesto de los materiales hidráulicos y eléctricos*

| <b>Descripción</b>                           | <b>Unidad</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Costo unitario (S/)</b> | <b>Costo total (S/)</b> |
|--|---------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|
| Arduino Mega 2560 R3 (compatible)            | und           | 1               | 80                         | 80                      |
| Bomba centrífuga multietapa 1.5 HP – 220 VAC | und           | 1               | 750                        | 750                     |
| Válvula solenoide 12 VDC ¾" (NC)             | und           | 8               | 24                         | 192                     |

|   |     |   |     |      |
|---|-----|---|-----|------|
| Módulo relé 8 canales, 5 V,<br>optoacoplado | und | 1 | 35  | 35   |
| Driver MOSFET 15 A<br>(AOD4184A)            | und | 1 | 6   | 6    |
| Sensor de flujo FS400A 1"<br>(pulsos)       | und | 1 | 70  | 70   |
| Sensores de humedad capacitivos<br>v1.2     | und | 8 | 12  | 96   |
| Contactador 2P AC-3 + relay/SSR de<br>mando | set | 1 | 50  | 50   |
| Guardamotor 1.6–2.5 A (3P)                  | und | 1 | 76  | 76   |
| Fuente 12 VDC 10 A                          | und | 1 | 60  | 60   |
| Batería 12 V 25 Ah (VRLA/GEL)               | und | 1 | 150 | 150  |
| Tablero/caja IP65 ~300×250×155<br>mm        | und | 1 | 120 | 120  |
| Módulo Bluetooth HC-05                      | und | 1 | 27  | 27   |
| SubTotal                                    |     |   |     | 1712 |

**Tabla 14**

*Presupuesto del costo de instalación*

| Descripción   | Unidad | Cantidad | Costo<br>unitario (S/) | Costo total (S/) |
|---|--------|----------|------------------------|------------------|
| Microaspersores 30 L/h (360°)                       | und    | 1200     | 2                      | 2400             |
| Filtro malla 120 en cabecera                        | und    | 1        | 85                     | 85               |
| Accesorios PVC (tees, codos,<br>válv. bola, purgas) | lote   | 1        | 400                    | 400              |
| Colector 1" y laterales ¾–1"<br>(PVC presión)       | lote   | 1        | 600                    | 600              |
| Cableado y canalización<br>BT/señal                 | lote   | 1        | 400                    | 400              |
| Caja(s) de paso y conectores IP                     | lote   | 1        | 200                    | 200              |
| Subtotal  |        |          |                        | 4085             |

**Tabla 15***Presupuesto de los componentes principales*

| <b>Descripción</b>                                  | <b>Unidad</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Costo<br/>unitario (S/)</b> | <b>Costo total<br/>(S/)</b> |
|---|---------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Mano de obra técnica<br>(montaje completo)          | jornada       | 8               | 120                            | 960                         |
| Materiales auxiliares (teflón,<br>fijaciones, etc.) | lote          | 1               | 50                             | 50                          |
| Transporte y logística local                        | servicio      | 1               | 240                            | 240                         |
| Subtotal  |               |                 |                                | 1250                        |

**Tabla 16***Presupuesto del mantenimiento preventivo anual*

| <b>Descripción</b>                               | <b>Unidad</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Costo<br/>unitario (S/)</b> | <b>Costo<br/>total (S/)</b> |
|--|---------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Revisión eléctrica y conexiones<br>(2 veces/año) | servicio      | 2               | 120                            | 240                         |
| Calibración de sensores y prueba<br>de válvulas  | servicio      | 1               | 180                            | 180                         |
| Limpieza/flush de emisores y<br>reposición menor | lote          | 1               | 200                            | 200                         |
| Subtotal   |               |                 |                                | 620                         |

**Tabla 17***Presupuesto resumen*

| <b>Categoría</b>                                    | <b>Subtotal (S/)</b> |
|---|----------------------|
| A. Componentes electrónicos/hidráulicos<br>(diseño) | 1712                 |
| B. Materiales de instalación                        | 4085                 |
| C. Costos de instalación                            | 1250                 |
| D. Mantenimiento anual                              | 620                  |
| <b>TOTAL GENERAL ESTIMADO</b>                       | <b>7667</b>          |

**Instrumentos**

Se emplearon fichas técnicas y manuales de fabricante de los componentes propuestos (Arduino Mega 2560 R3, sensores de humedad v1.2, sensor de caudal FS400A 1", actuadores, bomba centrífuga multietapa 1.5 HP – 220 VAC, panel solar y batería), catálogos y datasheets para dimensionamiento preliminar, y hojas de cálculo para estimación de costos. Se utilizaron checklists de requisitos (eléctricos, hidráulicos y ambientales) y plantillas de arquitectura (diagramas de bloques y listas de materiales) para asegurar la coherencia del diseño, incluida la sectorización por módulo (8 válvulas 12 VDC y 8 sensores) y la supervisión local vía Bluetooth HC-05 (Serial Bluetooth Terminal).

**Recolección de Datos:**

La recolección se basó en fuentes secundarias y supuestos de diseño: especificaciones de fabricantes, cotizaciones referenciales del mercado peruano, normativas técnicas aplicables y parámetros operativos típicos reportados en literatura. No se realizaron mediciones in situ; los valores de entrada (caudal objetivo, umbrales de histéresis  $H_{min} = 40\%$  y  $H_{max} = 60\%$ , autonomía energética, ciclos de riego) se definieron como escenarios de diseño para dimensionar el sistema. La alimentación de potencia de la bomba se consideró a 220 VAC, reservando el sistema FV/batería para electrónica y válvulas 12 VDC en contextos sin red.

**Análisis de Datos:**

Se efectuó un análisis técnico-analítico del sistema a nivel de diseño: balance de energía para el arreglo fotovoltaico y almacenamiento (enfocado en electrónica/valvulería a 12 VDC), cálculo de cargas y protecciones eléctricas (guardamotor y contactor para bomba 220 VAC; tablero IP65), selección preliminar de sensores/actuadores según rangos y compatibilidades (FS400A por pulsos, relé 5 V optoacoplado, MOSFET AOD4184A), y estimación de pérdidas en conducción hidráulica para cumplir caudal y presión objetivo.

**Consideraciones Éticas:**

Al tratarse de un estudio de diseño sin intervención con personas ni experimentación en campo, no se gestionaron consentimientos. Se respetó la propiedad intelectual de las fuentes (fichas técnicas, catálogos y precios) mediante su referencia y trazabilidad para anexos. Se consideraron criterios de seguridad en el diseño (puesta a tierra, protecciones térmicas/magnéticas, grado IP, rotulado) para minimizar riesgos en una eventual implementación.

**Limitaciones del Estudio:**

El alcance se restringe al nivel de diseño; por tanto: (i) los desempeños hidráulicos y eléctricos son estimados y dependen de condiciones reales de instalación; (ii) no hay validación empírica de campo ni pruebas piloto; (iii) los precios son referenciales y sujetos a variación; (iv) la ausencia de infraestructura en el sitio obliga a suponer soluciones autónomas (FV/baterías) para el subsistema de control y válvulas, cuya performance real puede diferir; y (v) ciertos parámetros (uniformidad de riego, eficiencia operativa) no pueden confirmarse hasta una implementación y prueba controlada. Estas limitaciones se abordan proponiendo una fase piloto por módulo antes del despliegue completo y dejando parametrizados los supuestos para su ajuste con datos reales.

### III. RESULTADOS

#### 3.1 Definición de los parámetros actuales del sistema de riego en el Vivero Municipal de Tabaconas, San Ignacio

##### Revisión Documental

A partir de la revisión documental y las observaciones de campo, se identificó que el sistema de riego del vivero funciona de manera manual, utilizando mangueras conectadas directamente al caudal de una quebrada cercana. No se hallaron registros técnicos relacionados con volumen de agua utilizado, frecuencia de riego o mantenimiento del sistema. Asimismo, se constató el desgaste de tuberías, pérdidas de presión y una distribución irregular del agua, lo que ocasiona diferencias visibles en el crecimiento de los plantones en las áreas de producción.

Estos resultados muestran que la operación depende completamente del personal disponible y que no existen mecanismos de medición ni control hídrico

**Tabla 18**

*Resultados obtenidos de la revisión documental*

| <b>Aspecto evaluado</b>  | <b>Descripción del hallazgo</b>   | <b>Evidencia identificada</b>  |
|--------------------------|---|--|
| Tipo de riego            | El riego se realiza de forma manual mediante mangueras conectadas a un riachuelo.               | Ausencia de sistemas automatizados y dependencia directa del personal operativo. |
| Instrumentos de medición | No se registran dispositivos para medir caudal, tiempo o volumen de agua utilizada.             | Falta de equipos de monitoreo y control de flujo.                                |
| Registros técnicos       | No existen reportes actualizados sobre consumo hídrico, mantenimiento ni programación de riego. | Carencia de archivos técnicos o bases de datos sistematizadas.                   |

|                       |  |   |
|-----------------------|--|---|
| Distribución del agua | La aplicación de agua es heterogénea, variando según la disponibilidad del personal y las condiciones del terreno. | Desigual crecimiento de los plantones en los módulos de producción. |
| Infraestructura       | Las tuberías, mangueras y puntos de conexión presentan desgaste por exposición y uso prolongado.                   | Evidencia visual de deterioro, filtraciones y pérdida de presión.   |

Los resultados de la revisión documental muestran que el vivero no cuenta con registros técnicos ni procedimientos estandarizados para el manejo del riego, lo que evidencia una gestión empírica basada en la experiencia del personal. Esta falta de información sistematizada limita el control del consumo de agua y dificulta la evaluación de eficiencia hídrica. Por tanto, la adopción de un sistema automatizado se vuelve necesaria para establecer parámetros medibles y mejorar el suministro de agua según las necesidades reales del cultivo.

#### - **Entrevistas con el personal encargado**

En la Tabla 19 se presentan los principales resultados obtenidos de la entrevista estructurada aplicada al personal técnico responsable del riego en el Vivero Municipal de Tabaconas. La información recopilada permitió identificar las condiciones operativas actuales, los procedimientos empleados en el riego y las principales limitaciones relacionadas con la gestión del recurso hídrico.

**Tabla 19**

*Resultados de la entrevista al personal encargado del Vivero Municipal*

| Nº | Pregunta   | Respuesta principal  | Observaciones   |
|----|--|--|---|
| 1  | ¿Cuánto tiempo lleva trabajando en el vivero y cuál es su función principal? | Llevo aproximadamente ocho meses trabajando como encargado del riego y mantenimiento de los plantones. | El entrevistado demuestra experiencia práctica y conocimiento operativo.  |
| 2  | ¿Qué tipo de plantas o especies se cultivan actualmente en el vivero?        | Se cultivan principalmente Café, Cacao, Frutales   | Se confirma diversidad de especies con distintos requerimientos hídricos. |

|    |  |  |  |
|----|--|--|--|
|    |  | (cítricos, paltos), arboles maderables.  |  |
| 3  | ¿Cómo se realiza actualmente el riego de las plantas?  | El riego se realiza de forma manual.   | No se dispone de controladores ni sistemas de medición de caudal.            |
| 4  | ¿Con qué frecuencia se realiza el riego por sector o módulo?   | Se riega a diario en época seca y cada dos o tres días en temporada de lluvias.  | La frecuencia depende del clima y disponibilidad de personal.                |
| 5  | ¿De dónde proviene el agua utilizada para el riego?  | De una quebrada Guayaquil, a 10 min aproximadamente.   | No existe reservorio ni sistema de almacenamiento intermedio.                |
| 6  | ¿Existe algún instrumento para medir el caudal o volumen de agua utilizada?                            | No, el riego se hace por observación visual, sin medición de caudal ni tiempo estándar.                                  | Falta de instrumentos básicos para monitoreo hídrico.                        |
| 7  | ¿Qué problemas o dificultades se presentan durante el riego?   | Averías en la bocatoma, interrupción por parte de los dueños de los terrenos por donde pasa las tuberías.                | Se evidencia baja eficiencia y riesgo de déficit hídrico en algunos módulos. |
| 8  | ¿Se realizan mantenimientos preventivos o correctivos del sistema? ¿Con qué frecuencia?                | El mantenimiento es preventivo, cada 8 días.   | No hay planificación ni registro técnico de mantenimientos.                  |
| 9  | ¿Qué consecuencias ha observado cuando no se realiza el riego de forma oportuna?                       | Algunas plantas se marchitan o crecen más lentamente; se pierde parte de la producción.                                  | Se confirma impacto directo del riego irregular en la productividad.         |
| 10 | ¿Considera necesaria la automatización del sistema de riego? ¿Por qué?                                 | Si, disminuye el costo de mano de obra y el riego es más oportuno.   | Reconoce la automatización como una mejora necesaria para la eficiencia.     |
| 11 | ¿Qué beneficios esperaría obtener con un sistema automatizado de riego?                                | Ahorro de agua, menor esfuerzo físico, mejor control del tiempo de riego y uniformidad en el crecimiento de las plantas. | Expectativas alineadas con los objetivos del proyecto.                       |
| 12 | ¿Qué tipo de apoyo o capacitación considera necesaria para el manejo de un nuevo sistema automatizado? | Capacitación en el uso del sistema, manejo de sensores y mantenimiento básico.   | Disposición favorable hacia la capacitación técnica.                         |

La entrevista al personal encargado del riego confirma que el riego se realiza de forma manual, con horarios variables y sin medición del volumen de agua aplicado por cama de cultivo. Esto ocasiona diferencias en la humedad del

sustrato y, en algunos casos, exceso de riego, lo que afecta tanto la calidad del plantón como el consumo del recurso. Asimismo, se identificó una buena disposición para incorporar tecnología, por lo que el sistema automatizado es viable desde el punto de vista operativo y de aceptación del usuario final.

