

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE FERTIRRIEGO AUTOMATIZADO Y
AUTÓNOMO ENERGÉTICAMENTE MEDIANTE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN
CULTIVOS DE QUINUA, SACHA INCHI, CACAO Y CAFÉ**

LUIS ALFONSO MENESES BERMEO
DAVID ESTEBAN PUPIALES FIGUEROA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2021

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE FERTIRRIEGO AUTOMATIZADO Y
AUTÓNOMO ENERGÉTICAMENTE MEDIANTE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN
CULTIVOS DE QUINUA, SACHA INCHI, CACAO Y CAFÉ**

LUIS ALFONSO MENESES BERMEO
DAVID ESTEBAN PUPIALES FIGUEROA

DIRECTOR PhD. RUBIEL VARGAS CANAS
CODIRECTOR MSc. RODRIGO ALBERTO MONTAÑO FUENTES

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN

2021

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de sus autores”



Director _____



PhD. Rubiel Vargas Canas

Codirector _____



MsC. Rodrigo Alberto Montaña Fuentes

Jurado _____



Dr. Willfrand Pérez Urbano

Jurado _____

Ing. Germán Arturo Bacca

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros agradecimientos.

A la Universidad del Cauca, por brindarnos la oportunidad de obtener el conocimiento necesario para cumplir con esta meta y formarnos íntegramente como profesionales en Ingeniería Física.

A nuestros directores Rubiel Vargas y Rodrigo Montaña, por dedicar su tiempo y apoyarnos en el proceso de formación y realización de este proyecto.

Al servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Por abrirnos sus puertas y brindarnos un espacio donde se llevó a cabo el desarrollo del proyecto.

A los jurados de este trabajo de grado, los profesores Willfrand Pérez Urbano y Germán Arturo Bacca, por el tiempo dedicado y sus valiosas contribuciones.

A nuestros padres y familiares que siempre nos han acompañado y apoyado en el proceso de formación académico, contribuyendo en nuestra formación personal y profesional.

DEDICATORIA

A nuestros padres quienes nos apoyaron para poder llegar a esta instancia de nuestros estudios, nos forjaron como las personas que somos, motivándonos constantemente para alcanzar nuestros anhelos.

Agradecemos mucho por la ayuda de nuestros maestros, nuestros compañeros y a la universidad en general por todas las experiencias y conocimientos que nos otorgaron.

RESUMEN

El presente trabajo de grado consiste en el desarrollo de un prototipo de fertirriego automatizado y autónomo energéticamente, orientado al control de riego y suministro de nutrientes a partir de la humedad del suelo, tipo y edad del cultivo, que brinda al usuario el monitoreo de variables físicas (humedad del suelo, temperatura ambiente) y funcionamiento del sistema, mediante una interfaz de usuario para los cultivos de cacao, café, quinua y sachá inchi. Para lograr esto se utilizaron diversos dispositivos electrónicos tales como sensores, actuadores y un microcontrolador (Arduino Mega) que recibió los datos medidos, mostrándolos en pantalla mediante la interfaz HMI elaborada en LabVIEW y realizando el control en el prototipo implementado para desarrollar las acciones pertinentes.

Después de haber realizado las pruebas y determinado el consumo energético del sistema, se reajustó el sistema solar fotovoltaico con el fin de reducir el gasto energético y determinar si el sistema que se diseñó inicialmente está sobredimensionado. La energía eléctrica que se obtenga servirá para que el sistema de control funcione se active. El sistema será completamente automático, el sistema fotovoltaico proporcionará la energía que se requiera, mientras que el sistema de control se encargará del comportamiento que tendrá la electroválvula para realizar el riego. El sistema está proyectado a la simplicidad, bajo costo y la mayor aplicabilidad posible, de manera que su operación y mantenimiento sean simples de hacer.

GLOSARIO

- **Algoritmo:** Es un conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema.
- **Convertor:** Es un dispositivo que permite pasar de una variante de energía a otra (de tensión a corriente, de AC a DC, análogo/digital, etc.).
- **Fertirriego:** Aplicación de fertilizantes sólidos (diluidos) o líquidos en los cultivos, mediante sistemas de riego presurizados o por goteo..
- **LabVIEW:** Es un entorno de desarrollo para el desarrollo de sistemas, que usa un lenguaje de programación visual gráfico, enfocado para sistemas de hardware y software de pruebas, control y diseño simulado o real.
- **HMI:** La Interfaz Hombre-Máquina (HMI, por sus siglas en inglés) es la interfaz entre la máquina procesadora y el operario.
- **PLC:** El PLC (Control Lógico Programable) es un equipo comúnmente utilizado por aquellas industrias que buscan dar un salto significativo en la automatización de todos sus procesos.
- **ERA:** Cuadro pequeño de tierra destinado al cultivo de flores u hortalizas
- **PANEL SOLAR:** es un dispositivo que aprovecha la energía del sol para generar calor o electricidad.
- **ARDUINO:** Es una placa basada en un microcontrolador ATMEL. Los microcontroladores son circuitos integrados en los que se pueden grabar instrucciones, las cuales las escribes con el lenguaje de programación que puedes utilizar en el entorno Arduino IDE.
- **ZNI:** Las zonas no interconectadas (ZNI) son los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional
- **FERTILIZANTE:** cualquier tipo de sustancia orgánica o inorgánica que contiene nutrientes en formas asimilables por las plantas, para mantener o incrementar el contenido de estos elementos en el suelo, mejorar la calidad del sustrato a nivel nutricional, estimular el crecimiento vegetativo de las plantas, etc.}
- **AUTOMATIZACIÓN:** Aplicación de máquinas o de procedimientos automáticos en la realización de un proceso o en una industria.
- **SISTEMA PILOTO:** Un sistema piloto es un esfuerzo temporal que se asume para probar la viabilidad de una solución exclusiva del sistema propuesta.

- **PROTOTIPO:** Un prototipo es un ejemplo del primer molde fabricado o una figura u otra cosa. Un prototipo también se puede referir a cualquier tipo de máquina en pruebas, o un objeto diseñado para una demostración de cualquier tipo.
- **TIEMPO DE INERCIA:** Es el tiempo en el que el valor de la humedad sigue aumentando y llega a un punto de estabilidad, luego de detenerse el suministro de agua.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| 1.1 Diagrama de bloques de la Metodología implementada | 3 |
| 2.1 Esquema general sistema de supervisión y control | 7 |
| 2.2 Sistema fotovoltaico | 8 |
| 2.3 Modelo eléctrico de una célula solar | 9 |
| 2.4 Componentes de una batería ácido-plomo | 10 |
| 2.5 Modelo eléctrico de una batería | 11 |
| 2.6 Esquema eléctrico de un regulador de carga | 13 |
| 2.7 Sistema de control de riego | 14 |
| 2.8 Sistema de control de riego para invernadero | 15 |
| 2.9 Sistema de riego por microaspersión | 16 |
| 2.10 Sistema de riego automatizado | 16 |
| 2.11 Simulación sistema de riego automatizado | 17 |
| 2.12 Diseño sistema automático de fertirrigación | 18 |
| 2.13 Esquema del sistema de control automatizado de riego | 19 |
| | |
| 3.1 Diseño del sistema de fertirriego | 23 |
| 3.2 Diagrama control de riego | 24 |
| 3.3 Diagrama control de nutrientes | 25 |
| 3.4 Módulo sensor de flujo | 25 |
| 3.5 Transductor de humedad YL-69 | 27 |
| 3.6 Calibración del sensor de humedad | 28 |
| 3.7 Sensor de temperatura DS18B20 | 29 |
| 3.8 Tarjeta de relés acoplada | 29 |

| | |
|--|----|
| 3.9 Cinta de riego | 30 |
| 3.10 Electroválvula | 31 |
| 3.11 Placa de Arduino | 31 |
| 3.12 Diagrama de flujo de la interfaz | 32 |
| 3.13 Diagrama de flujo de la pestaña principal de la interfaz | 33 |
| 3.14 Diagrama de flujo de la pestaña Personalizada | 34 |
| 3.15 Diagrama de flujo de la pestaña variables del cultivo | 35 |
| 3.16 Panel solar | 36 |
| 3.17 Regulador MPPT-75 | 37 |
| 3.18 Acumulador MT12180HRG | 38 |
| 3.19 Sensor FZ0430 | 39 |
| 3.20 Cableado eléctrico THHN #14 | 39 |
| 3.21 Diseño del sistema fotovoltaico | 40 |
| 3.22 Prototipo inicial de fertirriego | 41 |
| | |
| 4.1 Montaje del sistema de control | 45 |
| 4.2 Montaje del sistema de riego | 45 |
| 4.3 Interfaz HMI | 46 |
| 4.4 Prototipo de fertirriego | 46 |
| 4.5 Prueba funcionamiento de electroválvula | 47 |
| 4.6 Resultados de la prueba con la humedad descendiendo | 48 |
| 4.7 Resultados de la prueba dos con humedades iniciales diferentes | 49 |
| 4.8 Relación de la humedad final vs inicial | 52 |
| 4.9 Resultados de la prueba con función de corrección | 53 |

| | |
|--|----|
| 4.10 Resultados de la prueba dos con función de corrección | 54 |
| 4.11 Primeros resultados de la prueba del sistema operando por tres días | 55 |
| 4.12 Segundos resultados de la prueba del sistema operando por tres días | 56 |
| 4.13 Gráfica de estados en la aplicación de nutrientes | 57 |
| 4.14 Pestaña principal de la interfaz | 58 |
| 4.15 Pestaña personalizada de la interfaz. | 59 |
| 4.16 Pestaña variables del cultivo de la interfaz. | 60 |

INDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| 3.1 Calibración sensor de caudal | 26 |
| 3.3 Prueba con humedades finales diferentes | 59 |
| 3.4 Pruebas con función de corrección | 60 |
| 3.4 Pruebas con función de corrección | 60 |
| 4.1 Resultados de la prueba de funcionamiento de las electroválvulas | 64 |
| 4.2 Resultados de la prueba con humedades iniciales diferentes | 66 |
| 4.3 Resultados de la prueba dos con humedades iniciales diferentes | 67 |
| 4.4 Resultados de la prueba con humedades finales diferentes | 68 |
| 4.5 Resultados de la prueba con función de corrección | 70 |
| 4.6 Resultados de la prueba dos con función de corrección | 71 |
| 4.7 Consumo de potencia del sistema | 78 |
| 4.8 Condiciones de diseño del SFV | 78 |
| 4.9 Consumo de potencia y diseño del sistema | 78 |
| 4.10 Resultados del consumo energético con tres eras operando y el sistema sin función de corrección | 79 |
| 4.11 Resultados del consumo energético con tres eras operando y el sistema con función de corrección | 79 |
| 4.12 resultados del consumo energético del sistema durante 3 días | 80 |
| 4.13 resultados del consumo energético del sistema durante tres días para N eras | 81 |
| 4.14 Resultados del consumo energético del sistema durante tres días para tres eras | 81 |
| 4.15 Elementos del SFV diseñado | 82 |

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.2 OBJETIVOS | 2 |
| 1.2.1 Objetivo general | 2 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 2 |
| 1.3 METODOLOGÍA | 2 |
| 1.4 CONTRIBUCIÓN | 3 |
| 1.5 DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO | 4 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 4 |
| 2.1 MARCO CONCEPTUAL | 4 |
| 2.1.1 Requerimientos de agua de los cultivos | 4 |
| 2.1.2 La nutrición controlada | 5 |
| 2.1.3 Fertirriego | 5 |
| 2.1.4 La automatización | 6 |
| 2.1.5 Energía fotovoltaica | 8 |
| 2.1.6 Baterías de corriente directa | 9 |
| 2.1.6.1 Baterías de ácido-plomo | 10 |
| 2.1.7 Regulador de carga | 12 |
| 2.2 ESTADO DEL ARTE | 14 |
| 2.2.1 Contexto internacional | 15 |
| 2.2.2 Contexto nacional | 17 |
| 2.2.1 Contexto regional | 19 |
| 2.2 ANÁLISIS DE LITERATURA | 20 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 22 |
| 3.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE FERTIRRIEGO | 22 |
| 3.1.1 Sistema de adquisición de información ambiental | 23 |
| 3.1.2 Sistema de irrigación | 23 |
| 3.1.3 Materiales | 29 |
| 3.2 CREACIÓN DE LA INTERFAZ | 34 |
| | XIII |

| | |
|---|----|
| 3.3 DISEÑO DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO AISLADO | 36 |
| 3.3.1 Elementos constitutivos del sistema solar fotovoltaico | 37 |
| 3.3.2 Diseño de pruebas | 40 |
| 3.3.3 Cálculo del estado de carga del banco de baterías | 40 |
| 3.4 PROTOCOLOS DE EVALUACIÓN | 44 |
| 3.4.1 Pruebas del sistema de fertirriego | 41 |
| 3.4.2 Pruebas del sistema fotovoltaico | |
| 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 44 |
| 4.1 MONTAJE DE PRUEBA DEL SISTEMA DE CONTROL | 44 |
| 4.1.1 Prueba de funcionamiento de electroválvulas | 46 |
| 4.1.2 Prueba cuando la humedad desciende | 48 |
| 4.1.3 Prueba con humedades iniciales diferentes | 49 |
| 4.1.4 Prueba con humedades finales diferentes | 51 |
| 4.1.5 Función de corrección | 51 |
| 4.1.6 Prueba con función de corrección | 52 |
| 4.1.7 Prueba dos con función de corrección | 54 |
| 4.1.8 Prueba del sistema operando durante tres días | 55 |
| 4.1.9 Prueba de suministro de nutrientes | 55 |
| 4.2 INTERFAZ DE USUARIO | 57 |
| 4.2.1 Pestaña principal | 57 |
| 4.2.2 Pestaña personalizada | 58 |
| 4.2.3 Pestaña de variables de cultivo | 59 |
| 4.3 DISEÑO DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO | 60 |
| 4.3.1 Consumo energético con tres eras operando y el sistema sin función de corrección | 62 |
| 4.3.2 Consumo energético con tres era operando y el sistema con función de corrección | 62 |
| 4.3.3 Consumo energético del sistema durante tres días | 63 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 65 |
| 5.1 CONCLUSIONES | 65 |
| 5.2 RECOMENDACIONES | 66 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA | 67 |

1. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se diseñó e implementó un prototipo de un sistema automatizado y autónomo energéticamente, orientado al control de la aplicación de nutrientes con un sistema de fertirriego manipulado por control remoto para cultivos de cacao, café, quinua y sachá inchi. Es importante aclarar que el control implementado en este proyecto es del tipo on-off para el riego y suministro de nutrientes, permitiendo mantener en un rango preestablecido las variables de interés. El sistema será proyectado a la simplicidad y mayor aplicabilidad posible, de manera que su operación y mantenimiento sean simples.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La degradación de la tierra, es un problema de gran importancia al momento de cultivar una planta, es causada por la aplicación de prácticas agrícolas erosivas y el abandono de las mismas en áreas semiáridas con suelos pobres y vulnerables, por eso es fundamental corregir las deficiencias de nutrientes detectadas en el análisis de tejidos de plantas [1]. Una manera de hacerlo es utilizando un sistema de fertirriego, el cual proporciona directamente a la planta los componentes necesarios para su crecimiento, por lo que es útil para suelos degradados o de igual manera en suelos nutridos puesto que permite una mejor distribución de nutrientes [2]. Sin embargo, en un sistema de fertirriego, se identifican ciertas dificultades que afectan su eficiencia, ya que al ser un diseño operado manualmente su control en el riego de los nutrientes no es muy preciso, porque no se cuentan con herramientas suficientes para su correcto funcionamiento, generando un mayor gasto en recursos hídricos, mayores costos, menor productividad y reducción de calidad en los cultivos [3].

Por otro lado, se encuentran las zonas no interconectadas en Colombia que no permiten que las poblaciones residentes de dichas regiones tengan acceso a energía eléctrica constante y de calidad, por ejemplo, la no prestación del servicio de electricidad en 21,775 de usuarios de zonas no interconectadas (ZNI) o mal funcionamiento de la prestación de los servicios de red eléctrica en el departamento del Cauca [4]. Esto impide la oportunidad de acceso a nuevas tecnologías por tal razón es conveniente pensar en una fuente de energía alternativa.

A partir de literatura analizada se observa que algunos proyectos si bien cuentan con una interfaz de usuario, no son autónomos energéticamente o viceversa, mientras que este proyecto cuenta con un sistema solar, interfaz de usuario, control remoto, almacenamiento de datos, control

manual y variedad de cultivo, por lo tanto, se evidencia la importancia de un proyecto como el presente tanto a nivel nacional como internacional

Con base en lo anterior ¿cómo mejorar la eficiencia de un sistema de fertirriego para los cultivos de sachá inchi, cacao, quinua, café y que garantice su funcionamiento mediante una fuente de energía renovable?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema automatizado para riego y suministro de nutrientes, mediante un sistema de fertirriego con supervisión remota y autónomo energéticamente mediante energía solar fotovoltaica para cultivos de quinua, sachá inchi, cacao y café.