- **Estimación del consumo actual de agua en el vivero**

A partir de las mediciones realizadas en la línea de abastecimiento, se obtuvo un caudal promedio de 18,7 L/min. Se registró además que el tiempo de riego por módulo es de 30 minutos, atendiendo 3 módulos por jornada en condiciones normales de operación. Con estos valores, el caudal total diario estimado de agua utilizada en el riego manual es de:

$$Q_T = 18.7 \times 30 \times 3 = 4488L/día$$

$$Q_T = 4488(10^{-3}m^3)/día$$

$$Q_T = 4.488 m^3/día$$

El consumo de agua en el vivero es elevado y se realiza sin medición o control preciso, lo que genera variabilidad en la aplicación y posibles pérdidas por excedente de riego. Este valor constituye la línea base para contrastar el uso de agua frente al sistema de riego automatizado propuesto.

- **Definición de requerimientos**

Con base en el diagnóstico operativo y de infraestructura realizado en el Capítulo II, se establecieron los requerimientos necesarios para el diseño de un sistema de riego automatizado que permita optimizar el uso del recurso hídrico, mejorar la uniformidad de aplicación del agua y reducir la dependencia del manejo manual. Los requerimientos se agrupan en dos componentes principales: hidráulico y electrónico–automatizado.

**Tabla 20***Requerimientos hidráulicos del sistema de riego*

| <b>Aspecto evaluado</b> | <b>Situación actual</b>   | <b>Requerimiento propuesto</b>  | <b>Efecto esperado</b>                                       |
|-------------------------|---|---|--|
| Captación de agua       | Derivación directa desde una quebrada sin sistema de control.       | Incorporación de válvula de compuerta y rejilla protectora.                       | Mayor seguridad y control del flujo hídrico.                 |
| Conducción principal    | Tuberías de PVC con uniones deterioradas y presencia de sedimentos. | Sustitución por PVC de alta presión con válvulas de control intermedias.          | Menor pérdida de presión y reducción de fugas.               |
| Distribución del agua   | Riego manual con mangueras sin sectorización.                       | Instalación de red fija con válvulas solenoides controladas por microcontrolador. | Distribución uniforme y riego automatizado por sectores.     |
| Medición y control      | Sin instrumentos de monitoreo.                                      | Implementación de caudalímetro y manómetro.                                       | Verificación del rendimiento y detección oportuna de fallas. |

Los requerimientos hidráulicos calculados indican que el sistema necesita un caudal constante para garantizar la uniformidad en la microaspersión. El caudal total requerido por módulo permite determinar el dimensionamiento de la bomba y el diámetro adecuado de tuberías. Esto asegura que la presión de servicio sea suficiente para el funcionamiento eficiente de los microaspersores, evitando pérdidas de carga que puedan generar riego irregular.

**Tabla 21***Requerimientos electrónicos y de automatización*

| <b>Componente</b> | <b>Función</b>                          | <b>Propuesta técnica principal</b>                                    | <b>Resultado esperado</b>   |
|-------------------|---|---|---|
| Sensor de humedad | Detectar el nivel de humedad del suelo. | Instalación de sensores capacitivos v1.2 en cada módulo de plantones. | Activación automática del riego según la humedad real del sustrato. |

|                     |  |   |   |
|---------------------|--|---|---|
| Microcontrolador    | Procesar señales de los sensores y gestionar el control. | Programación con lógica de histéresis (Hmin = 40 %, Hmax = 60 %). | Control estable y eficiente sin encendidos innecesarios.  |
| Válvulas solenoides | Regular el flujo de agua por sector.                     | Conexión directa al sistema de control Arduino Mega 2560 R3.      | Apertura y cierre automático y sincronizado de cada zona. |
| Fuente de energía   | Alimentar el sistema de control y los actuadores.        | Integración de fuente regulada con respaldo mediante panel solar. | Autonomía energética y operación so                       |

Los requerimientos electrónicos permiten establecer cuántos sensores, actuadores y canales de control son necesarios para la automatización del riego. La selección de un microcontrolador con múltiples entradas y salidas, como el Arduino Mega 2560, garantiza la lectura simultánea de sensores de humedad y la operación independiente de las electroválvulas por módulo. Esto facilita la automatización basada en condiciones reales del suelo, mejorando la eficiencia del riego.

#### - **Identificación del componente hidráulico del sistema**

El componente hidráulico del sistema propuesto está conformado por una red fija diseñada para suministrar agua de manera uniforme a los módulos de producción del vivero. Este sistema incluye un punto de captación con protección y control de ingreso, una cisterna para estabilizar el suministro, y una electrobomba encargada de garantizar el caudal y la presión requeridos durante la operación. Asimismo, incorpora un filtro y un regulador de presión para asegurar la calidad del agua y la uniformidad en la aplicación, así como una red de distribución en tubería de PVC de alta presión sectorizada mediante válvulas de control. La aplicación del agua se realiza mediante un sistema de microaspersión, lo que permite alcanzar una cobertura homogénea en el área de desarrollo de los plantones. En conjunto, esta configuración asegura condiciones operativas estables, reduce pérdidas por fugas y favorece la uniformidad en el crecimiento de las plantas.

### 3.2 Dimensionar el sistema de riego automatizado basado en IoT.

#### - Selección de componentes IoT

La Tabla 22 presenta los componentes seleccionados para el sistema, considerando criterios de compatibilidad, durabilidad, bajo consumo energético, seguridad operativa y disponibilidad en el mercado local.

**Tabla 22**

*Selección de componentes IoT del sistema de riego automatizado*

| Componente                                 | Función en el sistema                        | Especificaciones clave                               | Criterio de selección (resultado)   | Integración / Compatibilidad                                 | Resultado esperado  |
|--|--|--|---|--|---|
| Sensor de humedad de suelo capacitivo v1.2 | Medición continua de la humedad del sustrato | ±5 V, salida analógica, PCB recubierto anticorrosión | Lecturas estables y duraderas frente a sensores resistivos; menor mantenimiento | Arduino Mega / ESP32 / ESP8266                               | Activación del riego según humedad real; evita sub o sobre riego. |
| Bomba de agua 12 VDC (½", 800 L/h, 5 m)    | Impulsión y presurización de la red de riego | 12 VDC, 800 L/h, Hmáx 5 m                            | Seguridad eléctrica en 12 V y caudal suficiente para microaspersión             | Relay/MOSFET 15 A; batería 12 V; panel solar 40 W            | Caudal constante y cobertura uniforme.                            |
| Válvula solenoide ¾" (220 VAC, NC)         | Apertura/cierre sectorizado del flujo        | 220 VAC, baja presión, normalmente cerrada           | Configuración "fail-safe" por defecto cerrado; rápida respuesta.                | Controlada vía relay 12 V desde Arduino                      | Sectorización precisa y ahorro de agua.                           |
| Arduino Mega 2560 R3                       | Unidad central de control y lógica           | ATmega2560, 54 I/O (15 PWM), 16 analógicas           | Escalabilidad para múltiples sensores y actuadores                              | Sensores (humedad, flujo), relés, MOSFET, BT HC-05           | Control robusto, flexible y expansible.                           |
| Bluetooth HC-05                            | Supervisión y control local del sistema      | BT 2.0 + EDR, 10 m, comunicación serial TX/RX        | Conectividad simple, económica y confiable                                      | UART con Arduino; aplicación móvil Serial Bluetooth Terminal | Monitoreo y ajustes en tiempo real.                               |
| Driver MOSFET 15 A (AOD4184A)              | Conmutación de potencia DC                   | 5–24 VDC, <10 mΩ, PWM                                | Alta eficiencia, bajo calentamiento y mayor durabilidad frente a relés          | PWM desde Arduino; alimentación 12 VDC                       | Conmutación rápida y confiable de la bomba DC.                    |

|   |   |                                    |  |   |   |
|---|---|------------------------------------|--|---|---|
| Módulo relay 12 VDC optoaislado   | Aislamiento y conmutación de cargas                 | Bobina 12 V; carga hasta 220 VAC   | Seguridad eléctrica y aislamiento entre control y potencia             | Señal 5 V desde Arduino; contactos NC/NO    | Conmutación segura de cargas AC y válvulas. Control preciso del volumen y eficiencia del riego. |
| Sensor de flujo FS300A 3/4" (12 V)  | Medición de caudal y volumen                        | 1–60 L/min, efecto Hall, 5–18 V    | Validación del consumo hídrico real                                    | Pulso digital hacia Arduino; línea PVC 3/4" | Reducción de evaporación y escorrentía.   |
| Microaspersores/goteros regulables  | Emisión localizada y uniforme de agua               | 30–60 L/h; 0.5–2 bar               | Uniformidad de aplicación ajustable por especie y sustrato             | Manguera 1/2", colector PVC 3/4"            | Conexiones seguras y mantenimiento rápido.  |
| Cables jumper   | Interconexión de señal entre módulos                | Hembra–macho / macho–macho, 20 cm  | Montaje ordenado, flexible y de bajo costo.                            | Protoboard/Arduino/módulos                  | Operación continua y confiable del sistema.   |
| Batería 12 V – 25 Ah (ciclo profundo)   | Almacenamiento energético                           | 12 V, alta capacidad de descarga   | Autonomía operativa durante periodos sin radiación solar               | Panel 40 W; controlador de carga 12 V       | Sistema autosuficiente y sostenible.  |
| Panel solar 40 W (18 V)   | Generación de energía renovable                     | Policristalino, ~2.2 A             | Sostenibilidad energética y reducción de dependencia de la red         | Controlador de carga 12 V                   | Reducción de fallas y mayor vida útil del sistema.  |
| Infraestructura y seguridad (protoboard, caja de paso, switch, teflón, uniones PVC) | Protección, orden y soporte estructural del sistema | Caja IP65 20×15×8 cm; cable 14 AWG | Seguridad eléctrica, facilidad de mantenimiento y limpieza del montaje | Integración eléctrica e hidráulica          |   |

La selección de los componentes IoT responde a criterios de eficiencia energética, disponibilidad local y facilidad de mantenimiento. El uso de sensores capacitivos asegura la detección estable de la humedad del sustrato, mientras que la integración de un módulo Bluetooth permite supervisión local sin necesidad de conexión a Internet. Asimismo, la incorporación de energía solar contribuye a la sostenibilidad y autonomía del sistema en zonas rurales sin acceso a red eléctrica.

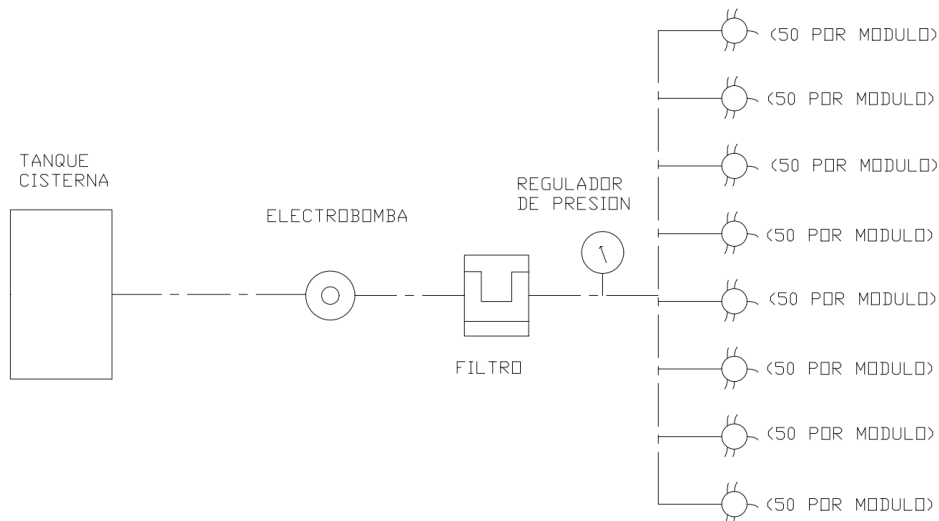
### - Diseño del sistema hidráulico del riego automatizado

Como resultado del diagnóstico de las condiciones actuales de riego y de la definición de requerimientos técnicos, se estableció el diseño del sistema hidráulico que permitirá garantizar una distribución uniforme y controlada del agua en los módulos de producción del vivero. El sistema se organiza en una red fija que integra los elementos de captación, almacenamiento, impulsión, regulación y distribución.

El diseño contempla un punto de captación provisto de rejilla de protección y válvula de compuerta para el control del ingreso del caudal; una cisterna de almacenamiento destinada a estabilizar el suministro de agua; una electrobomba para asegurar la presión adecuada durante la operación; un sistema de filtrado y regulación de presión para mantener la calidad y estabilidad del flujo; y una red de distribución construida en tubería PVC de alta presión, sectorizada mediante válvulas de control. La aplicación del riego se realiza mediante microaspersores de cobertura homogénea, ubicados estratégicamente en las áreas de cultivo para asegurar una distribución uniforme sobre el sustrato.

**Figura 18**

*Diagrama hidráulico del sistema de riego automatizado*



*Nota:* El diagrama representa la secuencia operativa del sistema: captación - cisterna - electrobomba - filtro - regulador de presión - red de microaspersores.

Elaboración propia.