1.2.2 Objetivos Específicos

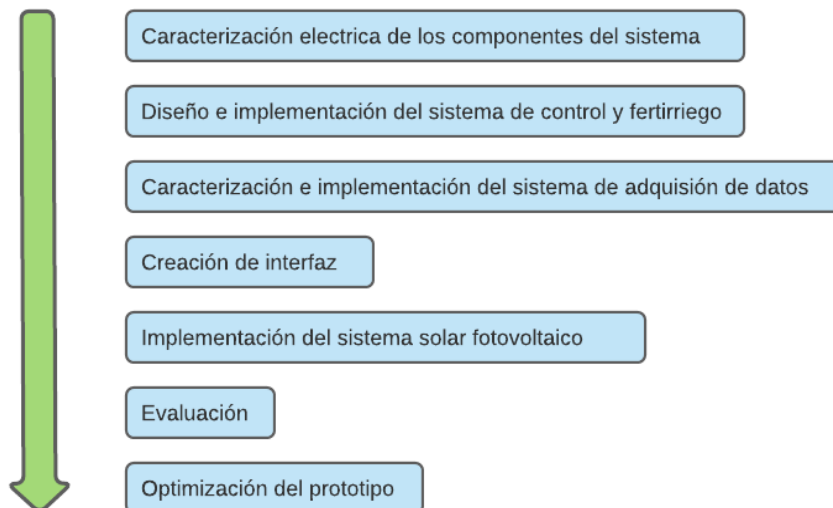
- Implementar un sistema automatizado de monitoreo y control a partir de la humedad, tipo y edad del cultivo, con interfaz de usuario, para el riego y suministro de nutrientes para cultivos de quinua, sachá inchi, cacao y café.
- Implementar un sistema de energía solar fotovoltaica que suministre la energía eléctrica necesaria al sistema piloto de fertirriego.
- Analizar y evaluar el funcionamiento del sistema piloto de fertirriego implementado para los cultivos de referencia, en los casos de estudio.

1.3 METODOLOGÍA

Este proyecto fue desarrollado en siete etapas (Figura 1.1), donde se describen los procesos metodológicos para la culminación del mismo, en primer lugar se seleccionaron los componentes eléctricos del sistema de acuerdo a las características energéticas del sistema piloto de fertirriego y se realizó un primer diseño del sistema de control y fertirriego para realizar pruebas, luego se instalaron los sensores que permiten medir las variables del sistema (humedad del suelo, temperatura ambiente y caudal), paso después, se desarrolla una interfaz gráfica con el fin de visualizar los datos registrados por el sistema de sensado y permitir la interacción máquina-hombre, para luego tomar las acciones de control pertinentes, utilizando el software LabVIEW y Arduino, donde se desarrolló el programa de control e interfaz, posteriormente se implementó un diseño del sistema solar fotovoltaico y se realizaron pruebas simuladas de control, obteniendo

un correcto funcionamiento acorde a las variables de entrada y por último se llevó a cabo la optimización del prototipo.

Figura 1.1 Diagrama de flujo de la Metodología implementada



1.4 CONTRIBUCIÓN

Con el presente proyecto se aporta en primera instancia con una solución novedosa y efectiva de un sistema de fertirriego para cultivos de cacao, quinua, sachá inchi y café, además cabe mencionar que fue un proyecto seleccionado como ponencia en el “I Congreso Virtual Internacional de la Industria 4.0” desarrollado por el SENA. La automatización de este sistema probablemente reducirá gastos en recursos hídricos, eléctricos, en mano de obra y fertilizantes. En cuanto a las zonas carentes de un suministro de energía eléctrica, el uso de energía solar fotovoltaica será una solución viable y contribuirá a la masificación de este tipo de sistemas, siendo esto una inversión a largo plazo.

La implementación de este tipo de tecnología en el campo agropecuario permitirá a los agricultores incursionar en la innovación tecnológica favoreciendo su productividad y competitividad, facilitando la tecnificación de cultivos como cacao, quinua, sachá inchi y café, convirtiéndolos en alternativas para reemplazar plantaciones ilícitas y como punto de partida para usar este tipo de tecnologías en otros cultivos.

1.5 DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO

A continuación, se hace una breve introducción a los próximos capítulos.

En el capítulo II se muestra el marco teórico, un marco conceptual y un marco referencial para finalmente hacer el respectivo análisis de la literatura en comparación al proyecto desarrollado, en el capítulo III se da a conocer cómo se elaboró el prototipo de fertirriego y el sistema fotovoltaico y los materiales utilizados para su construcción, también se muestra el diseño de la interfaz de usuario, y finalmente los protocolos de evaluación que se usaron para estudiar los elementos que constituyen el prototipo. Y, en el capítulo IV se exponen los resultados y el análisis de los mismos, mostrando así cómo fue el diseño y la implementación del prototipo, con sus respectivas pruebas y las respectivas correcciones que se hicieron para mejorar la funcionalidad de dicho prototipo. El capítulo V concluye el presente trabajo y sugiere el camino a seguir para trabajos futuros.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1 Requerimientos de agua de los cultivos

El avance en la agricultura ha presentado nuevas técnicas que permiten optimizar la utilización del agua, conservando un equilibrio entre el requerimiento hídrico de la planta y la accesibilidad de este recurso esencial en el tiempo y el área [5].

Para crecer saludablemente, las plantas necesitan lograr un consumo de agua donde la demanda que requieren mantenga un equilibrio con la oferta disponible, el problema está en que la demanda evaporativa de la atmósfera es normalmente constante, en tanto que la lluvia y el riego se da en ocasiones y de manera cambiante. Para sobrevivir en los tiempos secos de lluvias o riego, la planta debe tener la capacidad de usar el agua retenida y almacenada en las áreas porosas del suelo [5].

Adicionalmente las plantas tienen la capacidad de limitar la velocidad de transpiración, al cerrar las estomas de sus hojas, no obstante, al limitar la transpiración se disminuye su crecimiento potencial, ya que las mismas estomas que transpiran el vapor de agua hacia la atmósfera, cumplen la función de absorber anhídrido carbónico que es el sustrato primordial de la fotosíntesis, así mismo una transpiración reducida impulsa un alza en la temperatura interna de la planta, lo cual perjudica sus actividades metabólicas, especialmente la respiración, que

duplica su velocidad por cada 10 °C de aumento en su temperatura, hasta una temperatura crítica de 45 °C, donde puede colapsar la estructura celular [5].

Actualmente existen diferentes sistemas de riego que permiten abastecer los cultivos del recurso hídrico, los cuales manejan un aspecto fundamental que es la frecuencia. Determinar cuándo regar (frecuencia de riego) puede definirse desde el punto de vista del agua en el suelo, usando como índices ya sea el contenido de agua o la tensión con que esta se presenta retenida en algún momento, La frecuencia de riego óptima también se puede definir de acuerdo a un cálculo o estimación del consumo de agua del cultivo, teniendo en cuenta la evaporación desde el suelo y la transpiración de las plantas [5].

2.1.2 La nutrición controlada

Un control preciso de la nutrición de las plantas, favorece a un mayor rendimiento y una mejora cualitativa de los productos y para ello debe tenerse en cuenta que la disolución nutritiva de los cultivos requiere diseñarse a medida. La investigación en Química Agrícola ha enfocado sus esfuerzos últimamente en optimizar disoluciones nutritivas ideales para cada clase de cultivo, teniendo en cuenta que una nutrición apropiada debe respetar los requerimientos de la planta en cada estado de su crecimiento, es decir se debe garantizar un balance nutriente evolutivo, de esta manera, se le suministra a la planta lo que necesita en todo momento, previniendo lixivitaciones, contaminantes y posibles toxicidades [5].

Otro factor que influye en el desarrollo de una planta, es controlar el pH y la conductividad eléctrica de la disolución nutritiva, de acuerdo con los requerimientos óptimos del cultivo y de las condiciones ambientales. La conductividad que se expresa frecuentemente como mili Siemens/cm, se requiere mantener en un rango deseable entre 2,0 a 4,0, y respecto al pH lo ideal suele oscilar entre 5,5 y 6,5 (Los valores fuera de estos intervalos puede dar lugar a un marchitamiento, frenando el desarrollo y desecando los frutos) de tal manera que el especialista puede adecuar su disolución nutritiva a estos niveles, a través de la adición de fertilizantes [5].

2.1.3 Fertirriego

Se conoce como fertirriego a la aplicación de los nutrientes que requiere la planta junto con el agua de riego, para su crecimiento y desarrollo, por lo que se debe ajustar en función del cultivo, época del año, estado de desarrollo de la planta y la meta de producción. Para un adecuado

funcionamiento del fertirriego es importante conocer las características del agua y puede determinarse en relación con el manejo del cultivo, como proveer a la planta del recurso hídrico necesario para la absorción y transporte de nutrientes, reducir la salinidad de la rizosfera y equilibrar el contenido de nutrientes, que permita controlar la floración y/o la maduración de frutos, además ayuda a oxigenar las raíces y bajar la temperatura del suelo, cumpliendo con los objetivos del fertirriego [5].

Los fertilizantes se han venido elaborando de tal manera, que sea un compuesto más soluble en agua y así se integre de forma más uniforme en los cultivos. Los componentes que constituyen los fertilizantes no siempre vienen en su estado natural, debido a su dificultad de manipulación y a que, en su gran mayoría, pueden ser absorbidos por las plantas solamente en forma de compuesto. Además los diferentes nutrientes se consiguen por separado, pero no todos se pueden mezclar entre sí, dado que pueden reaccionar entre ellos y colapsar, como en el caso del calcio, que crea granos en la mezcla y no se disuelve en el agua, generando taponamientos de la tubería de irrigación, por lo que es importante que un ingeniero agrónomo asuma la tarea de calcular cómo los componentes reaccionan y hacer la mezcla de estos, por lo cual debe disponer de varios tanques, donde se almacenarán las diferentes sustancias que serán suministradas al cultivo, en diferentes lapsos de tiempo [6].

2.1.4 La automatización

La automatización es un concepto que generalmente suele utilizarse en el ámbito de la industria relacionándolo con el sistema que permite que una máquina pueda desarrollar procesos o realice tareas sin la intervención del ser humano. con frecuencia, la automatización es empleada por su capacidad de ahorrar tiempo y dinero. El origen de la automatización viene desde prehistoria, con el desarrollo de algunas máquinas simples que en su tiempo minimizaron la fuerza que debían hacer las personas. La energía mecánica ejercida por el hombre o por animales, con el tiempo, ha empezado a ser reemplazada por energías renovables como por ejemplo la energía hidráulica o la eólica, desde entonces se ha comenzado una carrera por mejorar los procesos a través de la automatización en todo el mundo, y, debido a esto, en la actualidad se cuenta con tecnologías muy avanzadas de control y comunicación con redes de producción autómatas con variedad [8].

Existen herramientas que permiten supervisar y controlar diferentes variables que pueden presentarse en un proceso o planta. Además de ser controlado a distancia gracias a una interfaz gráfica que comunica al usuario con el sistema [9].

Este tipo de sistemas constan de tres etapas: adquisición de datos, supervisión y control, existe usualmente un ordenador, el cual efectúa las tareas de supervisión y gestión de alarmas, además se puede realizar tratamiento de datos [9]. En la primera etapa del proceso de supervisión y control (Figura 2.1) se realiza la adquisición de datos, aquí se obtienen las señales que representan los fenómenos físicos, que suceden a través del tiempo. Es indispensable contar con los sensores o transductores adecuados para realizar la medición de dichos fenómenos y acondicionar dichas señales para que el procesador digital almacene los datos obtenidos y puedan ser transferidos en tiempo real al panel de visualización y control, dicha visualización se realiza a través de una interfaz gráfica de fácil acceso, el cual permite tomar decisiones y modificar la evolución de un proceso si así se requiere, de este modo se vigila continuamente que el sistema cumpla con los parámetros establecidos previamente sin la supervisión constante de un operador humano [10].

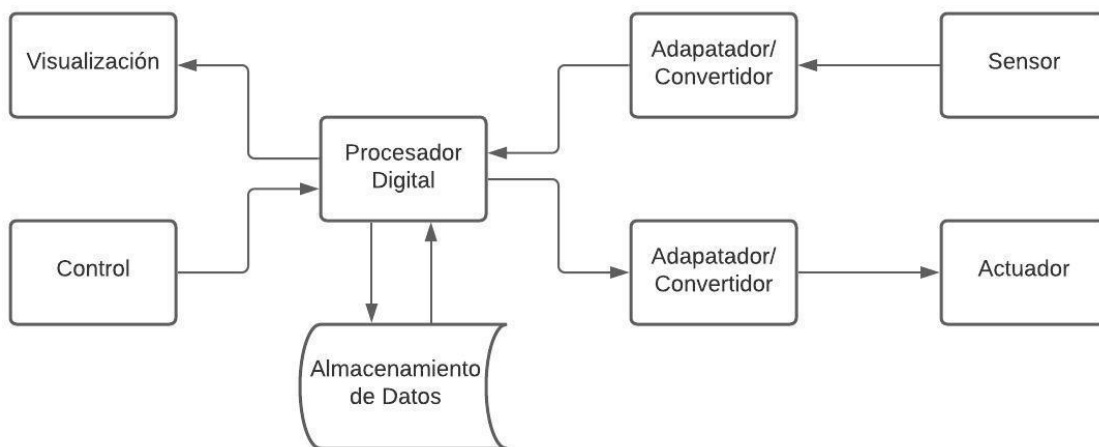


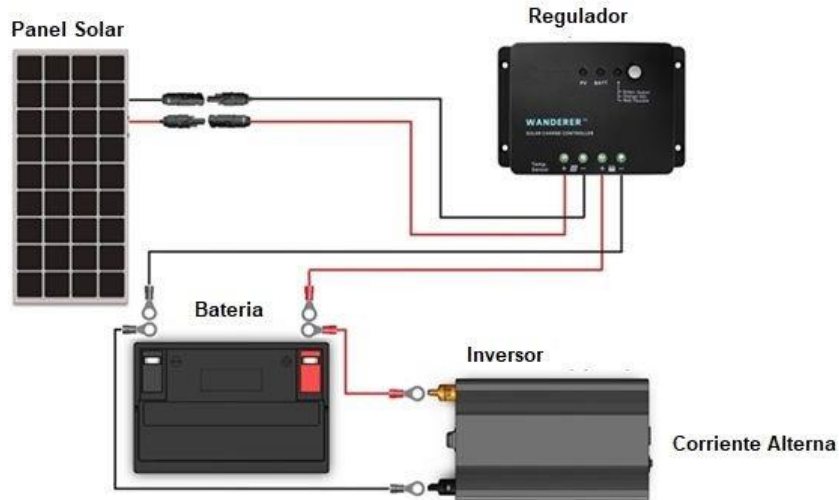
Figura 2.1 Esquema general sistema de supervisión y control

La energía fotovoltaica es el proceso de convertir directamente la luz solar en electricidad mediante células solares. Hoy en día es una energía renovable alternativa, de rápido crecimiento y cada vez más importante, a la generación convencional de electricidad con combustibles fósiles.

2.1.5 Energía fotovoltaica

Una de las mejores alternativas para generar electricidad, es la energía solar, el beneficiarse de la irradiación energética, nos permite implementar nuevas tecnologías en condiciones donde la

red eléctrica convencional es de difícil acceso. La energía fotovoltaica es la que se obtiene de los haces de luz mediante células fotoeléctricas, que responden a la luminosidad, liberando electrones que están débilmente ligados al semiconductor, ocupando una banda de energía conocida como “banda de valencia”. El flujo de electrones en el circuito exterior se conoce como corriente de la célula y la multiplicación de dicha corriente por el voltaje determina la potencia nominal remitida al inversor [11]. Las células fotovoltaicas se agrupan en celdas y estas forman paneles con la agrupación de varias celdas, dichos paneles producen corriente continua, es decir, que la intensidad de corriente permanece constante a lo largo del tiempo, en condiciones de irradiación similares. Un sistema fotovoltaico consta de cuatro partes para su funcionamiento, un sistema de baterías, inversor, regulador de carga y los paneles solares (Figura 2.2).



Adaptado de: husale2021outletfactory, 2021,
(<https://husale.2021outletfactory.ru/content?c=regulador%20de%20carga%20fotovoltaico&id=2>
2)

Figura 2.2 Sistema Fotovoltaico

En un sistema solar fotovoltaico, el generador fotovoltaico es el encargado de transformar la energía luminosa del sol en eléctrica. La potencia que puede llegar a general una sola célula es de 3W, debido a que este valor es muy bajo para aplicaciones convencionales, se agrupan, conectando en serie o paralelo para general los módulos fotovoltaicos. La potencia que pueda

proveer un módulo dependerá de la cantidad de células que posea [11]. El modelo matemático de la figura 2.3 viene dado por la siguiente ecuación:

$$I = I_{sc} \left[1 - \exp\left(\frac{V - v_{oc} - I R_s}{m V_t}\right) \right] \quad (2.1)$$

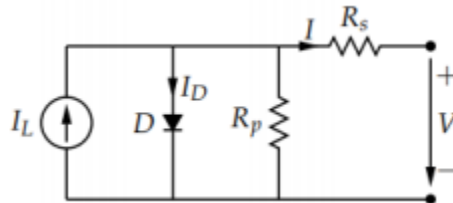


Figura 2.3 Modelo eléctrico de una célula solar

Generalmente estas células se fabrican a partir de silicio cristalino, dichas células suministran 0,5 V y una corriente de (35 mA/cm²) aproximadamente, cuando son iluminadas por el sol en un día despejado a (1000 W/cm²), este último valor es la irradiancia de referencia, ya que cambia con respecto a la posición geográfica del lugar [11].