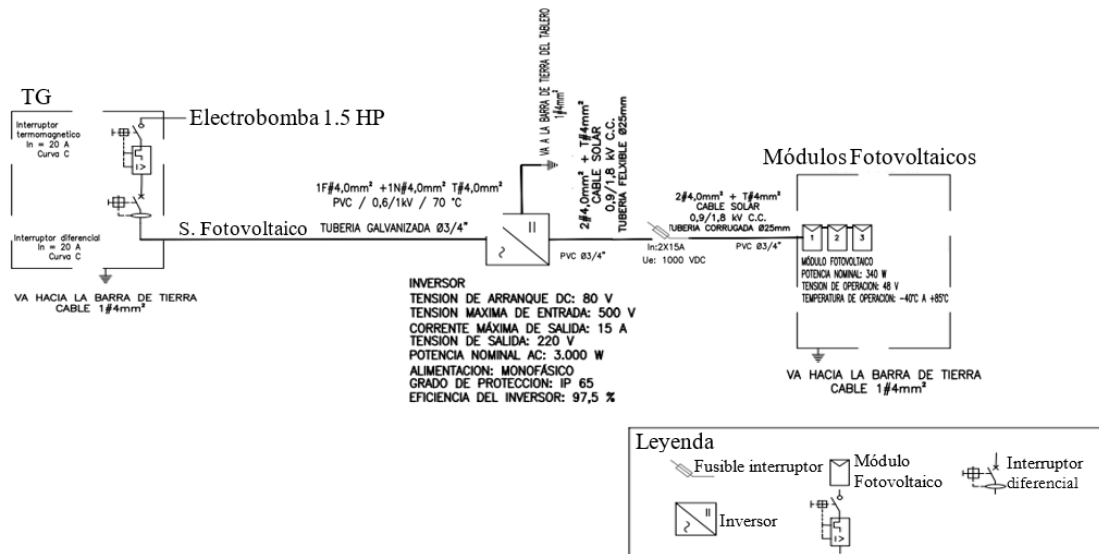
La configuración diseñada permite mantener estabilidad en la presión, reducir pérdidas por fugas o sobrepresión y asegurar que el recurso hídrico se distribuya de manera eficiente y uniforme, contribuyendo así a la mejora en el crecimiento y la producción de los plantones.

- **Diseño del sistema energético**

Como resultado del análisis de condiciones operativas del vivero, en el cual se identificó la ausencia de suministro eléctrico estable, se definió un sistema de alimentación autónomo basado en energía solar. El sistema energético diseñado está constituido por un panel solar de 40 W, encargado de captar y transformar la radiación solar en energía eléctrica, la cual es almacenada en una batería de ciclo profundo de 12 V–25 Ah, permitiendo la operación continua del sistema incluso en ausencia de radiación directa. La gestión del flujo de energía entre el panel y la batería se realiza mediante un controlador de carga, que evita sobrecargas y descargas profundas, prolongando la vida útil del sistema. La energía almacenada se distribuye hacia la electrobomba y la unidad de control electrónico, garantizando su funcionamiento sin dependencia de la red eléctrica convencional.

**Figura 19**

*Plano eléctrico del sistema de riego automatizado*



*Nota:* El plano eléctrico muestra la conexión del tablero general (TG), protecciones eléctricas, inversor, sistema fotovoltaico, cableado y alimentación de la electrobomba de 1.5 HP, conforme al diseño implementado.

La implementación de este sistema energético asegura la autonomía operativa del riego automatizado, reduce la vulnerabilidad frente a interrupciones externas y favorece la sostenibilidad del sistema en campo (Ver anexo I).

- **Dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el sistema de riego**

A partir del análisis energético realizado para la bomba centrífuga multietapa de 1.5 HP y considerando las condiciones de radiación solar del distrito de Tabaconas, se procedió a definir los componentes eléctricos que conforman el sistema fotovoltaico autónomo requerido para garantizar la operación continua del sistema de riego automatizado (Ver anexo G). El dimensionamiento incorporó criterios de eficiencia energética, autonomía operativa, compatibilidad entre componentes y disponibilidad comercial de equipos en el mercado peruano.

**Tabla 23***Dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el sistema de riego*

| <b>Elemento del sistema</b> | <b>Resultado final seleccionado</b>                           |
|-----------------------------|---|
| Potencia FV instalada       | 1.02 kWp  |
| Número de paneles           | 3 módulos solares monocristalinos de 340 Wp                   |
| Voltaje del sistema         | 48 V  |
| Banco de baterías           | 48 V – 150 Ah   |
| Configuración de baterías   | 4 baterías de 12 V – 150 Ah en serie                          |
| Controlador de carga        | MPPT 48 V – 30 A  |
| Inversor                    | Senoidal pura 48 VDC / 220 VAC – 3 kW (nominal) – 6 kW (pico) |
| Energía diaria requerida    | 2.9 kWh/día   |

Nota: elementos conforman un sistema fotovoltaico equilibrado, técnicamente viable y coherente con las necesidades del sistema de riego automatizado del Vivero Municipal de Tabaconas, contribuyendo a mejorar la sostenibilidad energética y reducir la dependencia de fuentes externas.

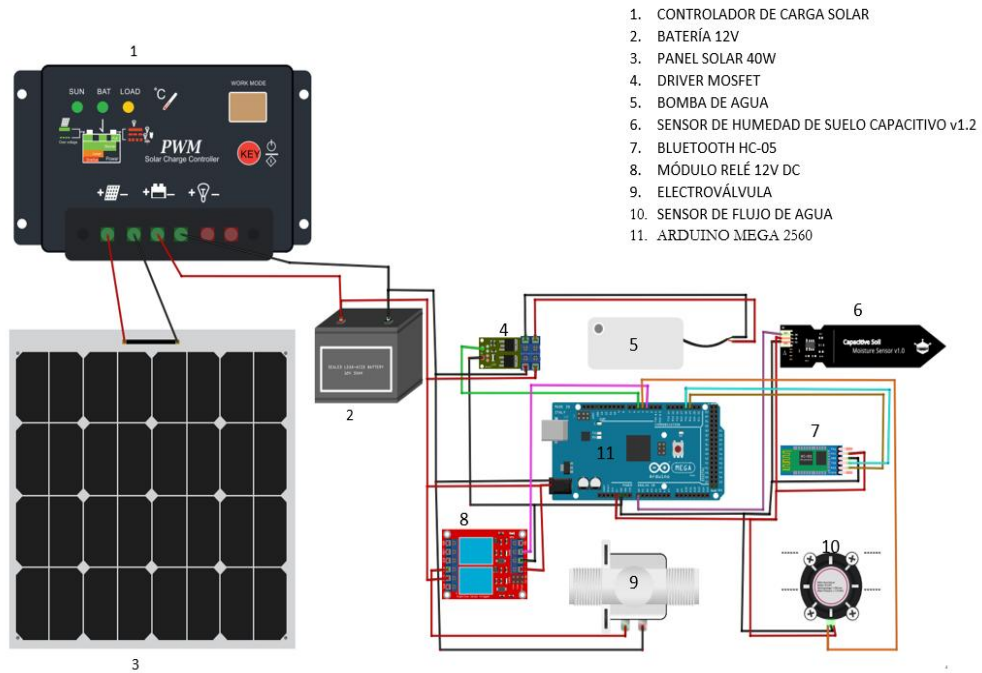
#### - **Diseño del sistema de control**

Como resultado del proceso de definición de requerimientos y selección de componentes, se estableció una arquitectura de control basada en el microcontrolador Arduino Mega 2560 R3, el cual centraliza el procesamiento de la información proveniente de los sensores de humedad del sustrato y del sensor de caudal. Estos datos son evaluados en tiempo real mediante una lógica de control que compara los valores registrados con rangos de operación previamente definidos, lo que permite determinar el momento oportuno para la activación o detención del riego. La operación de los actuadores - electrobomba y válvulas solenoides - se realiza a través de módulos de potencia (relé y driver MOSFET), asegurando aislamiento eléctrico y respuesta segura. La supervisión del sistema se lleva a cabo mediante la aplicación Serial Bluetooth que permite

la conexión de Android y el sistema, que permite visualizar el estado operativo y los valores de humedad desde una aplicación móvil, sin necesidad de conexión a internet (Ver anexo H).

**Figura 20**

*Diagrama electrónico del sistema de control IoT del riego automatizado.*



*Nota:* El diagrama muestra la interconexión entre el sistema fotovoltaico de 12 V, el microcontrolador Arduino Mega 2560 R3, los sensores de humedad y caudal, el módulo Bluetooth HC-05 y los actuadores (bomba de 12 Vdc y válvula solenoide de 220 Vac) mediante un driver MOSFET y un módulo de relé optoacoplado.

La lógica implementada corresponde a un control de histéresis, donde el riego se activa cuando la humedad del sustrato desciende por debajo del umbral mínimo (40 %) y se detiene una vez alcanzado el valor máximo establecido (60 %). Esta estrategia evita ciclos de encendido-apagado frecuentes, contribuye al uso eficiente del agua y favorece la estabilidad operativa y la durabilidad de los componentes del sistema.

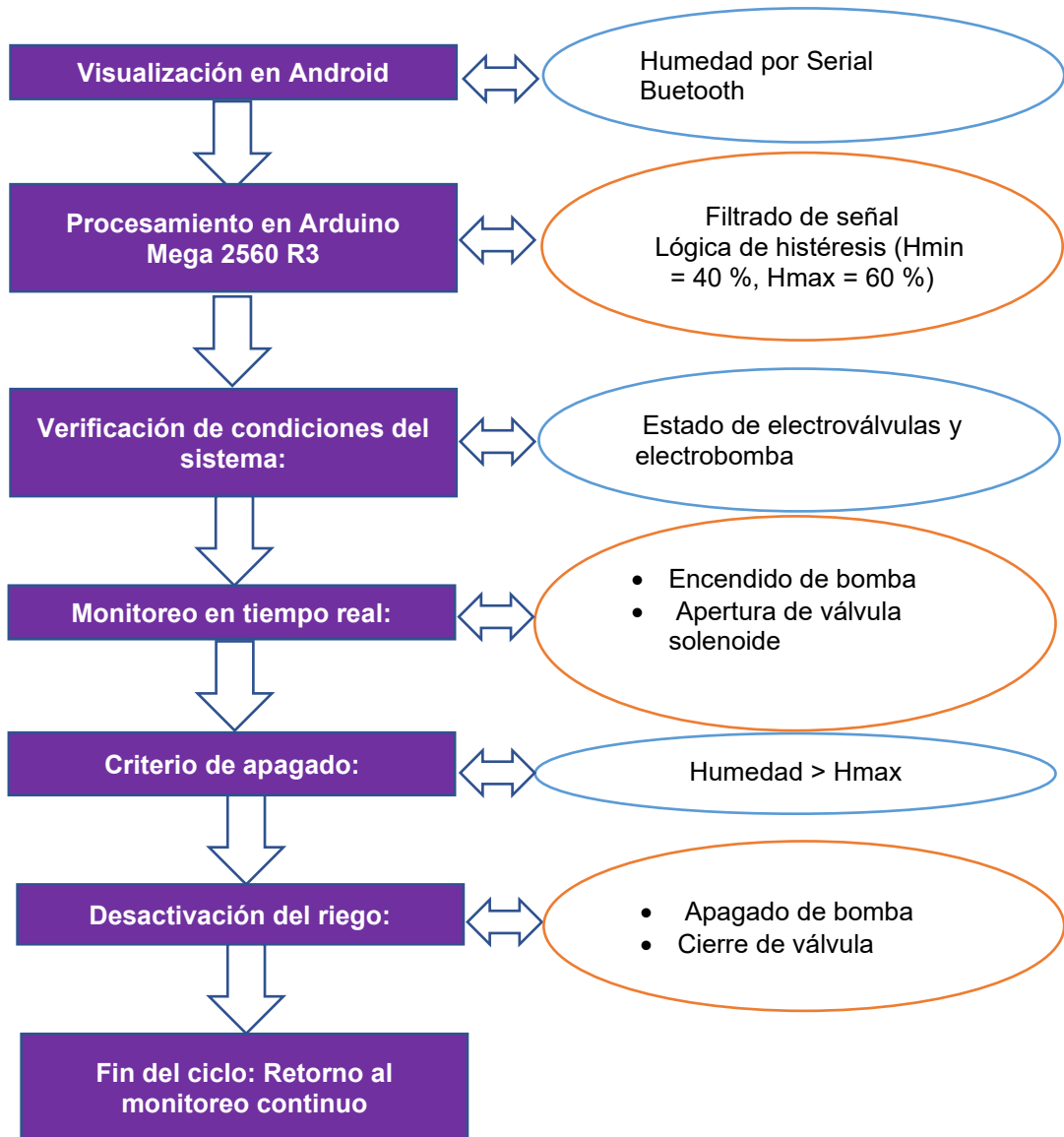
- **Flujo operativo del sistema IoT**

El funcionamiento del sistema se desarrolla a partir de un proceso secuencial que integra las etapas de sensado, procesamiento, toma de decisiones y ejecución de acciones de control. En primer lugar, los sensores de humedad del sustrato registran de manera continua el nivel de humedad en los módulos de producción. Estos datos son recibidos y procesados por el microcontrolador Arduino Mega 2560 R3, el cual evalúa las lecturas en relación con los umbrales establecidos para el riego. Cuando la humedad desciende por debajo del valor mínimo definido, el sistema activa la electrobomba y las válvulas solenoides, iniciando el suministro de agua; una vez alcanzado el nivel máximo, el sistema interrumpe el riego automáticamente, garantizando un uso eficiente del recurso.

La supervisión del estado del sistema se realiza mediante el Serial Bluetooth que se ha instalado en un Android, el cual permite visualizar el porcentaje de humedad que transmite el monitoreo local en tiempo real.