Un generador fotovoltaico es la agrupación de células o módulos eléctricos y así poder adecuarse a características de operación de una aplicación determinada, dicho generador se compone de $N_p * N_s$, para el cual N_p es la cantidad de columnas y N_s el número de celdas en cada serie, donde la cantidad de columnas define la corriente total del generador, y el número total de módulos por serie establece la tensión del generador, con las siguientes ecuaciones [13].

$$I_g = N_p * I_m \quad (2.2)$$

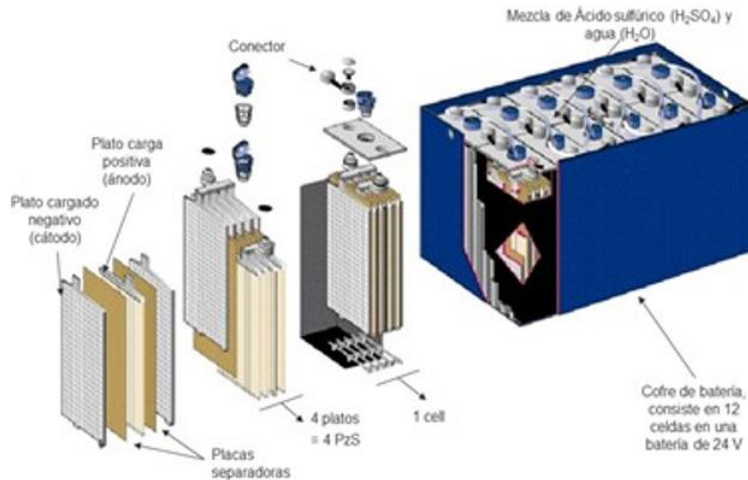
$$V_g = N_s * V_m \quad (2.3)$$

2.1.6 Baterías de corriente directa

La energía generada por el módulo fotovoltaico se almacena en un sistema de baterías, y así la energía que se produce durante las horas de sol puede ser usada, cuando la radiación sea baja o nula. Usualmente están formadas por elementos de 2V, los cuales se conectan en serie y así proporcionar tensiones de trabajo de 12V, 24V y 48V . La capacidad medida en Amperios hora, de dos o más baterías conectadas en paralelo equivale a la suma de cada una de ellas. Existen distintos tipos de baterías, como lo son: alcalinas, ácido plomo, níquel, níquel-hierro, níquel cadmio, níquel-hidruro, litio, iones de litio, polímero de litio, y grafeno, todas tienen características y reacciones químicas específicas [12]. Por lo general en las aplicaciones con generadores

fotovoltaicos se manejan baterías de ácido plomo y níquel-cadmio, debido a su costo y tipo de aplicación, las baterías de ácido plomo son las más utilizadas, por otra parte, las baterías de níquel cadmio, son usadas para aplicaciones más profesionales donde se requiera descargas profundas o mantener periodos largos en baja carga, sin sufrir deterioro [12].

2.1.6.1 Baterías de ácido-plomo

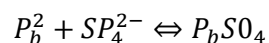
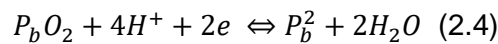


Adaptado de Exide, por Intralogística, 2016, (<http://intralogistica.es/?p=135>)

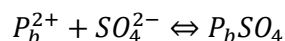
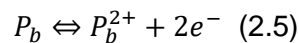
Figura 2.4 Componentes de una batería ácido-plomo

Además, se cuenta con el material activo, que interviene en las reacciones presentes en las baterías y así distribuyen la corriente en las placas. Asimismo, se tiene el electrolito que usualmente es una solución diluida de ácido sulfúrico, el cual trabaja como medio de transporte, para las cargas entre las placas negativa y positiva [13]. Las reacciones químicas en una batería de ácido plomo se representan en las siguientes ecuaciones:

En la placa positiva



En la placa negativa



Reacción global



Una batería de plomo ácido puede ser modelada como una fuente de tensión, V_{BI} en serie con una resistencia R_{BI} (resistencia de base) (ver figura 2.5), estos parámetros están relacionados con la densidad del electrolito y la temperatura, es decir, un aumento en la concentración del ácido provoca un incremento en la tensión y una pérdida en la resistencia. En cambio, si disminuye la densidad, la tensión se reduce y la resistencia se incrementa [13]. Teniendo en cuenta este modelo:

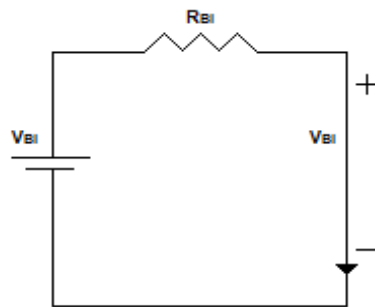


Figura 2.5 Modelo eléctrico de una batería

Se tiene que la tensión de salida en el proceso de carga y descarga en la batería está descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Carga: } V_B = V_{BI} + I_C * R_{BI} \quad (2.7)$$

$$\text{Descarga: } V_B = V_{BI} - I_C * R_{BI} \quad (2.8)$$

El comportamiento de la fuente de tensión equivalente, está relacionado con la densidad del electrolito, en donde, si este es homogéneo se tiene que:

$$V_{BI} = \rho_e + 0.84 \quad (2.9)$$

Para baterías cargadas el valor para ρ_e oscila entre $1,2 \text{ g/cm}^3$ y $1,28 \text{ g/cm}^3$ siendo entonces la tensión $V_{BI} \approx 2,04\text{V}$ y $2,12\text{V}$ [9]. Una variante de las baterías ácido plomo, son las Absorbed Glass Material (AGM) cuya cualidad principal es que su electrolito está en forma cristalina generando capas entre las placas, por eso se le conoce como batería de electrolito inmobilizado.

Se diseñan especialmente para reducir la pérdida de agua en la carga [12]. El régimen de carga o descarga define la intensidad de corriente eléctrica que se emplea en el proceso, se expresa en la capacidad medida en amperios hora, en otras palabras, si la descarga completa de una batería de 20A en 5h, su capacidad sería de 100Ah, el cual indica un régimen I(C5). En las aplicaciones con energía solar se tiene un intervalo de descarga de 10 a 100 horas, I(C10) a I(C100), el voltaje de carga de una batería está relacionado a su vez, con el porcentaje de carga de la misma respectivamente [12].

2.1.8 Regulador de carga

Se encarga de realizar un proceso óptimo de carga de la batería. Este componente protege a la batería de cargas o descargas excesivas que pueden perjudicar la vida útil de las mismas, controlando el nivel de energía que se transmite a través de ellas y el módulo fotovoltaico, y así aprovecha al máximo la energía procedente del generador fotovoltaico, además de garantizar la protección y buena operación de las baterías [12]. Existen diversos tipos de reguladores, algunos pueden hacer el seguimiento del punto de máxima potencia del panel fotovoltaico, optimizando la transferencia energética del generador hacia la batería, además de contar con sistemas de monitorización que registran la operación del regulador [12].

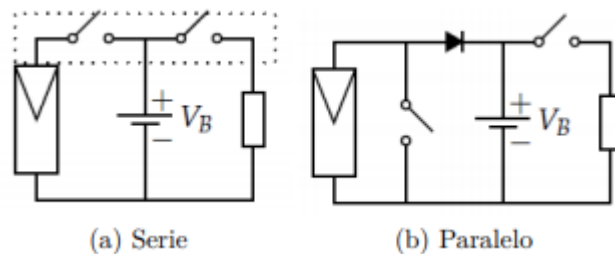


Figura 2.6 Esquema eléctrico de un regulador de carga

Generalmente los reguladores operan por control de la tensión, existen varios métodos de control, sin embargo, los más comunes son el regulador serie (Figura 2.6 a) y paralelo (Figura 2.6 b), el primero coloca en circuito abierto el generador fotovoltaico en el momento en que la batería está cargada, por otro lado, el regulador paralelo reduce la corriente gradualmente en función de la tensión de la batería [12].

2.1.9 Diseño de un sistema solar fotovoltaico

Las ecuaciones que permiten diseñar el SFV, para que el sistema sea autónomo

energéticamente son las siguientes:

Energía total consumida por las cargas:

$$Et = Pt * Horas\ de\ uso \quad (3.1)$$

Factor de corrección o protección por pérdidas (FC): Tiene en cuenta pérdidas por radiación y ubicación del panel solar (1.3 para la ciudad de Popayán).

$$1,1 \leq F.C \leq 1,5 \quad (3.2)$$

Energía con factor de protección (Wh):

$$Ep = Et * 1.3 \quad (3.3)$$

Capacidad del banco de baterías (Ah):

$$Cbat = \frac{Ep}{Vsistema} \quad (3.4)$$

Capacidad del banco de baterías con protección de descarga profunda (Ah): Se deja una reserva mínima del 30% como medida de protección.

$$Cp = \frac{Cbat}{0.7} \quad (3.5)$$

Corriente del SFV:

$$I = \frac{Cp}{Horas\ de\ sol} \quad (3.6)$$

Potencia del SFV:

$$P = I * Vmax \quad (3.7)$$

2.2 ESTADO DEL ARTE

En esta sección se presentarán los principales referentes que se encontraron después de hacer el análisis de la literatura para la sustentación del proyecto.

2.2.1 Contexto internacional

Sistema de riego automatizado para el cultivo de cacao (ecuador 2015) [14].

Esta investigación tuvo como objetivo la automatización de un sistema de riego para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao L*) en la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, se diseñó el circuito principal en DipTrace estableciendo los componentes necesarios para el ensamblaje del mismo; asimismo la creación del código fuente para un microcontrolador en PIC CSS Compiler, el cual se validó mediante el Proteus.

Establecidos los componentes se diseñó el circuito para el sistema de riego, realizado en Diptrace, un software para diseñar esquemas de circuitos integrados, el mismo que permitió diseñar de manera fácil, rápida y factible, debido a su entorno. La funcionalidad del circuito de sistema de riego comenzó cuando se detectó el dispositivo como encendido, una vez encendido, verifica la fecha y hora de riego en memoria para accionar los actuadores y de esta manera se empieza el riego [14].



Figura 2.7 Sistema de control de riego.

Diseño de automatización de sistema de riego de invernadero para el desarrollo de la agricultura familiar en el marco de la seguridad alimentaria (el salvador 2016) [16].

La investigación tuvo como objetivos específicos el estudio bibliográfico de los diferentes tipos de invernaderos, el diseño del sistema de riego automatizado y la implementación en un invernadero propiedad de la ENA. Esta institución facilitó un invernadero tipo Diente de Sierra y brindó la asesoría técnica para determinar las necesidades de automatización, así como para aplicar el sistema de riego a diferentes cultivos, insumos que sirvieron a ITCA-FEPADE para el diseño e implementación del sistema de riego automatizado. Éste permite controlar la frecuencia y la duración del riego, el cual incluye la fertilización. [16].



Figura 2.8 Sistema de control de riego para invernadero.

Diseño e implementación de un sistema de fertirriego por microaspersión con inyector Venturi en cultivo de cacao ubicado en el recinto San Antonio Cantón Urdaneta. (Guayaquil - Ecuador, 2020) [21].

Se implementó el sistema de fertirriego con la construcción y puesta en marcha de un inyector Venturi, a través del diseño agronómico y el diseño hidráulico. Mediante el diseño del sistema de fertirriego se determinaron las necesidades hídricas del cultivo, este es una parte importante en un proyecto de riego ya que si se cometen errores en los cálculos del diseño agronómico repercutirán posteriormente en el diseño hidráulico, este último permite establecer el funcionamiento del sistema por medio de cálculos y el diseño correspondiente para lograr una distribución eficiente del agua en la plantación [21].



Figura 2.9 Sistema de riego por microaspersión.

Diseño e Implementación de Sistema de Riego Automatizado en un Invernadero de la Escuela Nacional de Agricultura, ENA (El Salvador, 2014) [18].

Se implementó un sistema de riego automatizado que puede ser replicado con componentes accesibles en mercado local e implementado por agricultores el cual, según los datos obtenidos, generará una mejor producción y rentabilidad para el cultivo de vegetales de buena calidad [18].



Figura 2.10 Sistema de riego automatizado.

Análisis de un sistema de riego automatizado alimentado por energía fotovoltaica utilizando PLC (Ecuador, 2017) [20].

El propósito de este trabajo de titulación fue demostrar la utilización de la energía solar mediante el uso de paneles fotovoltaicos haciendo uso de la tecnología para mejorar la calidad de vida del agricultor y de sus cultivos. El sistema de riego automatizado funciona captando la energía necesaria para el funcionamiento apropiado de la bomba mediante los paneles fotovoltaicos en el área del proyecto, un PLC en el cual programaremos los niveles de agua mediante el uso de sensores de nivel que estarán localizados en el tanque una electroválvula que dará apertura al sistema de riego del cultivo, este sistema de riego será de lazo cerrado y se usará el programa wincc para monitorear nuestro sistema. [20].

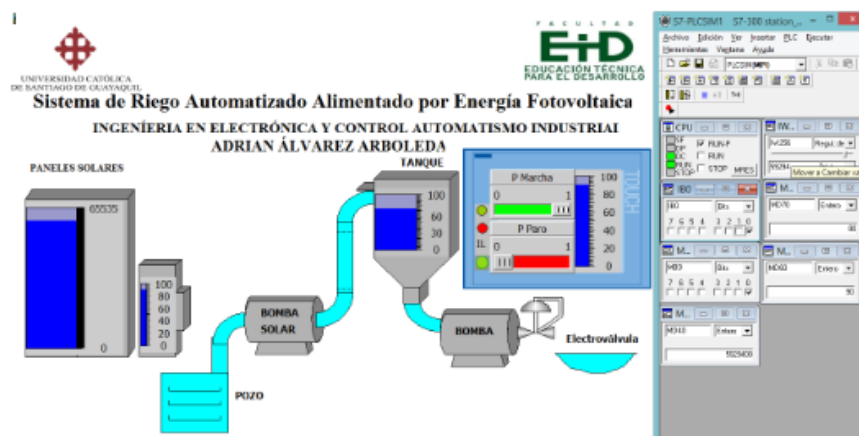


Figura 2.11 Simulación sistema de riego automatizado.

2.2.2 Contexto nacional

Evaluación de tres alternativas de fertirriego en el establecimiento del cultivo de plátano (*musa paradisiaca/harton cv*), (Yopal, Casanare, 2016) [22].

En este trabajo se encontró que la alternativa de fertirriego subterráneo podría ser una solución viable para un manejo eficiente del agua y fertilización en el cultivo de plátano, posiblemente a que esta alternativa dispone de manera local el agua y los nutrientes para la planta se evidenció la respuesta en la etapa de establecimiento de los tres métodos de fertirriego estudiados. El sistema subterráneo de fertirriego permitió corroborar que al colocar el agua y los nutrientes para

este tipo de suelo de textura franca-arcillo-arenosa a la profundidad radicular, es posible generar un estímulo positivo en el desarrollo fisiológico de la planta. [22].

Implementación de un sistema de fertirriego en un cultivo de cítricos (Caldas - Colombia, 2012) [23].

Este trabajo se realizó con la finalidad de implementar nuevas técnicas de fertilización que permitan la reducción de costos en el municipio de Támesis, Antioquia; en donde la aplicación de fertilizantes se hace de forma manual y edáfica. Se logró determinar que el costo total de mano de obra e insumos de las seis aplicaciones realizadas fue más económico que el costo total de la fertilización edáfica para el mismo periodo de tiempo. Además, se pudo identificar que los lotes que poseen fertirrigación mostraron un mayor porcentaje de floración, cuajamiento de frutos y una mejor producción [23].

Diseño e implementación de un sistema automático de fertirrigación para un cultivo de gulupa (Bogotá - Colombia, 2019) [24].

En el proyecto se diseñó un sistema de fertirrigación autónomo, capaz de suplir las demandas actuales del invernadero, implementando una red de distribución semiautomática de fertirrigación sobre el cultivo, generando así; un ahorro de recursos hídricos y fertilizantes, un incremento en el rendimiento del cultivo con mejores características en el fruto. Se logró implementar un aplicativo WEB que integra diferentes tecnologías de automatización, la cual permite ayudar al agricultor promedio y lo hace pieza fundamental en la tecnificación del cultivo, ya que permite al operario tomar decisiones desde la experiencia y los datos adquiridos por el sistema de gestión [24].

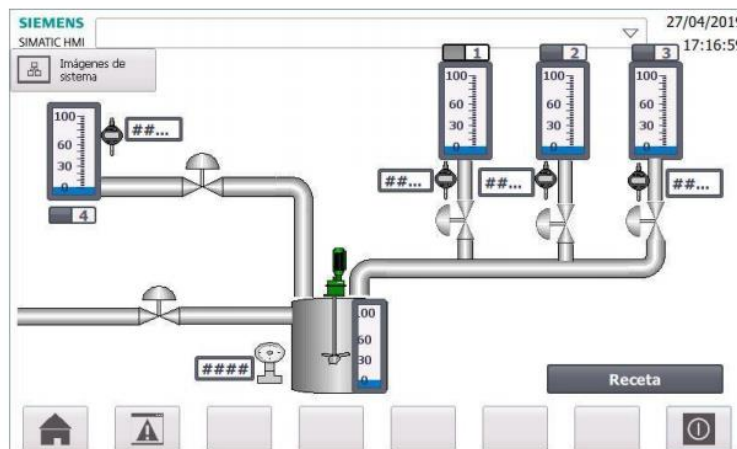


Figura 2.12 Diseño sistema automático de fertirrigación.

Sistema automatizado de riego, fertilización y fumigado para cultivo de habichuela bajo invernadero, monitoreado mediante aplicación móvil (Pitalito - Huila, 2018) [15]

Dentro del diseño y desarrollo de este proyecto aplicado, se elaboró un sistema totalmente automatizado en los aspectos de riego, fertilización y fumigado para un cultivo de habichuelas, donde se utilizó sistemas de medición de temperatura y humedad relativa para garantizar que el cultivo se encuentre siempre en óptimas condiciones. Se implementó un sistema capaz de realizar las tareas de fertilización y fumigado en el cultivo, reduciendo tiempo y esfuerzo del agricultor y aumentando la eficiencia y calidad del cultivo, adicionalmente este sistema fue monitoreado remotamente haciendo uso de una aplicación móvil [15].

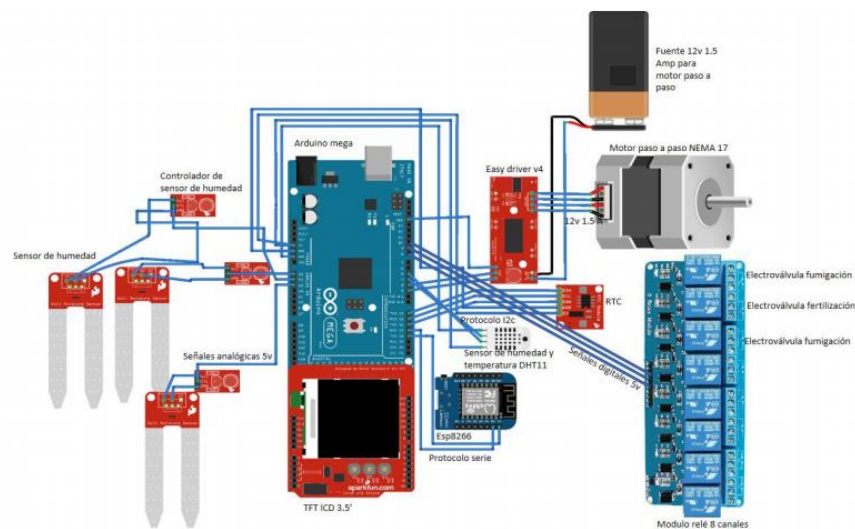


Figura 2.13 Esquema del sistema de control automatizado de riego.

2.2.3 Contexto regional

Efecto de la aplicación de tres láminas de fertirriego, sobre la producción del cultivo de maní en un suelo (Pasto - Colombia, 2017) [25].

El sistema es capaz de manejar hasta cinco cultivos independientes, cada uno con sus parámetros de funcionamiento, que brinda la posibilidad de cuidar distintos productos al tiempo o un mismo producto en diferentes etapas de su vida productiva. Además, el sistema utiliza un modo alternativo de fertilización con una tecnología bastante económica con relación a algunas que se venían utilizando en los procesos productivos, (inyectores), que además de ser fácil de manejar y ajustar por el usuario, cumple con la tarea que debe llevar a cabo el cual es permitir el

ajuste de parámetros como la conductividad eléctrica y el pH de la solución nutriente que se va a suministrar al cultivo [25].

Diseño e implementación de un sistema de riego por goteo basado en control distribuido (Pasto - Colombia, 2015) [26].

El sistema diseñado e implementado evidenció cumplir con los requerimientos necesarios para monitorear en tiempo real las variables ambientales y para un riego controlado a partir de la humedad del suelo del invernadero. Además, al transmitir estos datos mediante IoT hacia un servidor en la nube se tiene la posibilidad de visualización de los datos desde cualquier dispositivo móvil o computador que cuente con acceso a internet, al contar con esta información se puede detectar el estado del cultivo y monitorear el correcto funcionamiento del sistema de riego para la toma de decisiones de mantenimientos correctivos o preventivos [26].

Control automatizado de un sistema de riego y fertirriego (Pasto - Colombia, 2015) [17].

En el presente proyecto se desarrolló un prototipo de herramienta de laboratorio que permite automatizar la dosificación controlada de agua y nutrientes hacia un cultivo de fresas ubicado en un invernadero de la finca LOPE, a fin de brindar una alternativa al método actualmente instalado, que presente un manejo sencillo y de la posibilidad de realizar pruebas para futuros estudios de forma controlada, el hardware del prototipo se basa en una arquitectura de desarrollo programada en microcontrolador PIC, que posee los periféricos necesarios para la implementación de dicho sistema como son: los conversores ADC, salidas y entradas digitales, temporizadores, comunicación serial USART, entre otros. En cuanto al software, la interfaz de usuario se desarrolló en entorno de programación gráfica en LabVIEW, que posee una gran cantidad de librerías y funciones que facilitan el desarrollo de este tipo de sistemas [17].

Diseño e implementación de un sistema piloto para el control de humedad y sondeo de pH del suelo mediante energía solar fotovoltaica, para el cultivo de quinua en el departamento del Cauca (Popayán - Cauca, 2017) [27].

El presente proyecto de grado consiste en el desarrollo de un sistema piloto auto sustentable el cual permite monitoreo de pH y control de humedad, a través de la implementación de diversos dispositivos (microcontrolador, sensores y actuadores) junto al sistema solar fotovoltaico, para brindar al usuario las mediciones de las variables físicas (pH y control humedad del suelo) en todo el proceso de desarrollo. Se logró la implementación de un sistema piloto autónomo y optimizado eléctricamente mediante energía solar fotovoltaica para el control de la humedad y la

supervisión del pH del suelo para cultivos de quinua en el departamento del Cauca, como herramienta de apropiación de tecnologías renovables en zonas rurales [27].

2.3 ANÁLISIS DE LITERATURA

En este apartado se muestra una matriz comparativa entre algunos proyectos ya existentes junto a nuestro proyecto, con el fin de comparar las distintas características de cada uno de los proyectos que se mencionan.

Matriz comparativa

| Características | [14] | [15] | [16] | [17] | [18] | [19] | [20] |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Sistema solar fotovoltaico | X | X | X | X | X | X | ✓ |
| Interfaz de usuario | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ |
| Control remoto | X | ✓ | X | X | X | ✓ | X |
| Almacenamiento de datos | X | ✓ | X | X | X | ✓ | X |
| Control manual | X | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| Variedad de cultivo | X | X | ✓ | X | ✓ | ✓ | X |

Después de analizar el marco referencial se evidencia la importancia de un proyecto como el presente tanto a nivel nacional como internacional donde un gran número de personas no tienen acceso a la red eléctrica. Por ejemplo, la mayoría de referencias solo se enfocan en el monitoreo y control del cultivo y permite una visualización a través de HMI, pero no en el uso de energías no convencionales.

Los proyectos [15], [17], [18] son proyectos nacionales que, si bien cuentan con una interfaz de usuario básica, permite monitorear las variables del cultivo en tiempo real pero no usan energías

no convencionales ni monitorean consumo o generación eléctrica. El proyecto [14] cuenta únicamente con una interfaz gráfica lo que comparado con nuestro proyecto lo hace el competidor más primitivo en cuanto a características se refiere, el proyecto [10] implementó varias opciones como su interfaz, el control manual y el control remoto, pero no se interesó en las zonas rurales no interconectadas y tampoco en el tratamiento de datos posterior. El proyecto [16] se basa en el diseño y desarrollo convencional de fertirriego cultivo pequeño, por lo cual no se implementan muchas de las tecnologías usadas en este proyecto como lo es, el desarrollo de una interfaz más intuitiva y que muestra mayor información para aquel personal preparado que lo necesite. Con respecto a la variedad del cultivo notamos que los proyectos [18] y [19] tienen la opción de aplicarse a varios cultivos que ya están preestablecidos sin embargo nuestro proyecto se podrá adecuar al cultivo que se deseé por lo que le da una ventaja ante esos proyectos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se especifica la ingeniería conceptual y detallada para la construcción del sistema de fertirrigación, el sistema fotovoltaico y la interfaz gráfica, se concebirá una arquitectura y una lógica de funcionamiento que permita entender la interacción de los diferentes dispositivos electrónicos necesarios para el correcto funcionamiento del mismo.

3.1 Construcción del prototipo de fertirriego

Antes de empezar el diseño y construcción del sistema de fertirriego, es necesario conocer los requerimientos que cada cultivo posee. Estos datos fueron obtenidos a partir del análisis de literatura sobre aspectos agrarios, con esto se logró obtener información acerca de la humedad óptima y los elementos primarios de nutrición (nitrógeno, fosforo, potasios disueltos en agua) necesarios para cada cultivo según el tiempo de sembrado.

Una vez conocida las necesidades de los cultivos ya mencionados, se realiza la selección adecuada de los sensores para la implementación del sistema. Los sensores deben tener el rango y la resolución adecuada para poder monitorear o controlar las variables del sistema diseñado, además de representar un balance entre costo y utilidad.

El prototipo del sistema de fertirrigación desarrollado consiste en la interacción de dos subsistemas (Figura 3.1).

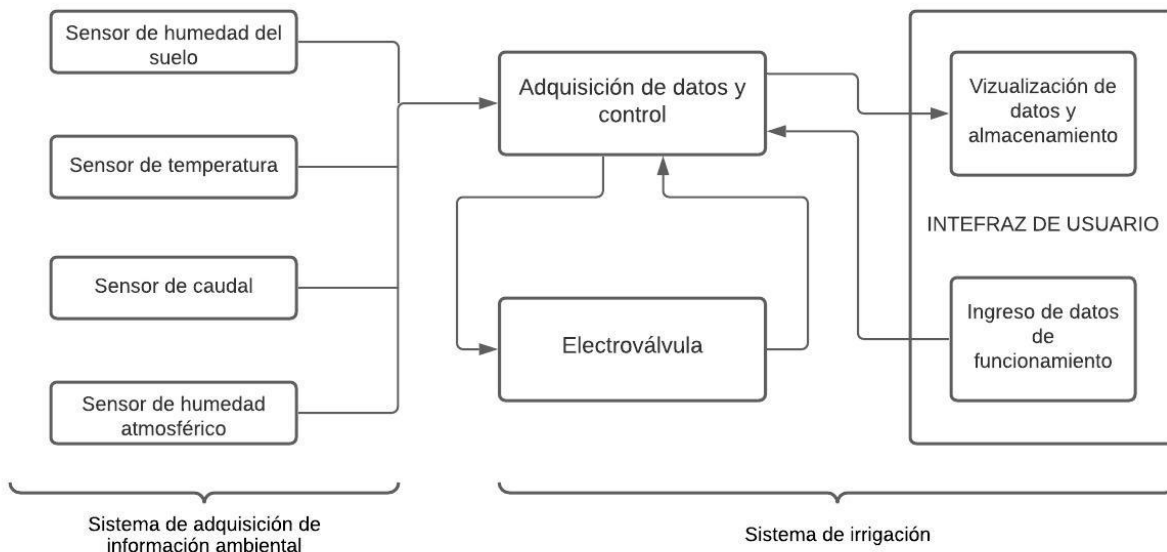


Figura 3.1 Diseño del sistema de Fertirriego

3.1.1 Sistema de adquisición de información ambiental

El subsistema está desarrollado con la intención de proveer al controlador principal (ARDUINO) información sobre los parámetros ambientales del cultivo mediante un set de sensores que registran la temperatura del ambiente y el caudal del agua, así como información de la humedad del suelo donde se encuentra el cultivo. Este set de sensores está distribuido a lo largo de las eras que hay en el cultivo con el fin de caracterizar las condiciones de humedad del suelo objeto de estudio y las condiciones ambientales (humedad relativa y temperatura ambiente) de la zona.

3.1.2 Sistema de irrigación

Para la irrigación es necesario contar con un abastecimiento de agua constante, es de suma importancia poseer dispositivos que permitan contener el líquido y los fertilizantes (elementos mayores) que serán aplicados al cultivo, también debe poseer elementos que permitan limitar o activar el flujo de este líquido a través de las mangueras de irrigación por goteo. Este sistema está compuesto por los siguientes elementos: electroválvulas, cinta de riego y goteros. Este sistema es el encargado de permitir el flujo del fertilizante y el agua, todo esto mediante el controlador (ARDUINO) que es alimentado con la información que provee el sistema de adquisición de información de suelo y ambiental, y que, de acuerdo a esta información actúa según los parámetros definidos por el usuario mediante la interfaz HMI desarrollada.

Además el alcance de este proyecto es el desarrollo de un sistema automatizado de fertirriego preconfigurado a los cultivos de referencia, en los cuales se establecen condiciones de humedad a mantener para cada plantación y por medio de la interfaz desarrollada, el usuario ingresa el horario para el suministro de nutrientes, adicionalmente el usuario de acuerdo a las condiciones del lugar y necesidades de cada cultivo puede configurar condiciones especiales para así lograr adaptabilidad del sistema desarrollado.

3.1.3 Sistema de control

Para el diseño del sistema de control se seleccionó el controlador ON/OFF debido a que entre sus ventajas esta la fácil implementación y bajo costo. En el control de riego se comprueba que la humedad del suelo este dentro de los limites preestablecidos para cada cultivo de referencia y teniendo en cuenta que el exceso de humedad puede provocar problemas en las plantaciones, se ajustó el sistema, mediante una función de corrección que ajusta el rango para evitar excesos de humedad.

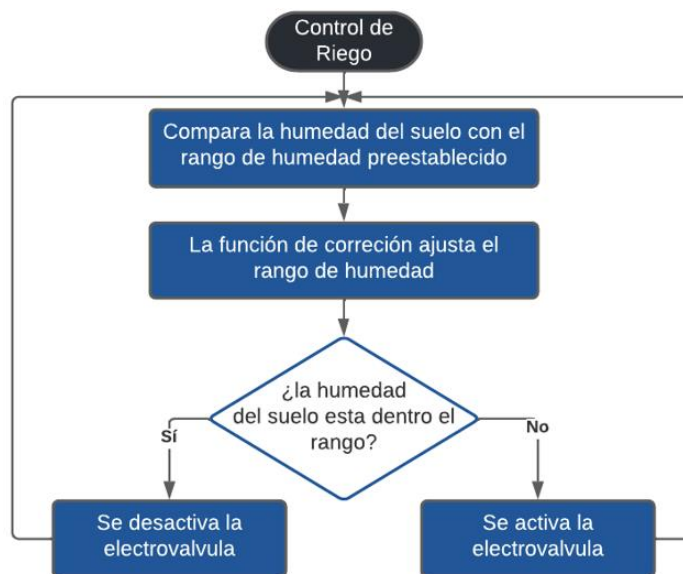


Figura 3.2 Diagrama control de riego.

El suministro de nutrientes funciona mediante un sistema de lazo abierto donde el agrónomo especifica los horarios para el abastecimiento, establecidos a través de un análisis de suelos previo. Dado el caso que la humedad del suelo se encuentre por fuera del rango deseado, el sistema realizara el suministro de nutrientes, debido a que se le dio prioridad ya que el suministro de nutrientes no es tan continuo como el riego, por lo que se espera que el cultivo no sea afectado por sobre humedecimiento.

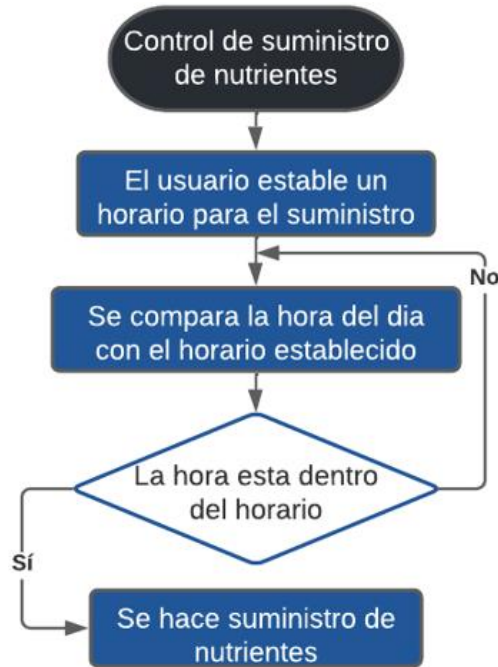


Figura 3.3 Diagrama control de nutrientes.