**Figura 21**

*Diagrama de flujo operativo del sistema de control IoT del riego automatizado.*



*Nota:* El diagrama representa la secuencia de interacción entre sensores de humedad y caudal, el microcontrolador Arduino Mega 2560 R3, el módulo Bluetooth HC-05 y la aplicación móvil. El código fuente del sistema se encuentra en el anexo J.

Este flujo operativo asegura una automatización estable, eficiente y adaptable a las condiciones del vivero, minimizando la intervención manual y contribuyendo a la conservación del recurso hídrico.

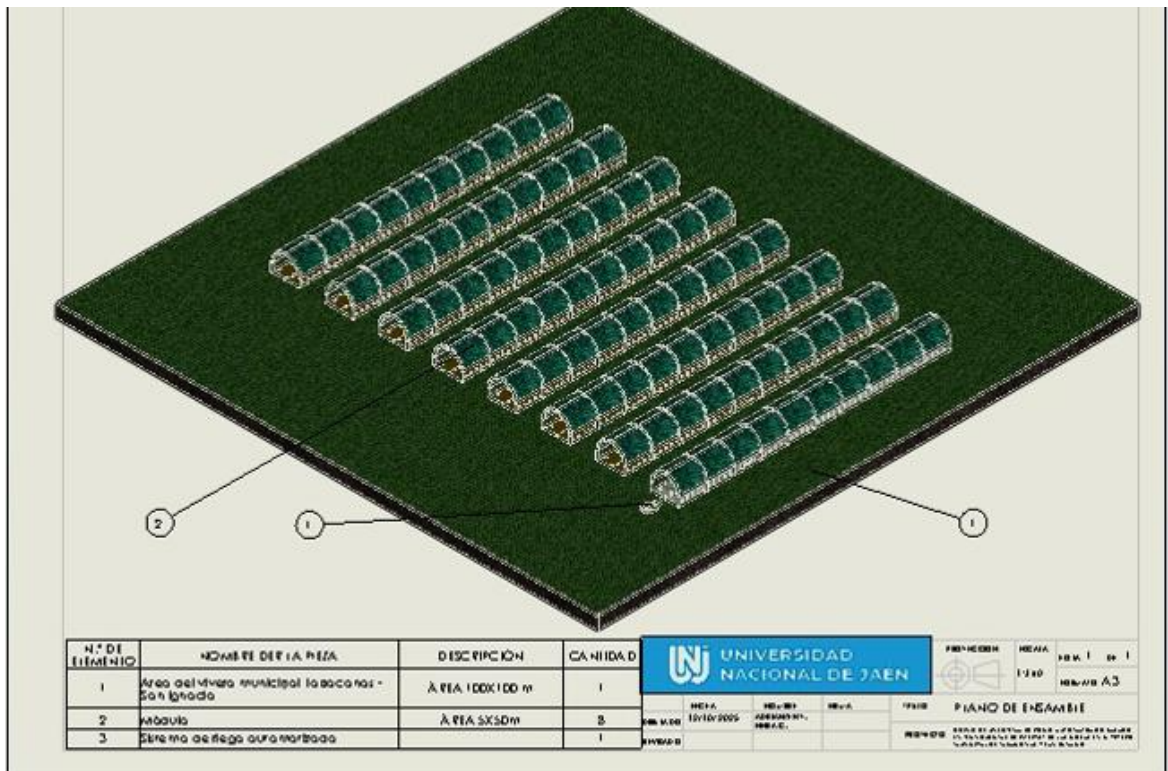
- **Diagrama general del sistema de riego automatizado**

La integración de los componentes hidráulicos, electrónicos y energéticos permitió conformar un sistema de riego automatizado completamente funcional, adaptado a las condiciones operativas del vivero. En la Figura 25 se presenta la disposición general del sistema, donde se observa la relación entre los módulos de cultivo, la red de tuberías de distribución, la cisterna de almacenamiento y la unidad central de control.

La Figura 24 muestra la disposición general del sistema de riego automatizado implementado en el vivero, evidenciando la integración entre los módulos de cultivo, la red de tuberías, la cisterna y la unidad de control central.

**Figura 22**

*Diagrama general del sistema de riego automatizado*



*Nota:* Se muestra la integración del sistema hidráulico, eléctrico y de control, evidenciando la operación conjunta de los componentes en el vivero. Elaboración propia (2025).

La visualización integral del sistema permite corroborar la coherencia entre los subsistemas y su capacidad para operar de manera sincronizada. En conjunto, los sensores de humedad, el microcontrolador y los actuadores aseguran una distribución uniforme del agua, mientras que la alimentación fotovoltaica garantiza autonomía energética. La lógica de histéresis aplicada en el control mantiene la estabilidad hídrica en los módulos de producción, y la comunicación Bluetooth facilita la supervisión en tiempo real sin necesidad de infraestructura de red fija.

- **Equipos y componentes seleccionados**

Como resultado del diseño del sistema de riego automatizado basado en IoT, se definió la lista final de equipos y componentes requeridos para su implementación, considerando compatibilidad técnica, disponibilidad en el mercado local y operación sostenible en campo.

**Tabla 24**

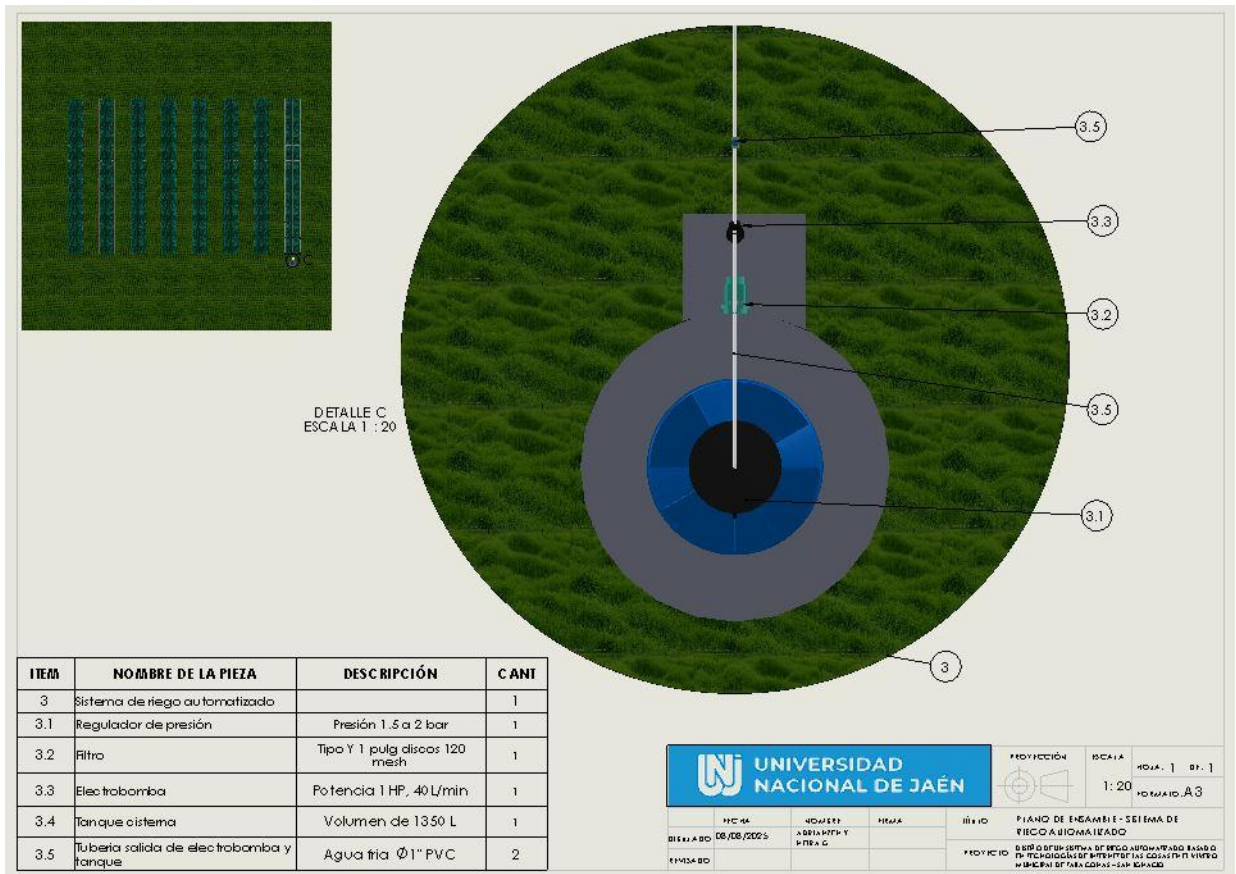
*Lista de equipos y componentes del sistema de riego automatizado*

| <b>Componente / Equipo</b> | <b>Marca / Modelo</b>      | <b>Especificación técnica principal</b>                             | <b>Función en el sistema</b>  |
|----------------------------|----------------------------|---|---|
| Sensor de humedad de suelo | Capacitivo v1.2 (genérico) | Alimentación 3.3–5 V; salida analógica; recubrimiento anticorrosión | Medición continua de la humedad del sustrato para la activación automática del riego. |
| Sensor de caudal           | FS300A – 3/4”              | 1–60 L/min; efecto Hall; alimentación 5–18 V                        | Medición del caudal y verificación del volumen de agua aplicado.                      |
| Microcontrolador           | Arduino Mega 2560 R3       | 54 pines digitales; 16 entradas analógicas; MCU ATmega2560          | Procesamiento de señales y ejecución de la lógica de control.                         |
| Módulo de comunicación     | Bluetooth HC-05            | Comunicación UART; 10 m de alcance                                  | Supervisión local del sistema desde un dispositivo móvil.                             |
| Electrobomba               | Bomba 12 VDC – 800 L/h     | H <sub>máx</sub> = 5 m; caudal 800 L/h                              | Presurización y circulación del agua hacia la red de distribución.                    |
| Válvula solenoide          | 3/4” NC – 220 VAC          | Normalmente cerrada; apertura por señal de control                  | Sectorización automática del riego.   |

|                             |                                      |   |  |
|-----------------------------|--------------------------------------|---|--|
| Driver de potencia          | MOSFET<br>AOD4184A (15 A)            | Baja resistencia interna; apto para PWM   | Conmutación eficiente de la bomba DC.  |
| Módulo relé                 | Relé 12 VDC optoaislado              | Contactos NC/NO; carga AC hasta 220 V   | Aislamiento eléctrico y control seguro de válvulas.  |
| Panel solar                 | Policristalino 40 W – 18 V           | Producción ~2.2 A   | Generación de energía renovable para operación autónoma.   |
| Batería de ciclo profundo   | 12 V – 25 Ah                         | Descarga controlada; apta para uso continuo   | Almacenamiento energético para funcionamiento en ausencia de radiación solar.  |
| Controlador de carga        | PWM 12 V – 10 A                      | Protección contra sobrecarga y descarga   | Gestión y protección del sistema fotovoltaico.   |
| Microaspersores             | 360°, regulables<br>30–60 L/h        | Operación óptima 0.5–2 bar  | Distribución uniforme del agua en el área de cultivo.  |
| Tubería PVC de alta presión | Ø ¾” y ½”                            | Clase 10 / Clase 13   | Conducción del agua en la red de distribución.   |
| Regulador de presión        | Regulador 1” – 1.5–2 bar             | Mantenimiento de presión estable  | Garantiza presión correcta para la operación de microaspersores.   |
| Filtro                      | Tipo Y – 1”                          | Cuerpo plástico reforzado; malla filtrante 120 mesh; conexión roscada 1”; presión máx. 8–10 bar   | Retención de sedimentos y protección del sensor de caudal, válvulas y microaspersores; evita obstrucciones en la red hidráulica.   |
| Tanque cisterna             | Rotoplas / Eternit / Genérico 1350 L | Capacidad: 1.35 m <sup>3</sup> ; Material: polietileno de alta densidad (PEAD) grado alimentario; Tapa hermética; Conexiones de entrada/salida de 1”; Resistente a radiación UV | Almacenar el agua utilizada por el sistema de riego, garantizar un suministro constante con nivel adecuado para la bomba, permitir sedimentación de impurezas y asegurar continuidad del riego automatizado. |
| Accesorios y soportes       | Codos, uniones, teflón, caja IP65    | Montaje estructural y protección  | Orden, seguridad y mantenimiento del sistema.  |

**Tabla 25**

*Plano de ensamble del sistema de riego automatizado*



*Nota:* La figura muestra la distribución del tanque, electrobomba, filtro, tuberías y módulos del sistema diseñado.

### 3.3 Evaluación de la viabilidad técnica y económica del sistema automatizado de riego

#### - Evaluación de recursos técnicos y humanos

La evaluación de los recursos disponibles en el Vivero Municipal de Tabaconas se realizó considerando las condiciones reales de infraestructura, operación y disponibilidad de personal, en correspondencia con el diseño del sistema automatizado de riego basado en tecnologías IoT. Esta evaluación permitió determinar el nivel de factibilidad técnica para su futura implementación.