3.1.3 Selección y características de los materiales

- Módulo sensor de flujo:** Como es necesario la medición de caudal, se optó por este sensor, que es el adecuado para este proyecto debido a que cuenta con un medidor magnético que no produce una caída de presión, lo que lo hace apropiado para medir flujo por gravedad, además que puede comunicarse con una tarjeta de Arduino.



Figura 3.4 Módulo sensor de flujo

Características técnicas:

- Voltaje Op: 4.55-5 voltios.
- Rango Entrada: 1-30 L/min.
- Rango Salida: número de pulsos proporcional al caudal.
- Consumo: 75 mW.

Calibración del sensor de caudal:

Para obtener datos confiables del sensor de caudal se elaboró la calibración respectiva de manera indirecta, mediante una medida de volumen de 3 L de agua con una cubeta calibrada, registrando el dato que el caudalímetro detectaba sin calibración (tabla 4.2). Se tomo una muestra relativamente significativa de 20 datos, debido a que no se tiene datos estadísticos del sensor.

Tabla 3.1 Calibración del sensor de caudal

| Volumen sin calibración (L) | Volumen con calibración (L) |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 2,40 | 2,83 |
| 2,40 | 2,90 |
| 2,50 | 3,10 |
| 2,60 | 3,00 |
| 2,50 | 3,10 |
| 2,60 | 2,90 |
| 2,45 | 3,10 |
| 2,30 | 2,90 |
| 2,40 | 2,80 |
| 2,60 | 3,00 |
| 2,60 | 2,90 |
| 2,50 | 2,85 |
| 2,50 | 2,90 |
| 2,40 | 2,93 |
| 2,30 | 3,00 |
| 2,60 | 3,00 |
| 2,40 | 2,93 |
| 2,40 | 3,10 |
| 2,40 | 2,90 |
| 2,50 | 3,00 |

Inicialmente el sensor de caudal marcaba valores inferiores, por lo que se ajustó el programa en Arduino a partir de la información del proceso de calibración, el cual usa un factor de conversión para convertir frecuencia en caudal (algoritmo 1), modificando esta constante a 6,1 se logró obtener datos más precisos indicados en la tabla 4.2, con una desviación estándar de 0,093 y un error relativo medio de tan solo 0,014 mientras que inicialmente el error era de 0,177.

Algoritmo 1 Código modificador de frecuencia en caudal

```
//SENSOR DE CAUDAL

float frecuencia = obtener_frecuencia(); //obtenemos la frecuencia de los pulsos en Hz
float caudal_L_m = frecuencia/factor_conversion; //calculamos el caudal en L/m
dt = millis()-t0; //calculamos la variación de tiempo
t0 = millis();
volumen=volumen+(caudal_L_m/60)*(dt/1000); // volumen(L)=caudal(L/s)*tiempo(s)
```

- **Transductor humedad YL-69.** Tiene la capacidad de medir la humedad del suelo, aplicando una pequeña tensión entre los terminales del módulo YL-69, hace pasar una corriente que depende básicamente de la resistencia que se genera en el suelo y ésta depende mucho de la humedad, por lo tanto, al aumentar la humedad la corriente crece y al bajar la corriente disminuye. Adicionalmente, este sensor trabaja en un rango de 0% a 100% de humedad haciéndolo adecuado para realizar la medida. Cabe destacar que por restricción de movilidad de pandemia fue el único sensor al que se tuvo acceso.

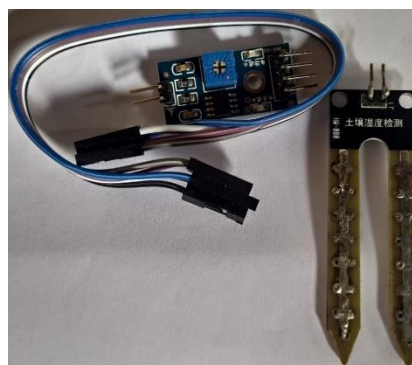


Figura 3.5 Transductor de humedad YL-69

Características técnicas:

- Voltaje Op: 3.3 - 5 Voltios
- Corriente: 35mA
- Voltaje Salida: 0 - 4.2 Voltios
- Digital de salida binaria 0/1 On/Off ajustable por potenciómetro
- Rango de humedad de 0 – 100 %.

Calibración del sensor de humedad:

De pruebas anteriores y en el laboratorio de energías renovables donde se trabajó con sensores del tipo yl-69 se realizaron varias tendencias a la distribución de puntos y se encontró que el comportamiento con tendencia lineal es el más aproximado. En la gráfica se observa que el voltaje de salida tiene una relación respecto a la humedad presente en la muestra, en donde a la humedad es inversamente proporcional al voltaje y teniendo en cuenta que las características técnicas del sensor son lineales, se utilizan los datos y función de transferencia establecidos por fabricante.

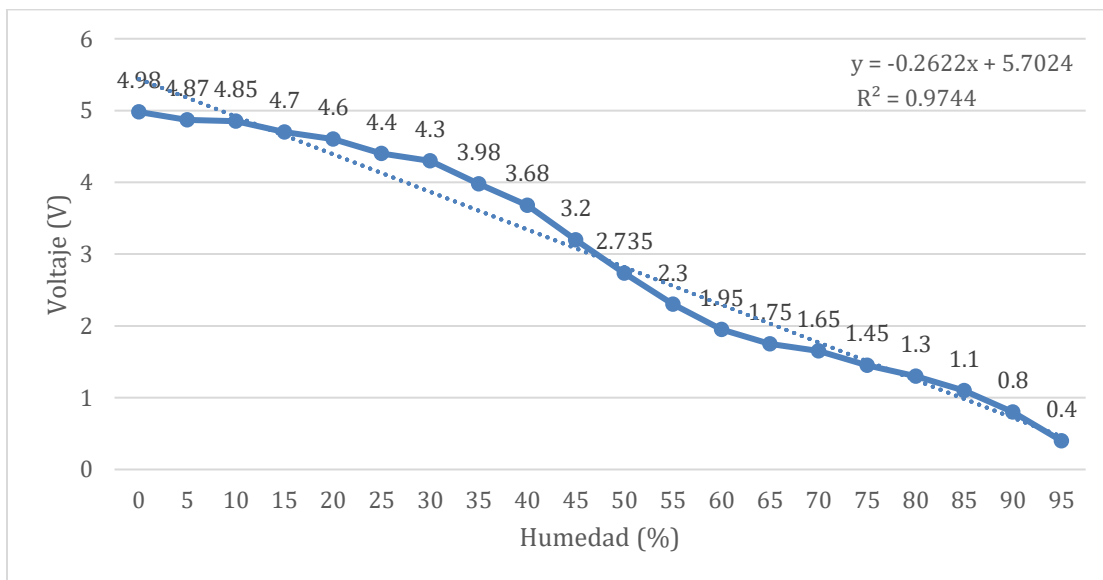


Figura 3.6 Calibración del sensor de humedad

- **Sensor de temperatura DS18B20:** Debido a que se necesitaba un dispositivo que sea capaz de estar a la intemperie y proporcione datos confiables, se seleccionó este sensor ya que su presentación es en forma de una sonda impermeable, y además es un sensor

digital que permite que la señal leída no sea degradada. Su rango de funcionamiento le permite medir temperatura ambiente.



Figura 3.7 Sensor de temperatura DS18B20

Características técnicas:

- Voltaje Operación: 3 - 5 voltios
- Rango Temperatura: -50° - 125°C
- Resolución: 9 - 12 bits
- **Tarjeta de relés opto acoplada:** Los relés opto acoplados permiten controlar el flujo de corriente que circula a través de ellos, con un LOW permiten el paso de corriente y con un HIGH lo impide o envían a otro circuito, lo cual lo hace propicio para el control de las electroválvulas.



Figura 3.8 Tarjeta de relés acoplada

Características técnicas:

- Voltaje Op: 220 AC/5DC voltios
 - Corriente de Op máxima: 10A
 - Señal de control: 3.3 - 5 Voltios
 - Tiempo de acción: 10ms/5ms
- **Cinta de riego:** Esta fue seleccionada debido a que el tipo de riego que se implementó es por goteo; este método suministra el agua al suelo desde una fuente puntual, se introduce en el terreno y se desplaza en sentido vertical y horizontal, esta cinta utiliza caudales pequeños a baja presión, genera menos pérdida de agua y mantiene un nivel de humedad constante en el suelo.



Figura 3.9 Cinta de riego

Características técnicas:

- Caudal: 0.9 Lph – 1.2 Lph.
 - Calibre 5 mm.
 - Presión de trabajo 12 PSI.
 - Distancia entre gotero 5 cm.
- **Electroválvula:** Se seleccionó la electroválvula DCF-HS15W partiendo del requerimiento de permitir el paso de agua a los goteros con una velocidad menor a 0.15 segundos y que sea fácil de adaptar al sistema.



Figura 3.10 Electroválvula

Características técnicas:

- Voltaje Op: 12 Voltios
 - Flujo aceptado: 1.5 - 20 L/min
 - Consumo: 5W
-
- **Arduino Mega 2560:** Esta placa electrónica cuenta con múltiples entradas analógicas, sumado al bajo precio del mercado y a la versatilidad que ofrece para realizar montajes electrónicos de control y registro de variables físicas, se optó por la tarjeta de Arduino Mega 2560.



Figura 3.11 Placa de Arduino Mega

Características técnicas:

- Voltaje de Op: 5 voltios
- Corriente por PIN: 40 mA
- Pines digitales in/out: 54(PVM) y 16 analógicos

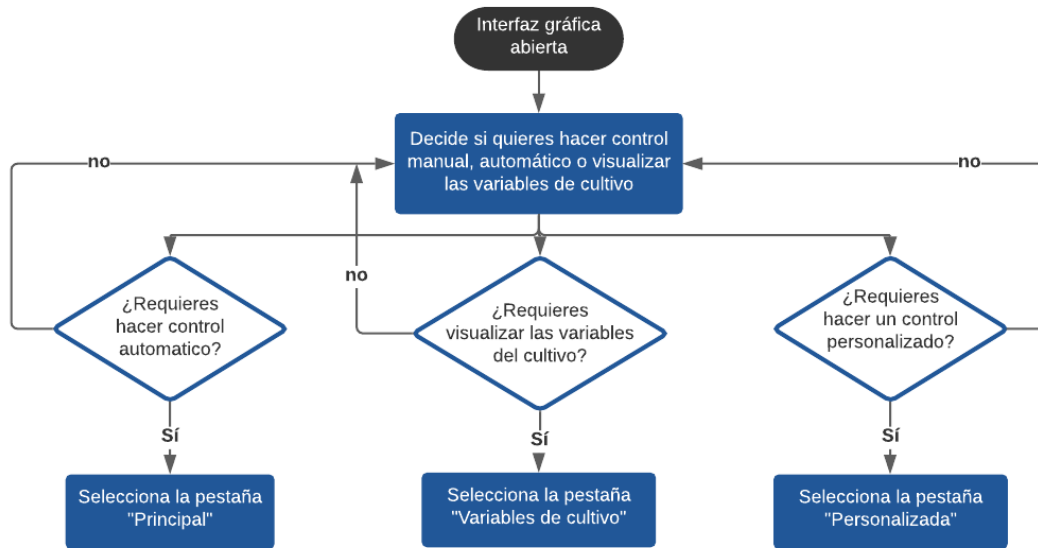
3.2 CREACIÓN DE LA INTERFAZ

Para informar al usuario el estado general del sistema se implementó una interfaz de usuario.

La interfaz se desarrolló en el entorno de LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), el cual es un lenguaje de programación gráfica en el que se puede crear aplicaciones de una forma rápida y sencilla, que al momento de realizar un proyecto se presentan dos ventanas las cuales son “Panel frontal” y “Diagrama de bloques” que están conectadas entre sí, la primera ventana muestra los elementos que se observa el usuario, como botones, caja de texto, checkbox, etc., y en la segunda ventana se hace la programación y la función que cumple cada elemento del panel frontal. El proyecto se guarda con una extensión “.VI” (*Virtual instruments*) para el programa principal y dado el caso que este contenga subprogramas tiene una extensión “. subVI” (*Subvirtual Instruments*).

La interfaz está compuesta de tres ventanas llamadas, Principal, Personalizada y Variables del cultivo, donde el usuario puede escoger una pestaña acorde a sus necesidades (Figura 3.11).

Figura 3.12 Diagrama de flujo de la interfaz



La pestaña personalizada tiene la siguiente funcionalidad (figura 3.12)

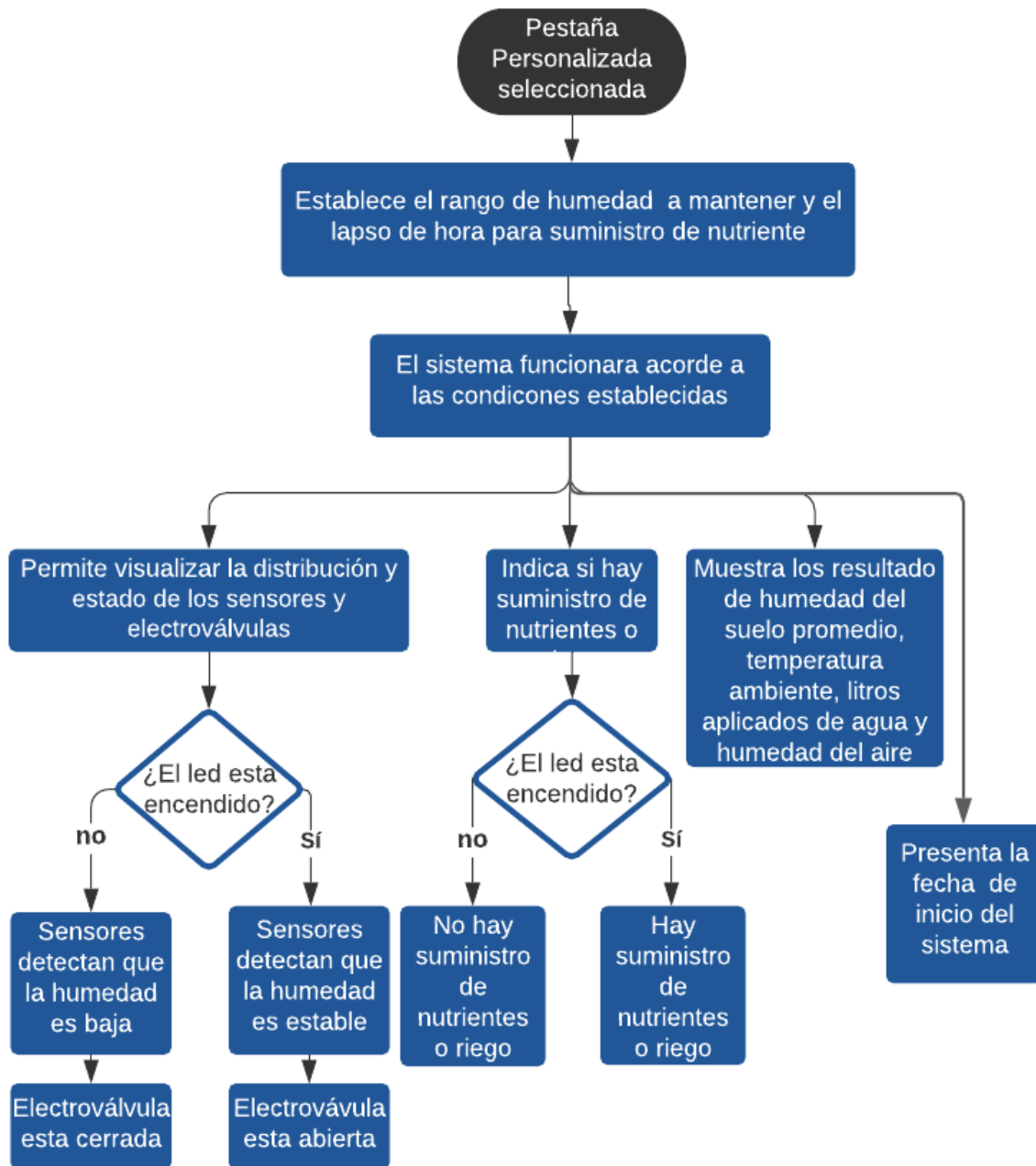


Figura 3.13 Diagrama de flujo de la pestaña principal de la interfaz

La ventana principal seguirá el siguiente esquema:

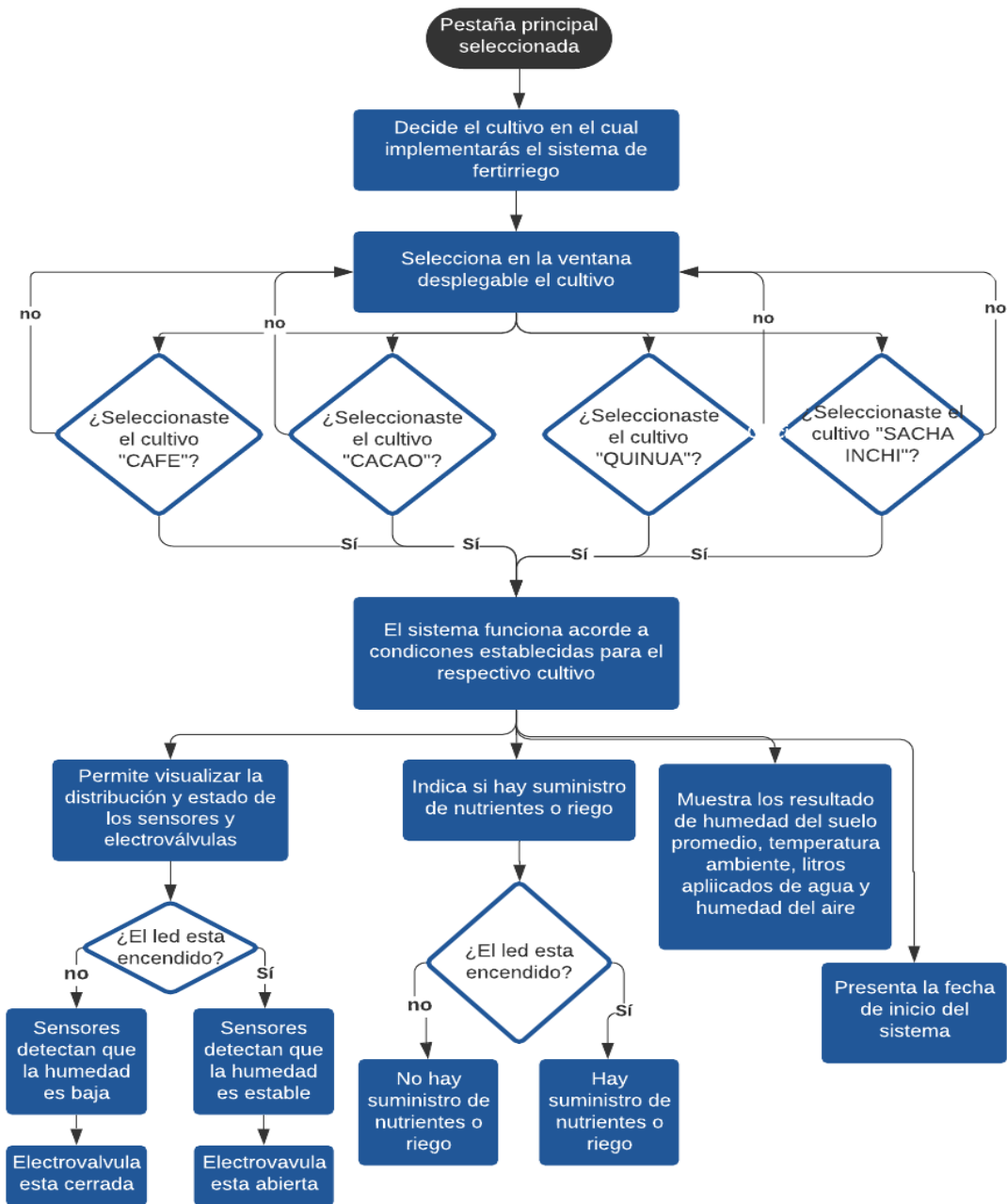


Figura 3.14 Diagrama de flujo de la pestaña principal

En el siguiente diagrama se muestra el proceso mediante el cual la pestaña de variables de cultivo está diseñada.

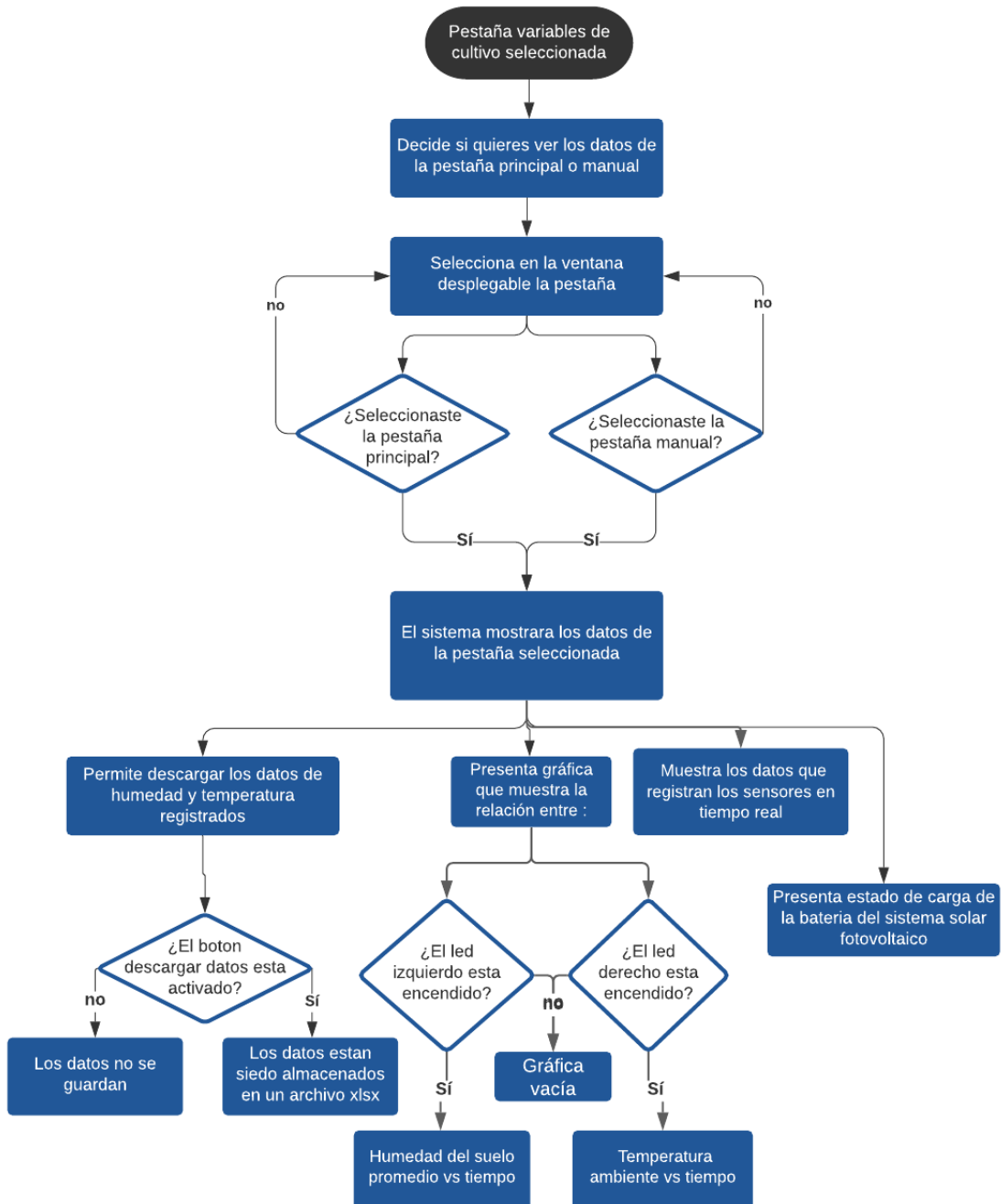


Figura 3.15 Diagrama de flujo de la pestaña variables del cultivo

3.3 DISEÑO DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO AISLADO

Mediante una primera caracterización energética del sistema se desarrolló un primer montaje del sistema solar (tabla 4.9), que fue usado para la ejecución de pruebas de campo, optimización de sistema de adquisición de datos, sistema solar fotovoltaico y desarrollo de interfaz usuario en las fases restantes del proyecto.

Con los datos mostrados en el capítulo sobre el diseño de este sistema, se procede a calcular la corriente pico del sistema considerando las horas mínimas de radiación solar, con esto se calcula la corriente pico del sistema. Una vez obtenida la corriente del panel se procede a realizar el cálculo de potencia del arreglo fotovoltaico con un valor nominal de un panel silicio policristalino de 18 V.

Con base al dimensionamiento del sistema, se procede a la selección de los elementos constitutivos del sistema solar fotovoltaico de acuerdo a las condiciones energéticas del sistema.

3.3.1 Elementos constitutivos del sistema solar fotovoltaico

- **Panel solar:** Un panel solar, placa solar o módulo solar es un dispositivo que capta la energía de la radiación solar para su aprovechamiento.



Figura 3.16 Panel solar

- **Regulador:** El regulador tipo MPPT hace un seguimiento digital de la salida de los paneles y la compara con el voltaje de las baterías. Además, su microprocesador calcula cuál es la potencia óptima que el regulador puede enviar a las baterías en cada estado de carga.



Figura 3.17 Regulador MPPT 75

| Características técnicas | |
|----------------------------|---|
| Tensión de la batería | Selección auto. 12/24 V |
| Corriente de carga nominal | 15 A |
| Potencia máxima, 12 V | 200 W |
| Protección | Polaridad inversa de la batería (fusible) Corto circuito de salida |
| Potencia máxima, 24 V. | 400 W |
| Tensión máxima C.A. | 75 V |

- **Acumuladores:** un acumulador eléctrico es un dispositivo que acumula energía o electricidad para hacer funcionar el aparato o dispositivo en el que estén insertados o del que formen parte.



Figura 3.18 Acumulador MT12180HRG

| | |
|-----------------------------------|---|
| Voltaje Nominal | 12 V |
| Capacidad | 20 A/h, 20°C |
| Dimensión | 181 mm, 77 mm, 167 mm, 167 mm |
| Peso aproximado | 5.60 kilogramos |
| Resistencia interna | Aprox. 12 mΩ |
| Rango de autodescarga | Aprox. 3% por mes |
| Rango de temperatura de operación | <ul style="list-style-type: none"> - Descarga: -20 a 60 °C - Carga: 0 a 65 °C - Almacenamiento: -20 a 60°C |
| Voltaje de carga flotante | 13.60 a 13.80 V (-15 mV/°C) |
| Tensión de carga cíclica | 14.50 a 14.90 V (-20 mV/°C) |
| Corriente máxima de carga | 6 amperios |

- **Módulo Sensor de Voltaje FZ0430:** este módulo se basa en el principio de presión de los puntos de resistencia, es compatible con Microcontroladores PIC, plataformas de desarrollo Arduino, Raspberry PI, entre otros.



Figura 3.19 sensor FZ0430

Características técnicas:

- Rango de entrada de voltaje: 0v a 25v DC.
- Voltaje detección entrada máximo: 25v ($5v \times 5 = 25v$) o 16,5v ($3,3v \times 5 = 16,5v$).
- Rango de detección de voltaje: 24,41mV – 25v.
- Resolución analógica de tensión: 0,00489v DC.
- Voltaje detección entrada mínimo: 24,45mV ($4,89mV \times 5 = 24,45mV$)

● **Cableado eléctrico**



Figura 3.20 Cableado eléctrico THHN #14 AW

| Características técnicas | |
|--------------------------|---------------------------|
| Voltaje de servicio | 600 V |
| Temperatura de trabajo | 90 °C |
| Corriente máxima | 25 A |
| Material | Cobre de temple suave 99% |

3.3.2 Diseño de pruebas

Con los primeros datos de potencial de generación en punto de aplicación y de consumo inicial de energía en el sistema, se diseñó un sistema fotovoltaico de acuerdo a las condiciones establecidas, tanto en requerimientos de potencia, como en tiempos de trabajo de la planta; este sistema fotovoltaico ajustado una vez comprobado su funcionamiento energético, se utilizó para el desarrollo de pruebas de campo, optimización de sistema de adquisición de datos y desarrollo de interfaz usuario en las fases restantes del proyecto

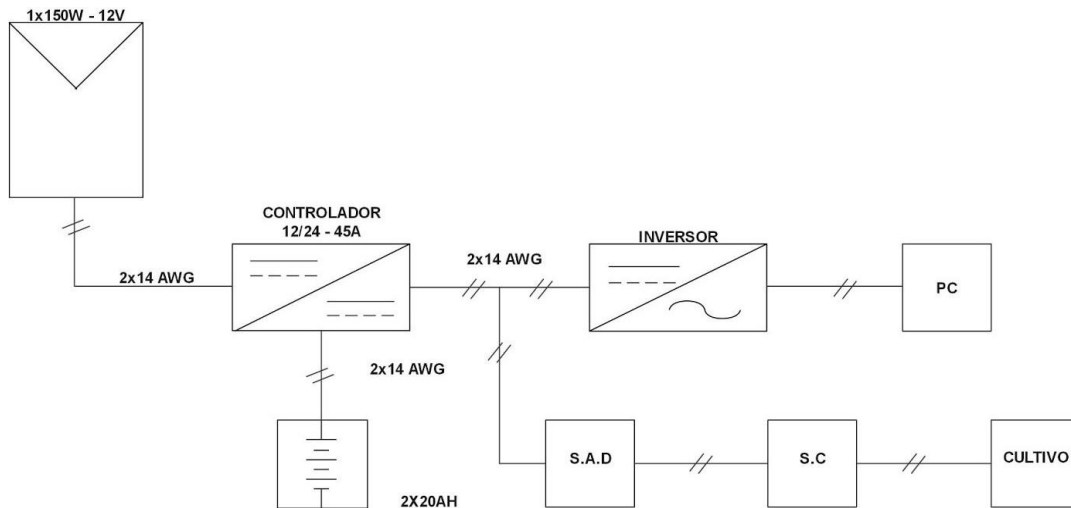


Figura 3.21 Diseño del sistema Fotovoltaico

3.3.3 Cálculo del estado de carga del banco de baterías

El porcentaje de carga de la batería se calcula teniendo en cuenta que ninguna batería debe descargarse por debajo del 30%, por lo que se debe determinar su voltaje de descarga profunda y su voltaje de carga plena que equivale al 100% de su capacidad, con estos dos valores se hace una proyección donde:

Voltaje de descarga profunda → 30%

Voltaje de carga plena → 100%

Usando el módulo de voltaje FZ0430 se mide el voltaje de salida en el banco de baterías y como para el proyecto se necesita un banco de baterías con un voltaje de salida de 12 voltios, se usó baterías con tecnología AGM, las cuales realmente están compuestas por 6 baterías de 2 celdas con un voltaje de descarga profunda de 1.75 V aproximadamente cada una, por lo que su voltaje

total será 10,5 V y en carga plena tienen un valor de 14.4 V que es el valor intermedio entre 14.1 y 14.7 V, voltajes en esa tecnología, por lo tanto se tiene la siguiente ecuación que relaciona el porcentaje de carga con el voltaje de salida:

$$Y = \frac{100}{13}x - \frac{140}{13} \quad (3.8)$$

Y: Porcentaje de carga.

X: Voltaje del banco de baterías

3.4 PROTOCOLOS DE EVALUACIÓN

Para la implementación del sistema se llevó a cabo un conjunto de pruebas que permitió la optimización tanto del sistema de fertirriego como del sistema solar fotovoltaico. En la siguiente figura se muestra el prototipo inicial desarrollado.



Figura 3.22 Prototipo inicial de fertirriego

3.4.1 Pruebas del sistema de fertirriego

En todas las pruebas del sistema de riego se usó suelo seco dispuesto en macetas con un volumen de 3 cm³. Debido a las implicaciones que trajo la pandemia del Covid-19, el trabajo y las pruebas se desarrollaron en el patio de una vivienda.

En primer lugar, se realizó una prueba de control, buscando que el sistema active las electroválvulas en dos posibles casos:

- Cuando la humedad del suelo presenta un flanco ascendente, es decir, que el valor de humedad esté aumentando. El programa activará la electroválvula si el nivel registrado de humedad se encuentra por debajo del valor establecido y las desactiva una vez alcanzado el valor de humedad establecido.
- Cuando la humedad del suelo presenta un flanco descendente, es decir, parte de un valor de humedad por encima del rango definido y por la sequía del suelo su humedad disminuye, la electroválvula estará desactivada si el nivel de humedad se encuentra por encima del valor menor establecido, una vez sobrepase este valor la electroválvula se activará.

las pruebas realizadas fueron las siguientes:

Prueba 1: funcionamiento de electroválvulas

Se establecieron tres humedades iniciales con valores diferentes: 25%, 4% y 44% en la era uno, dos y tres respectivamente, con sensores ubicados a 10 cm del gotero y buscando mantener la humedad en un rango de 30% a 40%.

Prueba 2: Sistema cuando la humedad desciende

La prueba se realizó solo en una era, estableciendo una humedad inicial del suelo de 70% y buscando mantenerla en un rango de 50% a 60%. El sistema funcionó en un día soleado, además se hizo uso de un secador para así poder lograr que la humedad descendiera más rápido.

Prueba 3: Pruebas con humedades iniciales diferentes

Se realizaron cuatro pruebas sobre una era, estableciendo cuatro humedades iniciales diferentes de 21%, 32%, 45% y 50 % en cada ensayo y se buscó llevar la humedad a un valor de 70% en todos los casos. Posterior a ello se operó el sistema sobre tres eras simultáneamente con humedades iniciales de 7%, 38% y 50% buscando nuevamente una humedad final de 70%

Prueba 4: Prueba con humedades finales diferentes

Sobre una era se realizó 3 pruebas fijando humedades iniciales diferentes, todas con un valor pequeño, además, el valor de humedad final al cual debería llegar el sistema también fue diferente para cada prueba (tabla 3.1).

Tabla 3.1 Prueba con humedades finales diferentes

| Prueba | Humedad inicial del sistema (%) | Humedad final del sistema (%) |
|--------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 9 | 40 |
| 2 | 11 | 50 |
| 3 | 15 | 60 |

Prueba 5: Pruebas con función de corrección

Se estableció una humedad inicial diferente en cada era (tabla 3.2) y nuevamente se buscó llevar la humedad a un valor de 70%, pero esta vez haciendo uso de una función de corrección creada gracias a las pruebas anteriores.

Tabla 3.2 Pruebas con función de corrección

| Era | Humedad inicial (%) |
|-----|---------------------|
| 1 | 7 |
| 2 | 33 |
| 3 | 48 |

Prueba 6: Pruebas con función de corrección

Sobre tres eras se establecieron humedades iniciales con valores que los cultivos objeto de estudio podrían presentar con frecuencia (tabla 3.3) y se buscó llevar la humedad a un valor de 70%, nuevamente haciendo uso de una función de corrección.

Tabla 3.3 Pruebas con función de corrección

| Era | Humedad inicial (%) |
|-----|---------------------|
| 1 | 45 |
| 2 | 46 |
| 3 | 50 |

Prueba 7: Sistema funcionando por 3 días

Se trabajó con una era y se estableció una condición de humedad de suelo inicial extrema que podría presentarse, con un valor de tan solo 3% y se mantuvo el sistema funcionando por tres días, en donde después de un día y medio de operación, el suelo de las cubetas se cambió por suelo muy seco nuevamente con una humedad de 4%. El rango de humedad a mantener fue de 60% a 70%.

Prueba 8: suministro de nutrientes

Se estableció un lapso de tiempo para realizar el suministro de nutrientes, desde las 10:00 am hasta las 11:00 am y se fijó la fecha 25/07/2021, la cual concordaba con el día en el cual se realizó la prueba.

3.4.2 Pruebas del sistema fotovoltaico

Posterior al primer montaje del SFV para pruebas de campo, se realizaron tres actividades más.

Test 1: Se registró el consumo energético del sistema durante la prueba donde se establecieron tres humedades iniciales diferentes en tres eras y el programa aún no contaba con la función de corrección.

Test 2: Se registró el consumo energético del sistema durante la prueba donde se operó sobre tres eras con condiciones similares a la prueba anterior, pero en esta oportunidad se incorporó al sistema de control la función de corrección.

Test 3: Cómo se busca que el sistema desarrollado sea autónomo energéticamente, se hizo una prueba en tiempo continuo durante tres días, bajo las peores condiciones posibles, y forzando el sistema a que haga el riego al cambiar la humedad del suelo luego de día y medio de funcionamiento.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran los resultados con su respectivo análisis de las diversas pruebas que se llevaron a cabo durante el proyecto, describiendo los diversos ajustes que se realizaron para mejorar el sistema.

4.1 MONTAJE DE PRUEBA DEL SISTEMA DE CONTROL

Para el desarrollo del sistema de control se elaboró un prototipo (figura 4.1 y 4.2) el cual se integró a la interfaz HMI desarrollada, que busca el correcto funcionamiento del sensado y control de las variables que son objeto de estudio y la correcta configuración de las condiciones de riego y suministro de nutrientes en los cultivos de referencia.

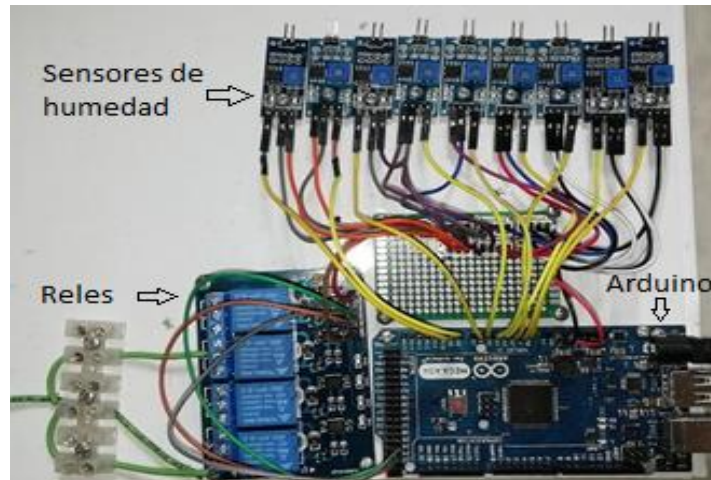


Figura 4.1 Montaje del sistema de control



Figura 4.2 Montaje del sistema de riego

El prototipo es capaz de registrar la temperatura ambiental en el aire, la humedad del suelo y el caudal de agua, con posibilidad de mostrar en tiempo real los datos adquiridos por los sensores y almacenar las lecturas obtenidas de las variables sensadas mediante la interfaz HMI desarrollada (figura 4.3). También tiene la facultad de suministrar nutrientes de acuerdo a un horario preestablecido para cada cultivo de referencia o también mediante datos ingresados por el usuario a través de una pestaña personalizada que permite implementar el sistema para otros cultivos.

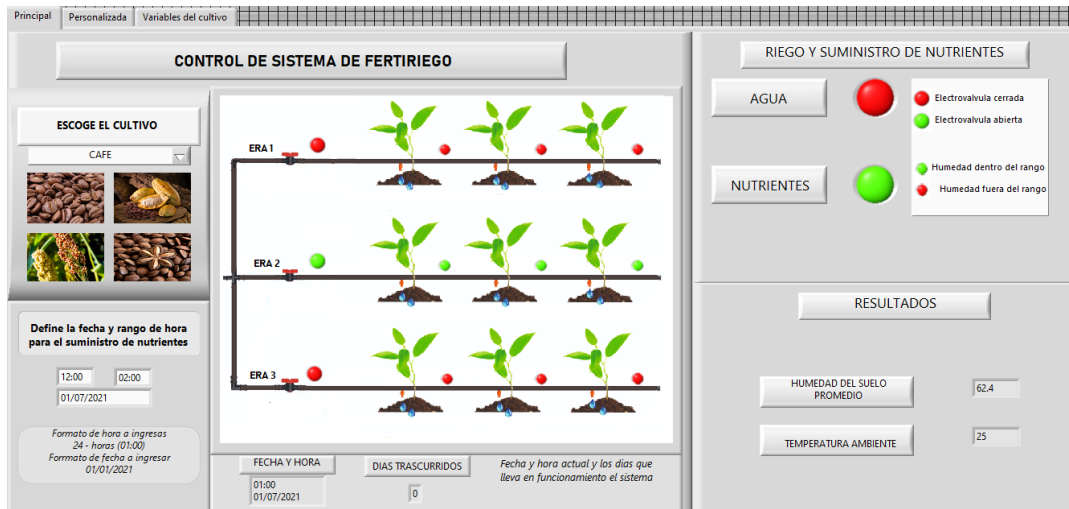


Figura 4.3 Interfaz HMI

El sistema realiza un control de riego de agua que responde en función a un rango de humedad que se desea mantener en los cultivos de café, quinua, sachá inchi o quinua, si los sensores de humedad de suelo registran un valor por debajo del rango establecido, se activará el riego hasta que la humedad haya llegado al valor máximo que requiere el cultivo.

4.1.1 Prueba de funcionamiento de electroválvulas:

Con un primer prototipo se realizó una primera prueba, estableciendo tres humedades iniciales diferentes en tres eras (figura 4.4), con los sensores ubicados a 10 centímetros del gotero y buscando mantener la humedad en un rango de 30 a 40%. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:



Figura 4.4 Prototipo de fertiriego

- La era uno empezó con una humedad muy baja de tan solo 4% y luego de 14 minutos el riego se detuvo, cuando la humedad alcanzó un valor de 40% pero alcanzó una humedad máxima de 58%.
- La era dos comenzó con una humedad de 25% y el riego se activó, luego de 4 minutos se desactivo ya que el sensor detectó que la humedad llegó a 40% pero la humedad siguió aumentando tomando un valor máximo de 58%.
- La era tres inició con una humedad de 44% cuyo valor estaba por encima del rango y durante la prueba no hizo riego.

En la figura 4.5 los colores azul, rojo y verde más oscuro representa que se está suministrando agua, mientras que la tonalidad más clara indica que el riego se detuvo y además podemos observar dos líneas azules ubicadas horizontalmente, que señalan el rango de humedad a mantener.

Tabla 4.1 Resultados de la prueba de funcionamiento de las electroválvulas

| Era | Humedad inicial (%) | Humedad deseada (%) | Humedad máxima (%) | Tiempo de riego(min) |
|-----|---------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 4 | 40 | 59 | 14 |
| 2 | 25 | 40 | 58 | 4 |
| 3 | 43 | 40 | 43 | 0 |

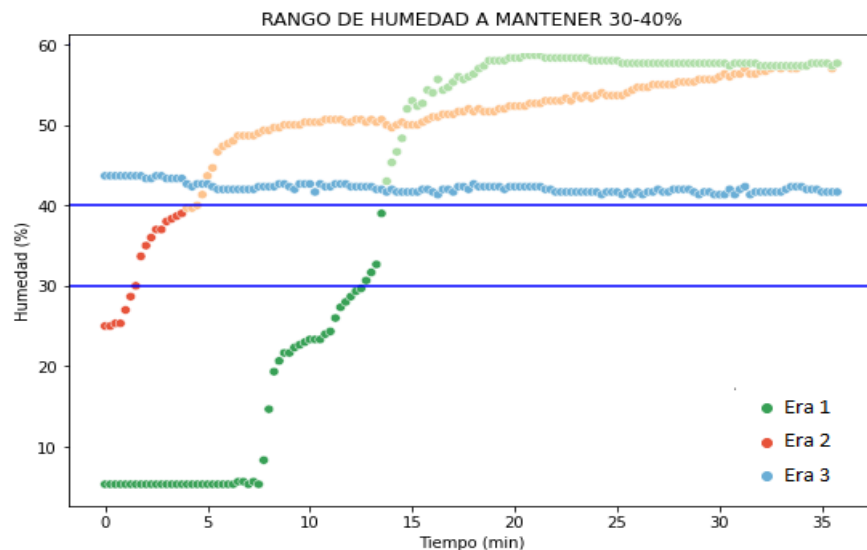


Figura 4.5 Prueba funcionamiento de electroválvula

El sistema de control activo y desactivo el riego como se esperaba, es decir si la humedad estaba por encima del rango establecido, la era no debía hacer riego como lo podemos ver en la era

tres, la cual no tuvo suministro de agua, mientras que la era uno y dos estuvieron en riego por 14 y 4 minutos respectivamente hasta alcanzar el valor de humedad mayor definido de 40% (tabla 4.1), demostrando que el prototipo si hace un control sobre la aplicación de agua.

Con la finalidad de estudiar el sistema de control en un caso extremo y así garantizar su correcto funcionamiento, se hizo la prueba en una condición forzada, por lo que la era uno inició con una humedad de tan solo 4%, donde podemos notar que existe un patrón con la humedad inicial de la era y el humedecimiento del suelo, el cual presenta un tipo de inercia que causa que la humedad siga aumentando luego de que el riego se detiene, y que es mayor cuando la humedad inicial es más baja, provocando que se sobrepase el rango establecido, lo cual no es propicio para la plantación, por lo que se debió ajustar el sistema de control, y para ello se realizaron nuevas pruebas teniendo en cuenta el comportamiento de inercia observado.

4.1.4 Prueba cuando la humedad desciende:

La siguiente prueba se hizo con el fin de verificar que, si la humedad presenta un comportamiento descendente e inicia con un valor por encima del rango, el riego se debe activar cuando la humedad del suelo pasa el valor de humedad menor definido. En esta prueba el rango de humedad a mantener fue de 50 a 60%, y la era empezó con un valor de 70%, después de 40 minutos donde el suelo estuvo bajo un fuerte sol y con ayuda de un secador, la humedad descendió pasando el rango inferior de 50% y se activó el riego, luego cuando la humedad ascendió a 50% nuevamente el suministro de agua se detuvo, y el suelo alcanzó una humedad máxima de 65% (figura 4.7).

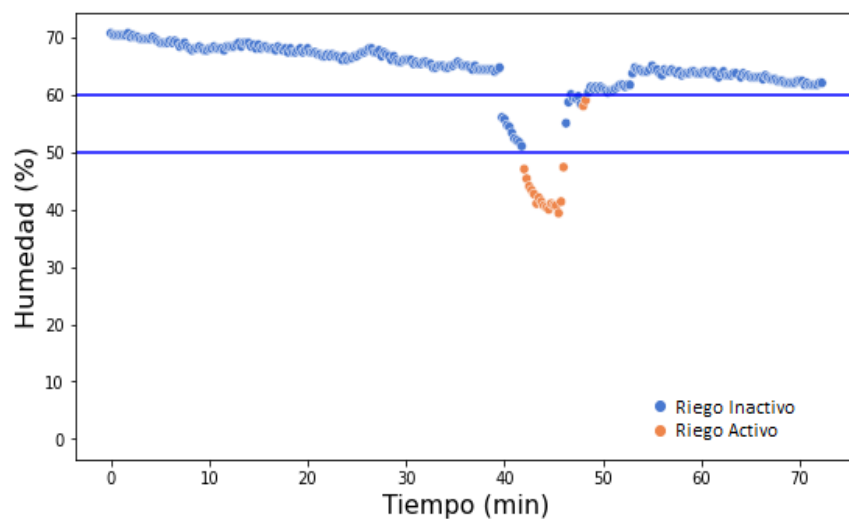


Figura 4.6 Resultados de la prueba con la humedad descendiendo

En este caso el sistema de control decide activar el riego al alcanzar el valor inferior del rango ya que detecta un flanco descendente en la humedad, es decir su valor está disminuyendo por lo que garantiza que no hará riego si la humedad aún se encuentra dentro del rango a mantener.

4.1.5 Pruebas con humedades iniciales diferentes

Con los sensores calibrados y alejados a 7 cm sobre la superficie del punto de goteo se realizaron las siguientes pruebas para estudiar el aumento en la humedad luego de que se detenga el riego. Sobre una era se establecieron 4 humedades iniciales diferentes (tabla 4.3) buscando obtener una humedad de 70%.

Como resultado se tuvo que las humedades más bajas de 21% y 32% llegaron ambas a un valor máximo de 98% y para los valores iniciales de 45 y 50% se obtuvo una humedad máxima de 84 y 80% respectivamente. Además, se registró el tiempo de riego y lo que duró la humedad aumentando luego de detenerse el suministro de agua denominado tiempo de inercia (tabla 4.2).

Tabla 4.2 Resultados de la prueba con humedades iniciales diferentes

| Humedad inicial (%) | Humedad deseada (%) | Humedad máxima (%) | Tiempo de riego(min) | Tiempo de inercia(min) |
|---------------------|---------------------|--------------------|----------------------|------------------------|
| 21 | 70 | 98 | 9,33 | 3,50 |
| 32 | 70 | 98 | 8,63 | 1,33 |
| 45 | 70 | 84 | 8,33 | 1,00 |
| 50 | 70 | 80 | 7,63 | 0,63 |

Comparando los tiempos de riego y de inercia obtenidos con las humedades iniciales, se observa que si la humedad inicial es baja se requieren tiempos más altos, por ejemplo, para el valor inicial de 21% la duración de riego fue de 9,33 minutos y la de inercia de 3,5 minutos, mientras que para una humedad inicial de 50% los tiempos fueron 7,63 minutos de riego y 0,63 minutos de inercia.

Con el objetivo de corroborar los datos obtenidos en esta prueba se llevó a cabo nuevamente la prueba con condiciones similares, en este caso se realizó sobre tres eras funcionando simultáneamente. Para la era tres se parte de un valor de humedad de 50%, se inicia el riego y la humedad se mantiene constante, a los 9,63 minutos el valor de humedad llega a 70 % y la electroválvula se cierra sin embargo continúa en inercia llegando a una humedad de 83% y

estabilizándose finalmente en una humedad de 80% lo cual sobrepasa el valor establecido. (tabla 4.4).

Esto sucede similar en la era uno y dos, en las cuales el riego se hace hasta una humedad de 70% pero por inercia alcanzan humedades más altas de 100 y 92 % respectivamente (figura 4.8).