**Tabla 26**

*Recursos técnicos y humanos del Vivero Municipal de Tabaconas*

| <b>Aspecto evaluado</b>               | <b>Descripción resumida de los resultados</b>   | <b>Conclusión principal</b>  |
|---------------------------------------|---|--|
| Infraestructura eléctrica             | No existen puntos de energía ni tableros de distribución instalados. El vivero no cuenta con conexión a la red eléctrica pública. | La ausencia de energía convencional justifica el uso de un sistema fotovoltaico autónomo con baterías recargables. |
| Suministro y conducción de agua       | El riego depende de la captación directa desde una quebrada cercana, sin reservorio ni sistema de bombeo.                         | El sistema hidráulico opera de manera manual y sin medición de caudal, lo que limita la eficiencia del riego.      |
| Disponibilidad de red de comunicación | No se dispone de red inalámbrica, internet ni dispositivos de transmisión de datos.   | Se requiere comunicación local autónoma mediante módulo Bluetooth HC-05, en coherencia con la propuesta de diseño. |

|  |  |  |
|--|--|--|
| Equipos y herramientas disponibles       | No se cuenta con sensores, controladores ni dispositivos de monitoreo.   | El sistema actual carece de automatización e instrumentación técnica.                              |
| Propuesta técnica del diseño             | El sistema propuesto integra paneles solares, batería de respaldo y módulos Bluetooth, asegurando autonomía energética y comunicación local. | Permite un funcionamiento independiente de la red pública y adaptable al entorno rural.            |
| Capacitación del personal                | El personal posee experiencia empírica en riego manual, sin formación en automatización.   | Existe predisposición favorable para la capacitación técnica y la adopción progresiva del sistema. |
| Actitud del personal hacia la innovación | El personal manifiesta interés en mejorar la eficiencia del riego mediante nuevas tecnologías.   | La actitud proactiva del personal constituye una fortaleza para la sostenibilidad del proyecto.    |

Los resultados indican que, aunque el vivero presenta limitaciones estructurales (falta de energía eléctrica y redes de comunicación), la propuesta diseñada es técnicamente viable debido a que el sistema se alimenta mediante energía solar y opera con comunicación local, sin depender de infraestructura externa. Asimismo, la disposición del personal a capacitarse constituye un factor clave para su futura implementación y sostenibilidad.

#### - **Elaboración del presupuesto detallado**

La evaluación económica se realizó a partir de precios promedio del mercado peruano, considerando el carácter proyectivo del estudio y la ausencia de

ejecución física. El presupuesto se presenta a nivel referencial, orientado a estimar la inversión necesaria para la implementación del sistema.

**Tabla 27**

*Presupuesto del sistema automatizado de riego*

| <b>Categoría evaluada</b>            | <b>Descripción resumida</b>   | <b>Costo estimado (S/)</b> | <b>Conclusión principal</b>   |
|--------------------------------------|---|----------------------------|---|
| Componentes electrónicos principales | Incluye Arduino Mega 2560 R3, sensores de humedad y flujo, válvulas solenoides, módulo relé, driver MOSFET. | 1,462.00                   | Representa la base funcional del sistema, con componentes compatibles y de bajo consumo energético.       |
| Materiales hidráulicos y eléctricos  | Mangueras, aspersores, conectores PVC, cableado y caja de paso.   | 3,855.00                   | Asegura la correcta integración eléctrica e hidráulica del sistema.                                       |
| Sistema de bombeo                    | Electrobomba seleccionada para el caudal y presión de operación del sistema.                                | 230.00                     | Permite garantizar el caudal y presión adecuados para la microaspersión, asegurando uniformidad de riego. |
| Costos de instalación técnica        | Montaje, transporte y materiales auxiliares requeridos.   | 1,250.00                   | Permite la implementación segura y estructurada del diseño.   |

|                                |  |          |  |
|--------------------------------|--|----------|--|
| Mantenimiento preventivo anual | Calibración de sensores, revisión eléctrica y limpieza de componentes. | 620.00   | Garantiza la continuidad operativa y extiende la vida útil del sistema.                            |
| Sistema de alimentación        | Batería recargable y panel solar de 40 W.                              | 250.00   | Asegura autonomía energética del sistema mediante energía solar, sin depender de la red eléctrica. |
| Total general estimado         |  | 7,667.00 | Confirma la viabilidad económica del diseño proyectado.  |

El presupuesto estimado muestra que el diseño del sistema es económicamente viable para el vivero municipal. La inversión se justifica debido al ahorro potencial del agua, reducción del tiempo de trabajo manual y mejora en la calidad de producción de plantones. Además, la naturaleza modular del sistema permite ampliarlo por fases, lo cual facilita su implementación progresiva según la disponibilidad de recursos.

## DISCUSIÓN

El diseño del sistema de riego automatizado basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) para el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio mantiene coherencia con los lineamientos metodológicos establecidos en la fase introductoria de la investigación, en la cual se definió un alcance orientado al diseño técnico, conceptual y analítico. En este sentido, la discusión se enfoca en contrastar los resultados obtenidos con los antecedentes científicos y técnicos revisados, evidenciando la pertinencia y viabilidad del sistema propuesto frente a experiencias previas en contextos similares.

A nivel internacional, investigaciones como las de Jiménez Albán (2024), Oliva España (2023), Delgado Bravo (2021), Crespo Santander (2022), Mejía Idárraga (2022) y Gutiérrez et al. (2022) demuestran que la automatización del riego mediante sensores de humedad, microcontroladores y válvulas solenoides permite reducir el consumo de agua entre 25 % y 40 %, optimizando el manejo del recurso en jardines, huertos y viveros. Estos estudios señalan que los sistemas basados en monitoreo continuo del suelo brindan mayor precisión respecto a los métodos manuales, lo cual coincide con el diseño planteado en este trabajo, donde la lógica de control por histéresis ( $H_{min} = 40\%$  y  $H_{max} = 60\%$ ) regula el suministro de agua según las necesidades reales del sustrato, evitando tanto déficit como excesos de humedad.

Asimismo, la integración de energía solar identificada en estudios internacionales, especialmente en zonas rurales sin acceso a red eléctrica, es coherente con la propuesta para Tabaconas. El empleo de un panel fotovoltaico de 40 W y una batería de 12 V asegura autonomía energética, elemento clave para la sostenibilidad operativa del sistema.

En el contexto nacional, las investigaciones de Rojas Asto (2022), Rojas Ipanaqué (2021) y Ventura Palomino y Lima Esperilla (2020) evidencian que la automatización del riego alimentada por energía solar puede incrementar la eficiencia hídrica hasta en un 86 % y reducir los costos asociados al trabajo manual. Estas experiencias destacan la importancia de utilizar componentes accesibles, de bajo consumo y fáciles de mantener, lo cual coincide con el diseño desarrollado en este estudio, fundamentado en microcontroladores de bajo costo (Arduino Mega

2560), sensores capacitivos resistentes a la corrosión y microaspersores de bajo caudal.

A nivel local, el estudio de Ordóñez y Cieza (2023) en el vivero municipal de Jaén constituye un referente directo, al demostrar que la implementación de un sistema automatizado disminuyó el consumo hídrico en un 73 % y presentó una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 23 %. Estos resultados fortalecen la proyección del sistema diseñado para Tabaconas, que muestra viabilidad técnica y económica mediante una inversión accesible y una mejora sustancial en el manejo del recurso agua. Por lo tanto, la propuesta presentada no solo optimiza el riego, sino que también reduce la carga laboral del personal y contribuye al fortalecimiento de la sostenibilidad ambiental y productiva del vivero.

En síntesis, la comparación con los antecedentes internacionales, nacionales y locales confirma que el diseño propuesto es pertinente, funcional y replicable, y responde adecuadamente a las condiciones rurales de Tabaconas, garantizando una gestión eficiente del recurso hídrico y una operación sostenible a largo plazo.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- Se determinó que el sistema de riego del Vivero Municipal de Tabaconas es manual, sin control de volumen ni medición de humedad del suelo, lo que ocasiona un uso ineficiente del recurso hídrico y limita la gestión técnica del riego. Esta situación evidenció la necesidad de diseñar un sistema de riego automatizado que se ajuste a las necesidades reales del cultivo.
  
- El sistema de riego automatizado diseñado, basado en tecnologías IoT, integra sensores capacitivos de humedad del suelo, válvulas solenoides, una bomba de 12 VDC, el microcontrolador Arduino Mega 2560 y el módulo Bluetooth HC-05, operando mediante una lógica de control por histéresis ( $H_{min} = 40\%$  y  $H_{max} = 60\%$ ). Asimismo, el uso de energía solar garantiza autonomía energética y sostenibilidad, reduciendo la intervención manual y mejorando la eficiencia operativa del vivero.
  
- La evaluación técnica y económica demuestra que el sistema propuesto es viable para el contexto del vivero, con un costo estimado de S/ 7 667.00 y facilidad de operación y mantenimiento. Además, el diseño presenta el potencial de reducir el consumo de agua hasta en un 40 %, contribuyendo a la gestión sostenible del recurso hídrico y al fortalecimiento de las acciones de reforestación y conservación ambiental en el distrito de Tabaconas.

## **RECOMENDACIONES**

- Se recomienda a futuros investigadores registrar y monitorear de manera sistemática los tiempos, frecuencias y volúmenes de riego, con el propósito de contar con información precisa que permita evaluar y comparar el desempeño del sistema manual actual frente al sistema automatizado propuesto.
  
- Se recomienda a los investigadores o tesisistas implementar de manera gradual el sistema de riego automatizado diseñado, iniciando con un módulo piloto que permita validar su funcionamiento en condiciones reales. Asimismo, se sugiere realizar capacitaciones dirigidas al personal encargado, orientadas a la operación y mantenimiento preventivo del sistema, garantizando su adecuada sostenibilidad en el tiempo.
  
- Se recomienda a los encargados de velar por la Municipalidad Distrital de Tabaconas gestionar los recursos necesarios para la adquisición e instalación de los componentes del sistema automatizado, tomando en cuenta su costo accesible y los beneficios asociados a la reducción del consumo hídrico y a la mejora en la eficiencia operativa. Además, se sugiere evaluar la posibilidad de replicar el sistema en otros viveros o áreas agrícolas de la región.

## BIBLIOGRAFÍA

- Al-Ghobari, H. M., & Dewidar, A. Z. (2018). *Integrating the smart irrigation system with sustainability concept for water saving in agriculture*. *Water Resources Management*, 32(5), 1487–1500. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1874-3>
- Chauhan, J., Singh, R., & Verma, P. (2021). *Advances in irrigation technology: A systematic review*. *Journal of Water and Climate Change*, 12(4), 1013–1023. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.166>
- Crespo Santander, D. E. (2022). *Diseño e implementación de un sistema automático de riego para jardines o cultivos domésticos* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Cuenca]. Repositorio Institucional UCC.
- Delgado Bravo, D. J. (2021). *Estudio de un sistema de riego automatizado para mejorar la producción agrícola en la Hacienda “Las Cabezas” del Cantón Flavio Alfaro* [Tesis de pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí]. Repositorio Institucional UESM.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *The state of food and agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture*. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>
- Gutiérrez Peñaloza, M. A., Lozano Manzano, J., & Mauricio, H. (2022). *Sistema de riego automatizado* [Tesis de pregrado, Universidad del Valle, Colombia]. Repositorio Institucional UV.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Educación.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Jiménez Albán, G. A. (2024). *Sistema de riego inteligente de corto alcance para jardines a partir de visión artificial* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio UTA.
- Mejía Idárraga, S. D. (2022). *Desarrollo de prototipo de sistema de riego automatizado para cultivo de plantas medicinales localizado en la granja agroecológica UCEVA* [Tesis de pregrado, Universidad Central del Valle del Cauca]. Repositorio Institucional UCEVA.

- Oliva España, J. D. (2023). *Diseño de sistema de riego por goteo automatizado utilizando una placa programable Raspberry Pi Pico y módulo ESP8266 en la finca Moralfa, Quetzaltenango* [Tesis de pregrado, Universidad Rafael Landívar]. Repositorio Institucional URL.
- Ordoñez, Y. J., & Cieza, Y. D. (2023). *Diseño de un sistema de control automatizado mediante tecnología Arduino para el riego del vivero de la Municipalidad Provincial de Jaén – Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio Institucional UNJ. <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/662>
- Placidi, P., Gasperini, L., Grassi, A., Cecconi, M., & Scorzoni, A. (2020). *Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. Sensors*, 20(12), 3585. <https://doi.org/10.3390/s20123585>
- Rojas Asto, R. M., Cuellar, F., & Lima, C. (2022). *Diseño de un sistema de riego automatizado para uvas usando el vehículo autónomo Summit XL* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP.
- Rojas Ipanaqué, H. J. (2021). *Diseño de un sistema de potencia y control automatizado para riego en beneficio de los agricultores del distrito de Paramonga – 2021* [Tesis de pregrado, Universidad de Ciencias y Humanidades]. <http://www.uch.edu.pe>
- Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., & Balasundram, S. K. (2018). *Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 1–22. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210>
- Ventura Palomino, R. T., & Lima Esperilla, F. A. (2020). *Diseño de un sistema automatizado de riego por aspersion con generación fotovoltaica para cultivos de aguaymanto en el CPM de Mayobamba* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2019). *The United Nations world water development report 2019: Leaving no one behind*. UNESCO.

## **AGRADECIMIENTO**

Los autores expresan su más profundo agradecimiento a Dios, fuente de sabiduría, fortaleza y guía constante en el desarrollo de este proyecto.

Agradecemos de manera especial a la Universidad Nacional de Jaén (UNJ), particularmente a la Facultad de Ingeniería y a la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, por brindarnos la formación académica, los recursos y la orientación técnica necesarios para la culminación de la presente tesis.

Nuestro sincero reconocimiento al Dr. Freddi Roland Rodríguez Ordóñez, asesor del proyecto, por su valiosa dirección, constante acompañamiento, exigencia académica y orientación metodológica, que permitieron consolidar una propuesta técnica y científicamente sólida.

De igual forma, expresamos nuestra gratitud al personal técnico del Vivero Municipal de Tabaconas y a la Municipalidad Distrital de Tabaconas, por su colaboración, disponibilidad de información y apoyo durante la fase de diagnóstico, los cuales fueron fundamentales para contextualizar y validar el diseño propuesto.

A nuestras familias, por su amor incondicional, paciencia, comprensión y apoyo moral en cada etapa de nuestra formación profesional. A ellos dedicamos este logro, fruto de esfuerzo, perseverancia y compromiso con la mejora de nuestra comunidad y del entorno ambiental.

## **DEDICATORÍA**

Dedicamos este trabajo de tesis a nuestras familias, pilares fundamentales de nuestra vida, por su apoyo constante, sacrificio y confianza inquebrantable, que nos motivaron a superar cada desafío con determinación y esperanza.

A Dios, por concedernos la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para culminar este importante objetivo académico.

Dedicamos también este logro a nuestros docentes y mentores, quienes con su ejemplo y vocación nos inspiraron a ejercer la ingeniería con ética, compromiso y responsabilidad social.

Finalmente, dedicamos este esfuerzo conjunto a todos los estudiantes e investigadores que buscan contribuir con soluciones sostenibles para el desarrollo de nuestras comunidades, convencidos de que la ciencia y la innovación son herramientas poderosas para transformar la realidad y construir un futuro mejor.

## **ANEXOS**

## GUIÓN DE ENTREVISTA

### I. Datos Generales

Fecha de aplicación: .....

Lugar de la entrevista: Vivero Municipal de Tabacanas – Sector Panchía

Cargo del entrevistado: .....

Entrevistador: .....

### II. Propósito de la entrevista

El objetivo de esta entrevista tiene como finalidad recopilar información técnica y operativa sobre el funcionamiento actual del sistema de riego en el Vivero Municipal de Tabacanas-Sector Panchía, con el objetivo de complementar los datos obtenidos en la revisión documental y orientar el diseño de un sistema de riego automatizado.

### III. Condiciones generales

#### a. Voluntariedad

Tu participación es completamente voluntaria. Si en algún momento no deseas responder una pregunta o prefieres terminar la entrevista, puedes hacerlo sin problema alguno.

Tu participación es totalmente opcional. Si en cualquier momento no quieres contestar una pregunta, tienes la libertad de hacerlo sin ningún inconveniente y continuar con las siguientes preguntas.

#### b. Confidencialidad

La información que proporcione durante esta entrevista será tratada de manera reservada. No utilizaremos tu nombre ni ningún dato que pueda identificarte en el informe final de tesis, y solo se empleará para los fines de esta investigación.

**c. Notas**

Con tu autorización, durante esta charla vamos a registrar información para garantizarnos de que no se nos escape ningún aspecto relevante. Esta anotación solo se utilizará para escribir la conversación y estudiarla como parte de la iniciativa.

**d. Duración**

La charla se llevará a cabo durante alrededor de 15-30 minutos. Si en cualquier momento requieres un descanso o prefieres continuar la conversación en otro momento, no dudes en decírmelo.

**e. Libertad de respuesta**

No existen respuestas que sean correctas o incorrectas. Nuestro objetivo es que te sientas a gusto expresando tus pensamientos y vivencias de la forma más sincera que puedas.

**IV. Preguntas de la entrevista**

Para comenzar, me gustaría que contestara las siguientes interrogantes:

1. ¿Cuánto tiempo lleva trabajando en el vivero y cuál es su función principal?  
.....
2. ¿Qué tipo de plantas o especies se cultivan actualmente en el vivero?  
.....
3. ¿Cómo se realiza actualmente el riego de las plantas?  
.....
4. ¿Con qué frecuencia se realiza el riego por sector o módulo?  
.....
5. ¿De dónde proviene el agua utilizada para el riego?  
.....

6. ¿Existe algún instrumento para medir el caudal o volumen de agua utilizada?  
.....
7. ¿Qué problemas o dificultades se presentan durante el riego?  
.....
8. ¿Se realizan mantenimientos preventivos o correctivos del sistema? ¿Con qué frecuencia?  
.....
9. ¿Qué consecuencias ha observado cuando no se realiza el riego de forma oportuna?  
.....
10. ¿Considera necesaria la automatización del sistema de riego? ¿Por qué?  
.....
11. ¿Qué beneficios esperaría obtener con un sistema automatizado de riego?  
.....
12. ¿Qué tipo de apoyo o capacitación considera necesaria para el manejo de un nuevo sistema automatizado?  
.....

**V. Cierre de la entrevista**

Se agradeció al entrevistado por su colaboración y disposición para brindar información relevante. Se le informó que los datos recopilados serán utilizados únicamente con fines académicos, garantizando la confidencialidad de su identidad y sus respuestas.

Jaén, 20 de mayo de 2025


**CARTA S/N-2025-JMAY-NGJN**

Dr. Wilfredo Ruiz Camacho


**Docente Principal – Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas**

**Asunto:** Solicitud de validación de instrumento “Guion de Entrevista”

Es grato dirigimos a usted para expresarle un cordial saludo y, a la vez, desearle éxitos en sus labores académicas y profesionales.



Asimismo, nos permitimos comunicarle que, como autores del proyecto de investigación aprobado y autorizado mediante Resolución N° 008-2025–UNJ/FI, de fecha 07 de enero de 2025, titulado “Diseño e implementación de un sistema automatizado de riego para optimizar el uso del recurso hídrico en el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio”, se ha elaborado el instrumento denominado “Guion de Entrevista”, con el propósito de recopilar información técnica y operativa sobre el sistema de riego actual.



En tal sentido, y siendo imprescindible contar con la aprobación de profesionales especialistas en el área para garantizar la validez y confiabilidad de los instrumentos de recolección de datos, nos dirigimos a usted a fin de solicitar su amable revisión, análisis y validación del instrumento mencionado, considerando su amplia experiencia en investigación agrícola y gestión de viveros forestales.

**Documentos que sustentan los instrumentos para validación:**

Resolución N° 008-2025–UNJ/FI que aprueba la ejecución del proyecto.


Instrumento “Guion de Entrevista Estructurada”.

. Sin otro particular, y agradeciendo de antemano su valiosa colaboración en este proceso académico, nos despedimos reiterándole las muestras de nuestra especial consideración y estima personal.

Atentamente,



-----  
**Juan Manuel Adrianzen Yajahuanca**  
**DNI N.º 76182218**



-----  
**Neira Gálvez José Nelo**  
**DNI N.º 76641650**

Jaén, 20 de mayo de 2025

**CARTA S/N-2025-JMAY-NGJN**

Dr. Jorge Luis Calderón Bacon

**Docente Principal – Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo**

**Asunto:** Solicitud de validación de instrumento “Guion de Entrevista”

Es grato dirigimos a usted para expresarle un cordial saludo y, a la vez, desearle éxitos en sus labores académicas y profesionales.

Asimismo, nos permitimos comunicarle que, como autores del proyecto de investigación aprobado y autorizado mediante Resolución N° 008-2025–UNJ/FI, de fecha 07 de enero de 2025, titulado “Diseño e implementación de un sistema automatizado de riego para optimizar el uso del recurso hídrico en el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio”, se ha elaborado el instrumento denominado “Guion de Entrevista”, con el propósito de recopilar información técnica y operativa sobre el sistema de riego actual.

En tal sentido, y siendo imprescindible contar con la aprobación de profesionales especialistas en el área para garantizar la validez y confiabilidad de los instrumentos de recolección de datos, nos dirigimos a usted a fin de solicitar su amable revisión, análisis y validación del instrumento mencionado, considerando su amplia experiencia en ingeniería mecánica y eléctrica, así como su destacada trayectoria académica en el ámbito energético y científico.

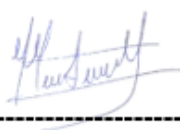
**Documentos que sustentan los instrumentos para validación:**

Resolución N° 008-2025–UNJ/FI que aprueba la ejecución del proyecto.

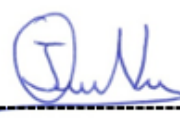
Instrumento “Guion de Entrevista Estructurada”.

. Sin otro particular, y agradeciendo de antemano su valiosa colaboración en este proceso académico, nos despedimos reiterándole las muestras de nuestra especial consideración y estima personal.

Atentamente,



-----  
**Juan Manuel Adrianzen Yajahuanca**  
DNI N.º 76182218



-----  
**Neira Gálvez José Nelo**  
DNI N.º 76641650

Jaén, 20 de mayo de 2025

**CARTA S/N-2025-JMAY-NGJN**

Mg. Elser Burga Mendoza  
Subgerente de Desarrollo Económico Agroproductivo y Empresarial  
Municipalidad Distrital de Chirinos

**Asunto:** Solicitud de validación de instrumento “Guion de Entrevista”

Es grato dirigimos a usted para expresarle un cordial saludo y, a la vez, desearle éxitos en sus labores académicas y profesionales.

Asimismo, nos permitimos comunicarle que, como autores del proyecto de investigación aprobado y autorizado mediante Resolución N° 008-2025–UNJ/FI, de fecha 07 de enero de 2025, titulado “Diseño e implementación de un sistema automatizado de riego para optimizar el uso del recurso hídrico en el Vivero Municipal de Tabaconas – San Ignacio”, se ha elaborado el instrumento denominado “Guion de Entrevista”, con el propósito de recopilar información técnica y operativa sobre el sistema de riego actual.

En tal sentido, y siendo imprescindible contar con la aprobación de profesionales especialistas en el área para garantizar la validez y confiabilidad de los instrumentos de recolección de datos, nos dirigimos a usted a fin de solicitar su amable revisión, análisis y validación del instrumento mencionado, considerando su amplia experiencia en ingeniería mecánica y eléctrica, así como su destacada trayectoria académica en el ámbito energético y científico.

**Documentos que sustentan los instrumentos para validación:**

Resolución N° 008-2025–UNJ/FI que aprueba la ejecución del proyecto.  
Instrumento “Guion de Entrevista Estructurada”.

. Sin otro particular, y agradeciendo de antemano su valiosa colaboración en este proceso académico, nos despedimos reiterándole las muestras de nuestra especial consideración y estima personal.

Atentamente,



-----  
**Juan Manuel Adrianzen Yajahuanca**  
DNI N.º 76182218



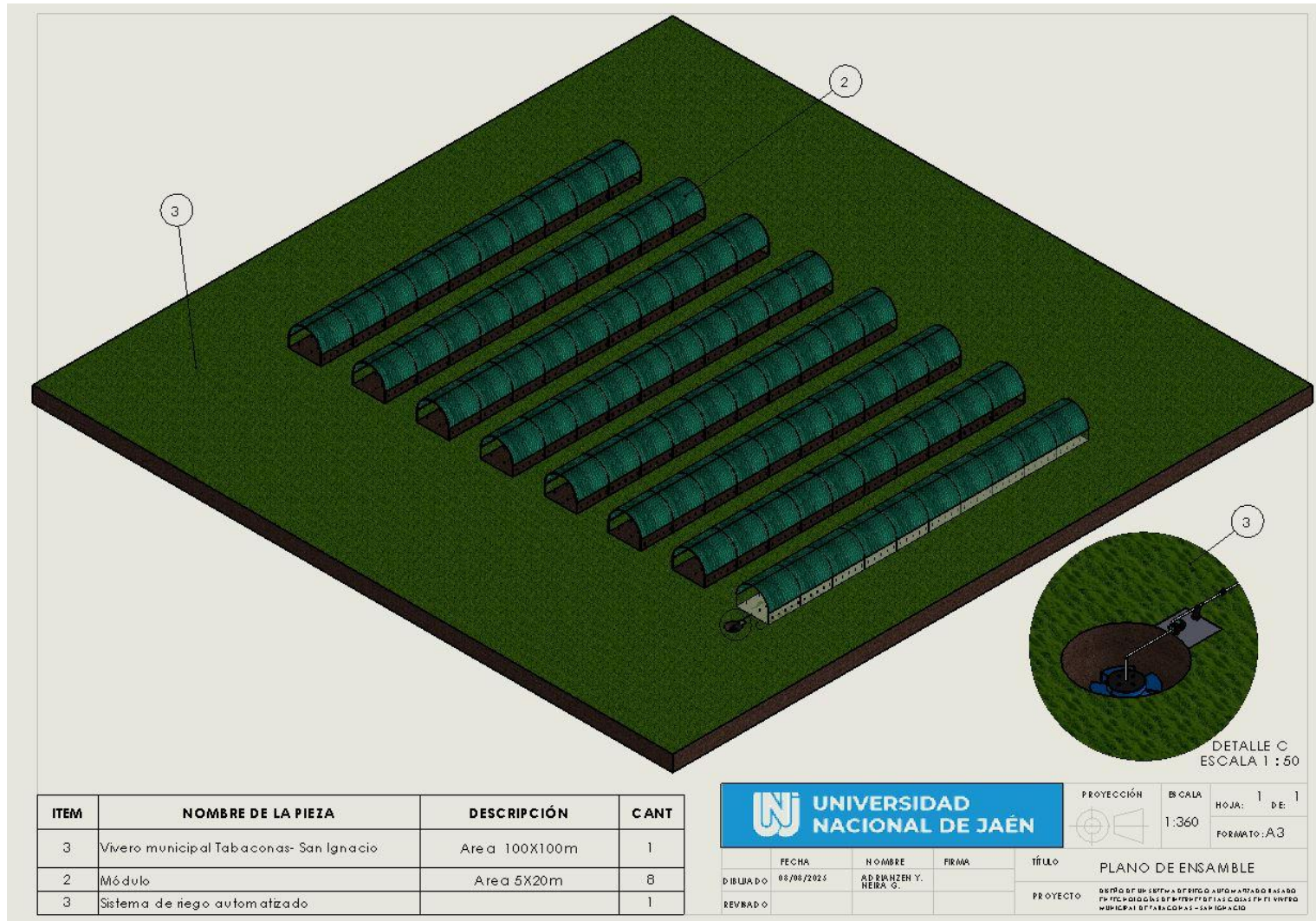
-----  
**Neira Gálvez José Nelo**  
DNI N.º 76641650







**Anexo D:** Planos del sistema de riego automatizado.



## Anexo E: Ficha técnica de la bomba periférica



### Catálogo Motobombas

#### Bomba de agua Centrífuga Kaili 1.5 HP

120L/min

Kaili 134720



#### FICHA TÉCNICA

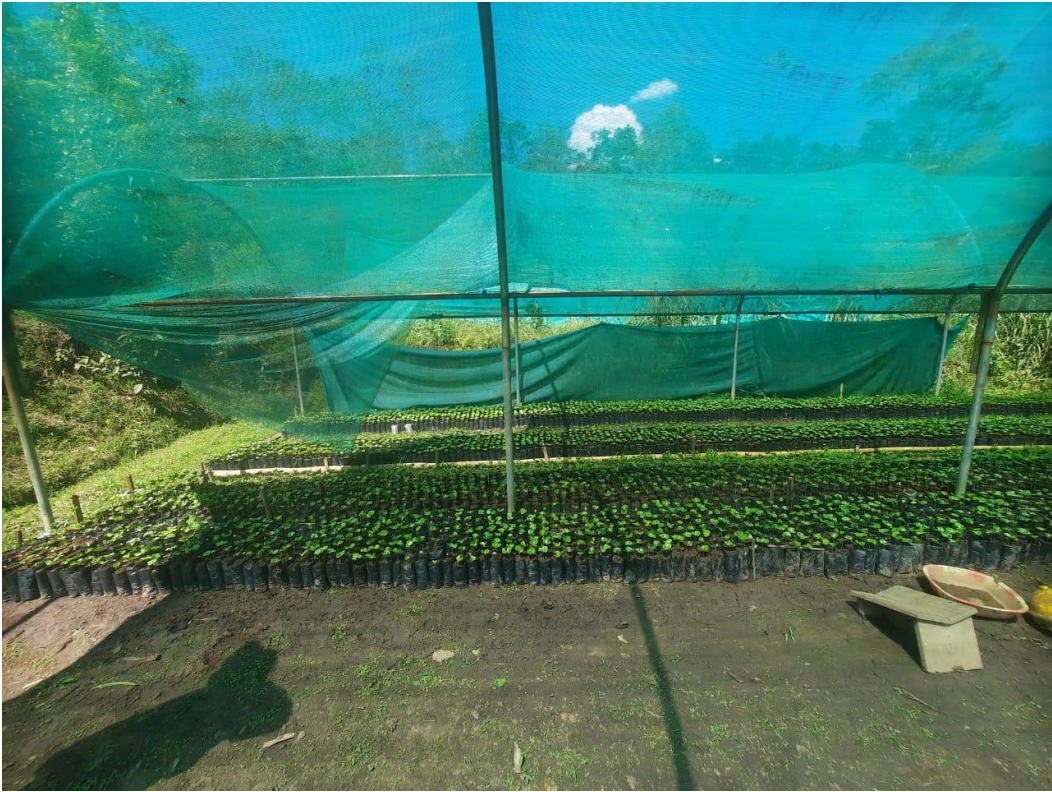
|  |   |
|--|---|
| <b>Color principal</b> Azul  | <b>Color</b> Azul   |
| <b>Características</b> Centrífuga (electrobomba) con motor de 1.5 HP/ 3450 RPM. Pintura anticorrosiva. Potencia eléctrica de 1.1 kW, tapón de purga, succión máxima de 9 m y altura máxima de presión de 40 m, caudal máximo de 120 l/min. Son recomendadas para bombear agua limpia, sin partículas abrasivas y líquidos que no sean agresivos con los materiales que constituyen la bomba. | <b>Garantía</b> 06 meses por defectos de fabricación  |
| <b>Profundidad Del Producto</b> 53 cm  | <b>Recomendaciones De Uso</b> Hacer revisión y mantenimiento periódicamente. Almacenar en un lugar fresco y seco. |
| <b>Altura Del Producto</b> 26 cm   | <b>Tipo de Producto</b> Bomba   |
| <b>Ancho Del Producto</b> 23 cm  | <b>Sub Tipo de Producto</b> Agua  |
| <b>Resistencia dieléctrica</b> No  | <b>Marca</b> Kaili  |
| <b>Peso Del Producto</b> 25.6 kg   | <b>Advertencia de uso</b> Mantener fuera del alcance de niños. Mantener alejado de fuentes de calor directo.      |
| <b>Tipo de uso</b> Profesional   |   |

**Bomba de agua Centrífuga Kaili 1.5 HP 120L/min**



*Anexo F: Fotografía del estado actual del vivero*







## Anexo G: Dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo

### 1. Potencia y energía requerida por la bomba

Para estimar la demanda energética del sistema de impulsión se parte de la potencia nominal de la bomba seleccionada. La bomba centrífuga multietapa presenta una potencia mecánica de 1,5 HP, equivalente a:

$$P_m = 1.5 \text{ hP} \times 476 = 1.12 \text{ kW}$$

Considerando un rendimiento promedio del motor eléctrico de  $\eta = 75 \%$ , la potencia eléctrica real que el sistema debe suministrar se obtiene mediante:

$$P_e = \frac{P_m}{\eta} = 1.5 \text{ kW}$$

Para el diseño se asume un tiempo de funcionamiento diario de la bomba de:

$$t = 1.5 \text{ h/día}$$

Con ello, la energía diaria requerida para la impulsión del agua es:

$$E_{bomba} = P_m t = 2.25 \text{ kWh/día}$$

Finalmente, al considerar las pérdidas asociadas cableado y elementos de conmutación estimadas en aproximadamente 0.77 de eficiencia global la energía que debe ser suministrada por el sistema fotovoltaico es:

$$E_{FV} = \frac{E_{bomba}}{0.77} = 2.9 \text{ kWh/día}$$

Este valor representa la energía neta que el generador fotovoltaico debe entregar diariamente para garantizar la operación continua y segura de la bomba en las condiciones establecidas de diseño.

### 2. Dimensionamiento del campo fotovoltaico

A partir de la demanda energética diaria calculada para la bomba de impulsión (2.9 kWh/día), se procede a dimensionar el generador fotovoltaico requerido para asegurar un suministro autónomo y continuo durante la operación del sistema de

riego automatizado. Para ello, se considera la radiación disponible en el distrito de Tabaconas, la cual presenta un promedio anual aproximado de 5 horas sol pico (HSP), valor adecuado para el diseño de sistemas solares en la región.

Asimismo, se incorpora un factor de rendimiento global del sistema fotovoltaico (PR), el cual engloba las pérdidas por temperatura, suciedad de los módulos, tolerancias de fabricación, orientación e inclinación del arreglo, envejecimiento del panel y efectos de cableado. En sistemas de pequeña escala instalados en condiciones reales de campo, se adopta típicamente un  $PR = 0.75$ .

Bajo estas condiciones, la potencia pico necesaria del generador fotovoltaico se determina mediante:

$$P_{FV} = \frac{E_{FV}}{HSP \cdot PR} = 078kW_p$$

El resultado indica que, en condiciones ideales, se requeriría un arreglo fotovoltaico mínimo de 780 Wp. Sin embargo, para garantizar un funcionamiento confiable incluso durante días parcialmente nublados, pérdidas adicionales no consideradas o degradación de los módulos, se recomienda incorporar un margen de seguridad en el diseño. Por tal motivo, se establece como capacidad instalada:

$$P_{FV,instalado} = 1kW_p$$

Esta potencia puede lograrse mediante diferentes configuraciones modulares, siendo una de las más adecuadas: 4 módulos de 250 Wp, configurados para operar en un sistema de 48 V, lo cual reduce las corrientes en el cableado y mejora la eficiencia del sistema.

### **3. Dimensionamiento del banco de baterías**

Dado que la energía diaria requerida para la impulsión del agua asciende a 2.9 kWh/día, el banco de baterías debe ser capaz de almacenar dicha cantidad con un margen de seguridad. Para minimizar las corrientes eléctricas y mejorar el rendimiento general del sistema, se opta por trabajar con un banco de 48 V, lo cual reduce las pérdidas por efecto Joule y permite un dimensionamiento más eficiente de conductores e inversor.

La capacidad útil requerida del banco se calcula mediante:

$$C_{\text{útil}} = \frac{E_{\text{bat}}}{V_{\text{bat}}} = 60 \text{ Ah}$$

Sin embargo, las baterías no deben descargarse completamente, ya que profundidades de descarga elevadas disminuyen sustancialmente su vida útil. Por ello, se considera una profundidad de descarga admisible (DoD) de 50 %, apropiada para baterías de ciclo profundo utilizadas en sistemas solares.

La capacidad nominal requerida es:

$$C_{\text{nominal}} = \frac{C_{\text{útil}}}{\text{DoD}} = 120 \text{ Ah}$$

Finalmente, se selecciona un banco ligeramente superior para asegurar un margen adicional frente a variaciones ambientales y desgaste de los acumuladores, quedando definido como:

Banco de baterías: 48 V – 150 Ah

(configuración: 4 baterías de 12 V – 150 Ah en serie).

Esta configuración proporciona la autonomía requerida, soporta sin inconvenientes la potencia demandada por el inversor durante el arranque de la bomba, y permite una operación estable del sistema fotovoltaico en las condiciones reales del Vivero Municipal de Tabaconas.

#### 4. Selección del regulador de carga MPPT

Para la selección del regulador se considera la corriente máxima que puede entregar el arreglo fotovoltaico bajo condiciones de máxima irradiancia. Dado que el sistema cuenta con una potencia instalada de:

$$P_{FV} = 1 \text{ kW}_p$$

y trabaja sobre un banco de:

$$V_{\text{bat}} = 48 \text{ V}$$

la corriente de operación aproximada del sistema es:

$$I_{FV} = \frac{P_{FV}}{V_{\text{bat}}} = 20.8 \text{ A}$$

Considerando posibles incrementos momentáneos de irradiancia, tolerancia positiva en la potencia de los módulos fotovoltaicos, y el margen requerido para garantizar una operación confiable, se adopta un factor de seguridad del orden del 25 %. El regulador deberá entonces admitir:

$$I_{MPPT} == 20.8 \text{ Ah} \times 1.25 = 26 \text{ A}$$

En consecuencia, se selecciona un regulador de carga tipo MPPT debido a su alta eficiencia en la extracción de energía de los módulos fotovoltaicos y su capacidad para optimizar la operación del arreglo bajo condiciones variables de radiación y temperatura.

Regulador recomendado:

Controlador MPPT de 48 V – 30 A

## 5. Selección del inversor de onda senoidal pura

El inversor es el dispositivo encargado de transformar la energía almacenada en el banco de baterías (48 VDC) en energía eléctrica en corriente alterna (220 VAC) apta para la operación de la bomba centrífuga multietapa seleccionada para el sistema de riego. Dado que la bomba es un motor eléctrico de alta potencia, es indispensable utilizar un inversor de onda senoidal pura, capaz de suministrar una señal estable, evitar sobrecalentamientos y garantizar un arranque adecuado sin inducir vibraciones, ruido eléctrico o pérdidas de eficiencia.

La bomba de impulsión posee una potencia eléctrica aproximada de:

$$P_e = 1.5 \text{ kWh}$$

Sin embargo, los motores eléctricos presentan una corriente de arranque superior a la corriente nominal, la cual puede ser entre 3 y 5 veces mayor según el tipo de motor y las condiciones de operación. Para efectos de diseño, se considera un factor conservador de 3.5:

$$P_{arr} = P_e \times 3.5$$

$$P_{arr} = 1.5 \times 3.5 = 5.25 \text{ kWh}$$

Por lo tanto, el inversor debe ser capaz de soportar: una potencia nominal suficiente para la operación continua de la bomba ( $\geq 1,5 \text{ kW}$ ), y una potencia pico superior a 5 kW durante el arranque, aunque sea por fracciones de segundo.

A partir de lo anterior, se recomienda seleccionar un inversor de categoría superior al mínimo requerido, lo cual aporta mayor seguridad operativa, evita apagones durante el arranque del motor y prolonga la vida útil del equipo.

Inversor recomendado:

Inversor de onda senoidal pura 48 VDC / 220 VAC - 3 000 W (nominal) – 6 000 W (pico).

La selección de un inversor de 3 kW nominales y aproximadamente 6 kW de capacidad pico permite una operación robusta y eficiente, garantizando la confiabilidad del sistema de riego automatizado bajo las condiciones reales del Vivero Municipal de Tabaconas.

## **6. Selección y configuración de los paneles fotovoltaicos**

Para determinar la configuración óptima del arreglo fotovoltaico, se considera la potencia pico requerida por el sistema (1 kWp), calculada en función de la demanda energética diaria del sistema de impulsión. Este dimensionamiento asegura que el generador solar pueda abastecer la energía neta requerida (2.9 kWh/día) bajo las condiciones de radiación solar del distrito de Tabaconas.

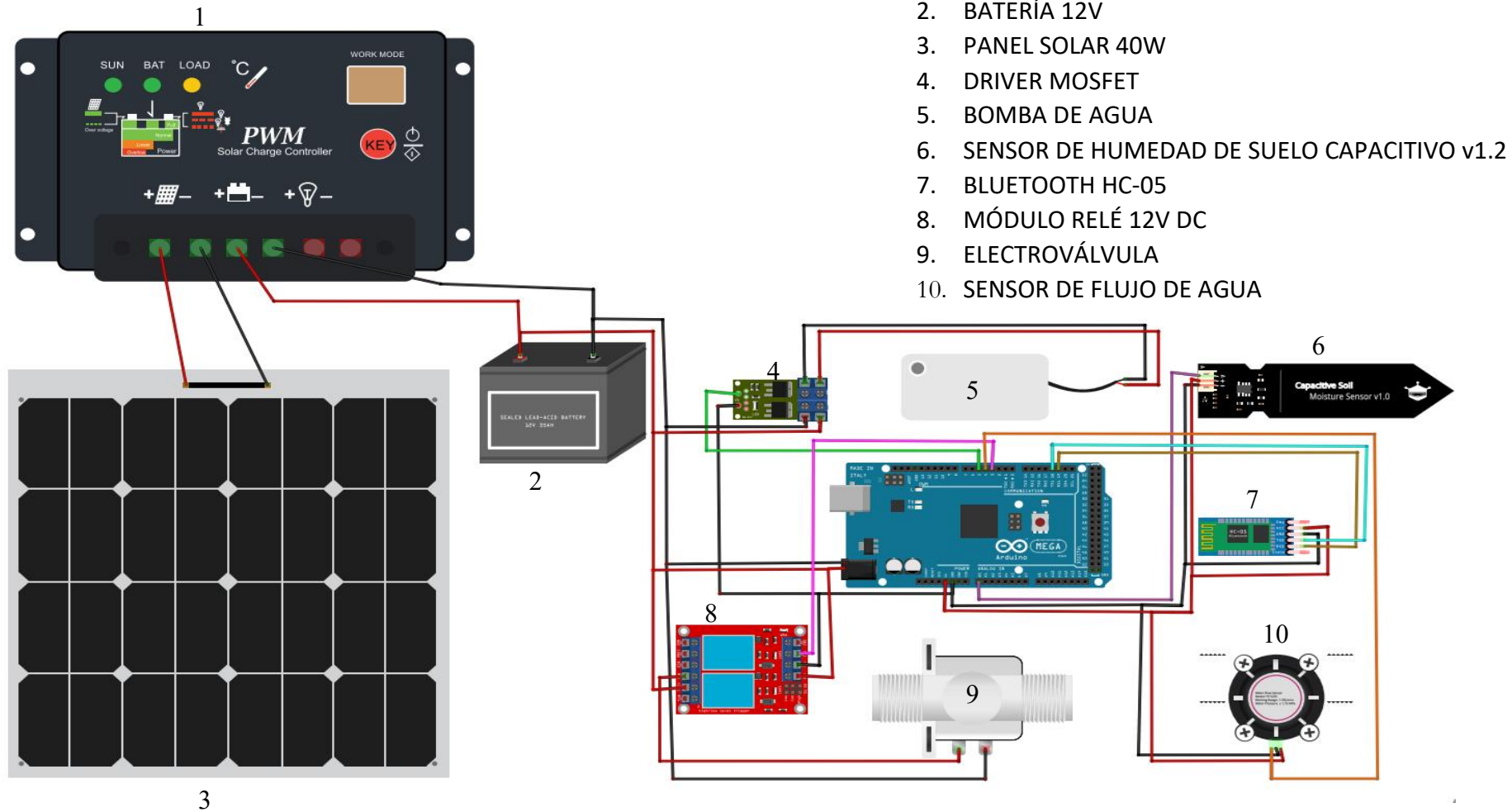
En el mercado peruano, los módulos de 340 Wp monocristalinos representan una alternativa comercial ampliamente disponible, con alta eficiencia y adecuada relación costo-beneficio. Estos módulos presentan características favorables como mejor desempeño en condiciones de alta temperatura, mayor densidad de potencia y una vida útil estimada superior a 25 años, lo cual es apropiado para instalaciones rurales de operación continua como el sistema de riego automatizado.

Para alcanzar la potencia fotovoltaica instalada requerida, se seleccionó la siguiente configuración:

$$P_{FV, instalada} = 3 \times 340 = 1.02 kW_p$$

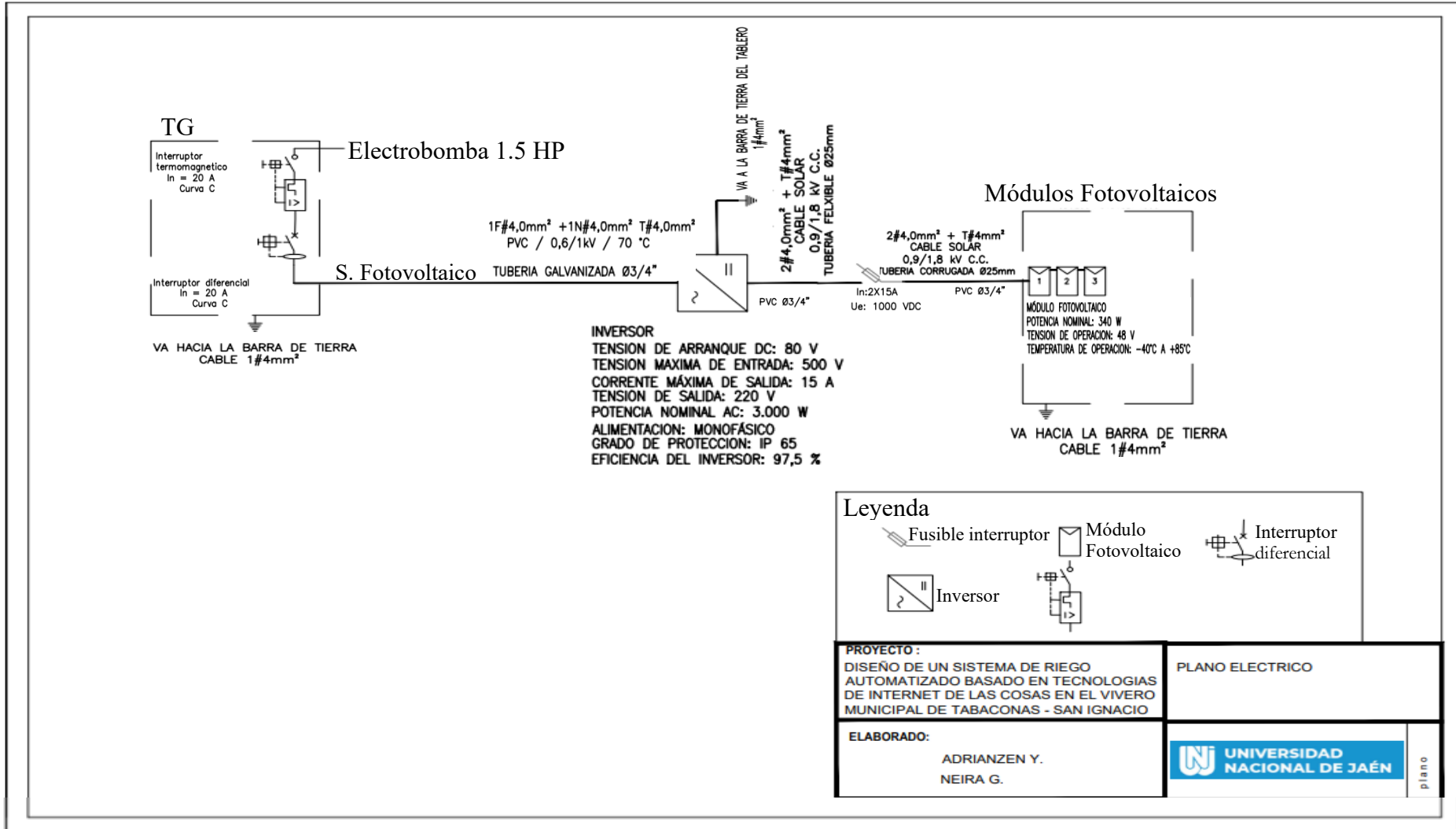
La potencia instalada de 1.02 kWp supera ligeramente el valor mínimo calculado (1.00 kWp), permitiendo enfrentar variaciones climáticas, degradación natural del panel y pérdidas adicionales no consideradas explícitamente en el modelo energético.

**Anexo H:** Diagrama electrónico del sistema de control IoT.



1. CONTROLADOR DE CARGA SOLAR
2. BATERÍA 12V
3. PANEL SOLAR 40W
4. DRIVER MOSFET
5. BOMBA DE AGUA
6. SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO CAPACITIVO v1.2
7. BLUETOOTH HC-05
8. MÓDULO RELÉ 12V DC
9. ELECTROVÁLVULA
10. SENSOR DE FLUJO DE AGUA

Anexo I: Plano eléctrico del sistema de riego automatizado



## Anexo J: Código del sistema de riego automatizado (Arduino Mega 2560 R3).

```
#include <EEPROM.h>

// ==== Sensor de humedad (solo 1 según diagrama) ====
const int AirValue = 987;
const int WaterValue = 427;

int soilValue = 0;
int soilPercent = 0;

// ==== Sensor de flujo FS300A ====
const int flujoPin = 2;           // Usualmente va en pin de interrupción
volatile int pulsosFlujo = 0;
float caudal_Lmin = 0;

// ==== Bomba y válvula ====
const int bombaPin = 8;          // Driver MOSFET
const int valvulaPin = 3;        // Módulo relé 12 V

// ==== Bluetooth HC-05 ====
char btCommand;
bool sistemaActivo = true;

// ==== Registro de humedad ====
const int MAX_REGISTROS = 10;
int registrosHumedad[MAX_REGISTROS];
int indiceRegistro = 0;
bool bufferLleno = false;

void contadorFlujo() {
    pulsosFlujo++;
}

void setup() {

    Serial.begin(9600);
    Serial1.begin(9600); // Bluetooth

    pinMode(flujoPin, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flujoPin), contadorFlujo,
RISING);

    pinMode(bombaPin, OUTPUT);
    pinMode(valvulaPin, OUTPUT);
    digitalWrite(bombaPin, LOW);
    digitalWrite(valvulaPin, LOW);
```

```

Serial1.println("Bluetooth listo.");
mostrarMenu();
}

void loop() {

// ==== Leer humedad ====
soilValue = analogRead(A0);
soilPercent = map(soilValue, AirValue, WaterValue, 0, 100);
soilPercent = constrain(soilPercent, 0, 100);

// ==== Guardar registró ====
registrosHumedad[indiceRegistro] = soilPercent;
indiceRegistro++;
if (indiceRegistro >= MAX_REGISTROS) {
    indiceRegistro = 0;
    bufferLleno = true;
}

// ==== Calcular caudal ====
pulsosFlujo = 0;
delay(1000); // Medición por 1 segundo
caudal_Lmin = (pulsosFlujo / 7.5); // Fórmula FS300A

// ==== Control automático ====
if (sistemaActivo) {
    if (soilPercent < 40) {
        digitalWrite(bombaPin, HIGH);
        digitalWrite(valvulaPin, HIGH);
    }
    else if (soilPercent > 60) {
        digitalWrite(bombaPin, LOW);
        digitalWrite(valvulaPin, LOW);
    }
} else {
    digitalWrite(bombaPin, LOW);
    digitalWrite(valvulaPin, LOW);
}

// ==== Comandos Bluetooth ====
if (Serial1.available()) {
    btCommand = Serial1.read();
    procesarComando(btCommand);
}
}

void procesarComando(char cmd) {
    switch (cmd) {

```

```

case '1':
    Serial1.println("=== ESTADO ===");
    Serial1.print("Humedad: "); Serial1.println(soilPercent);
    Serial1.print("Caudal (L/min): "); Serial1.println(caudal_Lmin);
    Serial1.print("Sistema: ");
    Serial1.println(sistemaActivo ? "ACTIVO" : "APAGADO");
    mostrarMenu();
    break;

case '2':
    sistemaActivo = false;
    digitalWrite(bombaPin, LOW);
    digitalWrite(valvulaPin, LOW);
    Serial1.println("⚠ Sistema APAGADO.");
    mostrarMenu();
    break;

case '3':
    sistemaActivo = true;
    Serial1.println("✅ Sistema ENCENDIDO.");
    mostrarMenu();
    break;

case '5':
    resumenHumedad();
    mostrarMenu();
    break;

default:
    Serial1.println("❌ Opción no válida.");
    mostrarMenu();
    break;
}
}

void mostrarMenu() {
    Serial1.println("\n=== MENU RIEGO ===");
    Serial1.println("1. Ver estado actual");
    Serial1.println("2. Apagar el sistema");
    Serial1.println("3. Encender el sistema");
    Serial1.println("5. Resumen de humedad");
    Serial1.println("=====");
}

void resumenHumedad() {

    Serial1.println("\n📊 REGISTROS DE HUMEDAD 📊");

    int total = bufferLleno ? MAX_REGISTROS : indiceRegistro;

```

```

if (total == 0) {
    Serial1.println("Aún no hay registros.");
    return;
}

int suma = 0, maxH = 0, minH = 100;

for (int i = 0; i < total; i++) {
    int valor = registrosHumedad[i];
    suma += valor;
    if (valor > maxH) maxH = valor;
    if (valor < minH) minH = valor;

    Serial1.print("Registro ");
    Serial1.print(i + 1);
    Serial1.print(": ");
    Serial1.print(valor);
    Serial1.println(" %");
}

float promedio = (float)suma / total;

Serial1.println("-----");
Serial1.print("Promedio: "); Serial1.println(promedio);
Serial1.print("Máximo: "); Serial1.println(maxH);
Serial1.print("Mínimo: "); Serial1.println(minH);
}

```