Tabla 4.3 Resultados de la prueba dos con humedades iniciales diferentes

| Era | Humedad inicial (%) | Humedad deseada (%) | Humedad máxima (%) | Tiempo de riego(min) | Tiempo de inercia(min) |
|-----|---------------------|---------------------|--------------------|----------------------|------------------------|
| 1 | 7 | 70 | 100 | 10,00 | 1,30 |
| 2 | 38 | 70 | 92 | 9,63 | 3,30 |
| 3 | 50 | 70 | 83 | 9,63 | 1,00 |

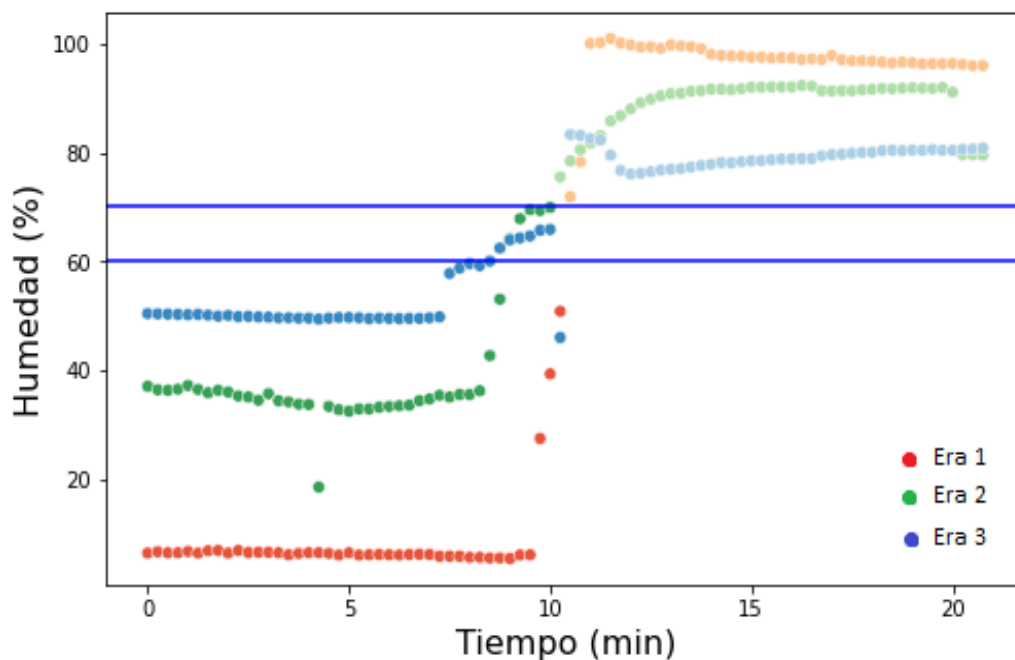


Figura 4.7 Resultados de la prueba dos con humedades iniciales diferentes

La era uno empezó con tan solo 7% de humedad en donde podemos ver que la humedad máxima alcanzada de 100% sobrepasa el valor deseado de 70% (figura 4.8), lo cual puede provocar daños en el cultivo, pero se debe tener en cuenta que hablamos de un caso poco frecuente ya que después de que el sistema de riego comience a funcionar, el suelo se mantendrá en estados

de humedad más altos en donde el control es mejor, como ocurrió en la era tres donde su humedad inició en 50% y llegó a 83% cuyo valor se acerca más al valor deseado.

4.1.6 Prueba con humedades finales diferentes

Se realizaron 3 pruebas en una era, estableciendo humedades bajas similares y buscando llegar a tres humedades finales diferentes (tabla 4.5). En la prueba uno la humedad partió de 9% con el objetivo de llegar a 40% y después de 7 min de riego alcanzó una humedad máxima de 68%. La prueba dos comenzó con 11% de humedad y tras 8,3 min de riego logró una humedad máxima de 72% pero se buscaba llegar a 50% y la prueba tres inició con un valor de 15%, luego de 8 minutos, el riego se detuvo al alcanzar una humedad de 60% y alcanzó una humedad máxima de 80%.

Tabla 4.4 Resultados de la prueba con humedades finales diferentes

| Prueba | Humedad inicial del sistema (%) | Humedad deseada (%) | Humedad máxima del sistema (%) | Tiempo de riego (min) | Tiempo de inercia (min) |
|--------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 9 | 40 | 68 | 7 | 37,3 |
| 2 | 11 | 50 | 72 | 8,3 | 8,3 |
| 3 | 15 | 60 | 80 | 8 | 5 |

Podemos observar que, si el riego se desactiva a un valor de humedad más bajo, la humedad máxima alcanzada será menor.

4.1.7 Función de corrección

Los datos de humedades iniciales y finales obtenidos en la prueba 4.1.6 se graficaron, colocando la humedad inicial en el eje X y su respectiva humedad final alcanzada en el eje Y, tal como se muestra en la figura 4.8.

Con esta información se creó una función que es válida únicamente en el tipo de suelo implementado para este sistema, que se acopla a la relación de estas dos variables la cual tiene una tendencia polinómica que predice la humedad final que se obtendrá para cierta humedad inicial, con un porcentaje de variación R^2 de 0,988.

$$y = -0.014x^2 + 0.33x + 98.091 \quad (4.2)$$

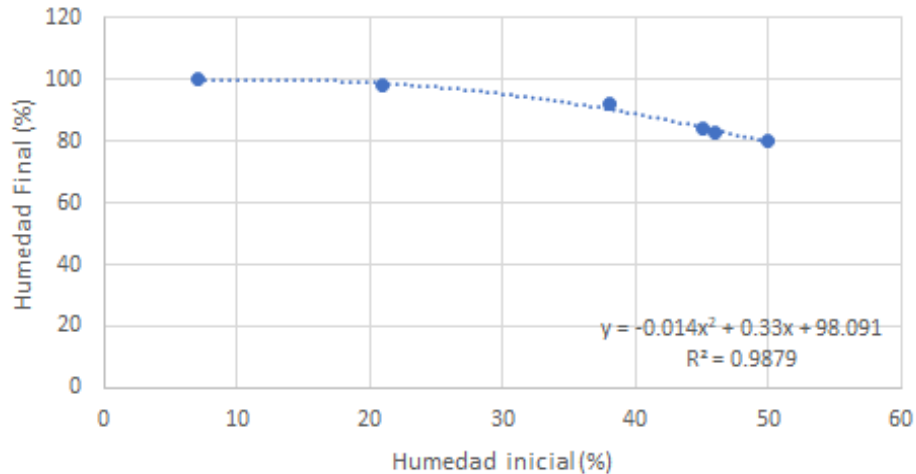


Figura 4.8 Relación de la humedad final vs inicial

Esta función fue incorporada al código programado en Arduino (algoritmo 1), de tal manera que al saber la humedad final que se obtiene para cierto valor inicial, se calcula la diferencia que la humedad sobrepasa al valor deseado y se resta al valor donde se quiere mantener la humedad, con este resultado se establece el valor donde se deberá desactivar el suministro de agua, permitiendo controlar el incremento de humedad por inercia, ya que causa que el riego se desactive un poco antes del valor establecido.

Algoritmo 1: Código que integra la función de corrección.

```
float valor_final = (-0.014*(humedad_era*humedad_era))+(0.33*humedad_era)+(98.091);
float resta = valor_final - humedad_mayor_inicial;
float rango_humedad_mayor = humedad_mayor_inicial - resta;
```

4.1.8 Prueba con función de corrección

Con el fin de ver la contribución de la función de corrección al sistema de control, se procedió a realizar una prueba con las condiciones más similares a la prueba mostrada en la figura 4.8. La era uno inició con una humedad de 6%, donde el incremento de la humedad comenzó y el riego se suspendió a 32% de humedad, generando una inercia que llegó a un máximo de 83% de humedad. La era dos empezó el riego en una humedad del 33%, desactivándose en un valor de 40% y por inercia llegando a una humedad máxima de 78%. La era tres comienza el riego en 48% de humedad y su suministro de agua se desactiva en un valor de 51% de humedad y por inercia llega a un valor de 73 % (tabla 4.6).

Tabla 4.5 Resultados de la prueba con función de corrección

| Era | Humedad inicial del sistema (%) | Humedad deseada (%) | Humedad máxima del sistema (%) | Tiempo de riego (min) |
|-----|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1 | 6 | 70 | 83 | 6,63 |
| 2 | 33 | 70 | 78 | 5,00 |
| 3 | 48 | 70 | 73 | 3,63 |

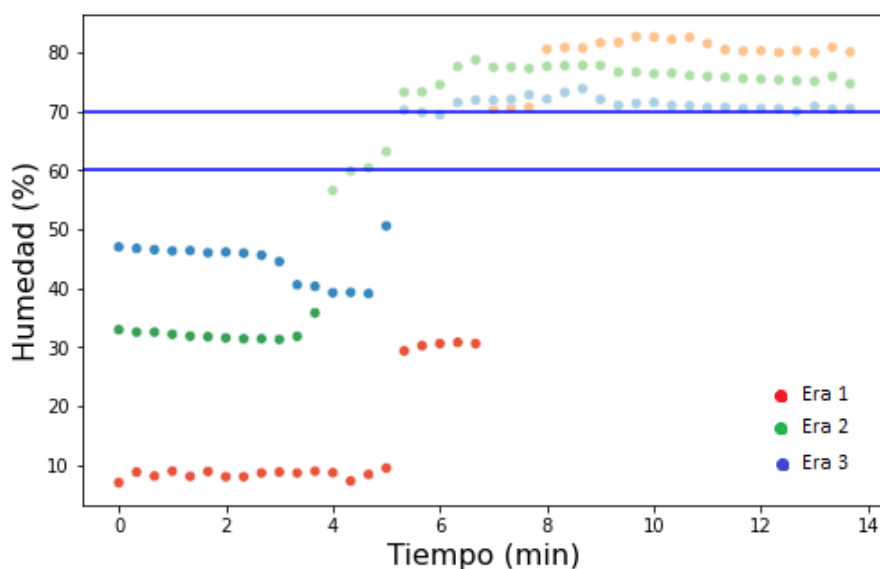


Figura 4.9 Resultados de la prueba con función de corrección

Las eras alcanzaron humedades más cercanas al valor deseado en comparación a los resultados obtenidos y mostrados en la Figura 4.9, ya que la función de corrección permitió que el riego se detuviera en un valor menor a 70% donde la humedad debía llegar, además de contar con la capacidad de que entre más baja sea la humedad inicial del suelo, la desactivación también ocurrirá antes, tal como en la era uno que inició con un valor inicial de 6% y su riego se detuvo al alcanzar 32% de humedad, mientras que en la era tres que partió con una humedad de 48%, tuvo la desactivación del suministro de agua al alcanzar 51% de humedad.

Se observa que la humedad del suelo requerida por el cultivo alcanza valores aceptables que, aunque no estén en el rango exacto, tiene fluctuaciones muy pequeñas, en un margen de tolerancia permitido, previniendo problemas en la plantación por humedades altas, además la suspensión de riego un poco antes de llegar al valor deseado, representa un ahorro en fuente

hídrica, ya que el tiempo de riego se reduce, permitiendo reducir gasto de recurso hídrico y disminuir costos de riego en la plantación.

4.1.9 Prueba dos con función de corrección

Sobre tres eras se establecieron humedades iniciales con valores que los cultivos objeto de estudio podrían presentar con frecuencia (tabla 4.7) y se buscó llevar la humedad a un valor de 70%, aplicando la función de corrección definida por las pruebas anteriores. La era uno partió con 45% y luego de 3 min de riego alcanzó una humedad máxima de 74%, La era dos inició con una humedad similar de 46 %, llegando a un valor máximo de 72% tras 2,3 min de riego y la era tres que empezó con una humedad de 53% y su riego duro 2min, logró una humedad del 71% (Figura 4.11).

Tabla 4.6 Resultados de la prueba dos con función de corrección

| Era | Humedad inicial del sistema (%) | Humedad deseada (%) | Humedad máxima del sistema (%) | Tiempo de riego (min) |
|-----|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1 | 45 | 70 | 74 | 3,0 |
| 2 | 46 | 70 | 72 | 2,3 |
| 3 | 53 | 70 | 71 | 2,0 |

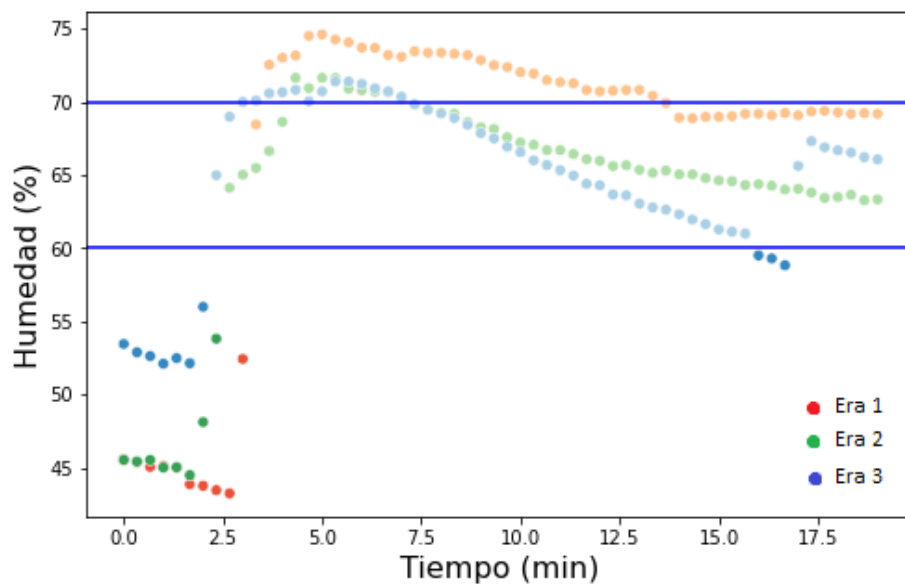


Figura 4.10 Resultados de la prueba dos con función de corrección

En esta prueba se evidencia nuevamente la tarea que cumple la función de corrección, disminuyendo el tiempo de riego y logrando llevar la humedad del suelo a valores aceptables.

Otro punto a destacar del control que realiza el prototipo, es como el suelo debido a la precipitación (lluvia) alcanza una humedad mayor a la deseada, haciendo que las electroválvulas no suministren agua, evitando así el daño de los cultivos, de manera que solo es necesario que el exceso de agua disminuya por evaporación o absorción.

4.1.10 Prueba del sistema operando continuamente durante tres días

La humedad partió en un caso extremo, con un valor de 3% y durante las primeras 5 h el sistema se activó tres veces, donde alcanzó una humedad máxima de 90%, luego de 10 h más en funcionamiento la humedad estuvo en un rango de 60 a 80% y finalmente por 21 h el suelo se mantuvo en un valor de humedad cercano al 70% (figura 4.12), en este punto se decidió cambiar el suelo de la era, partiendo nuevamente de una humedad baja de 4%, en la cual durante las primeras 6 h el sistema hizo tres veces riego, obteniendo una humedad máxima de 88% pero luego por 19 horas más operando, su humedad se mantuvo entre 60 y 75% y finalmente el resto de tiempo el valor de la humedad estuvo entre 74% y 71% (figura 4.13).

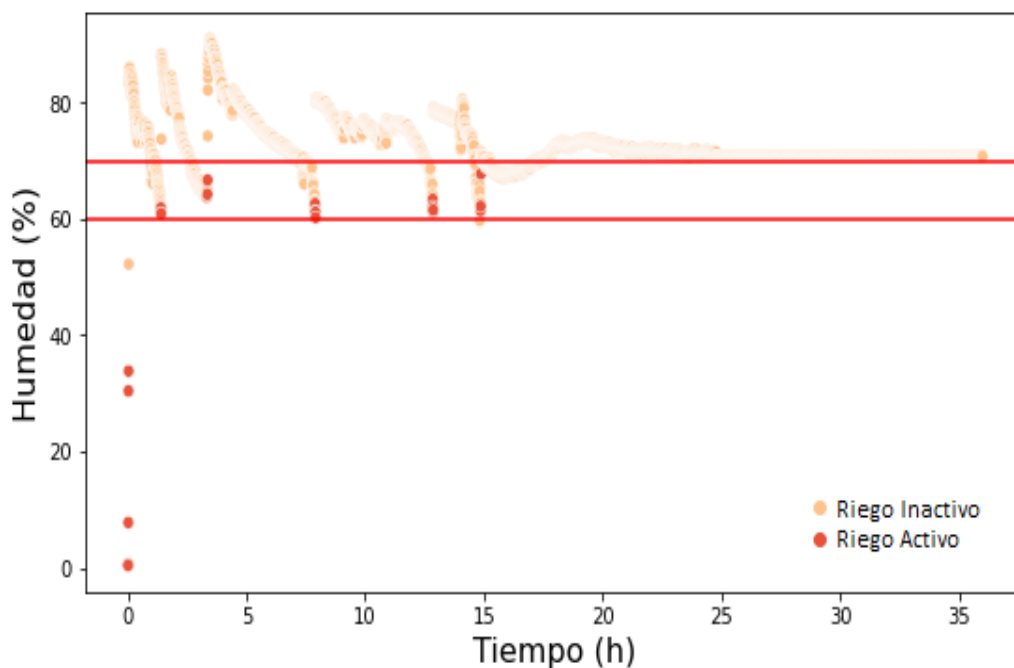


Figura 4.11 Primeros resultados de la prueba del sistema operando por tres días

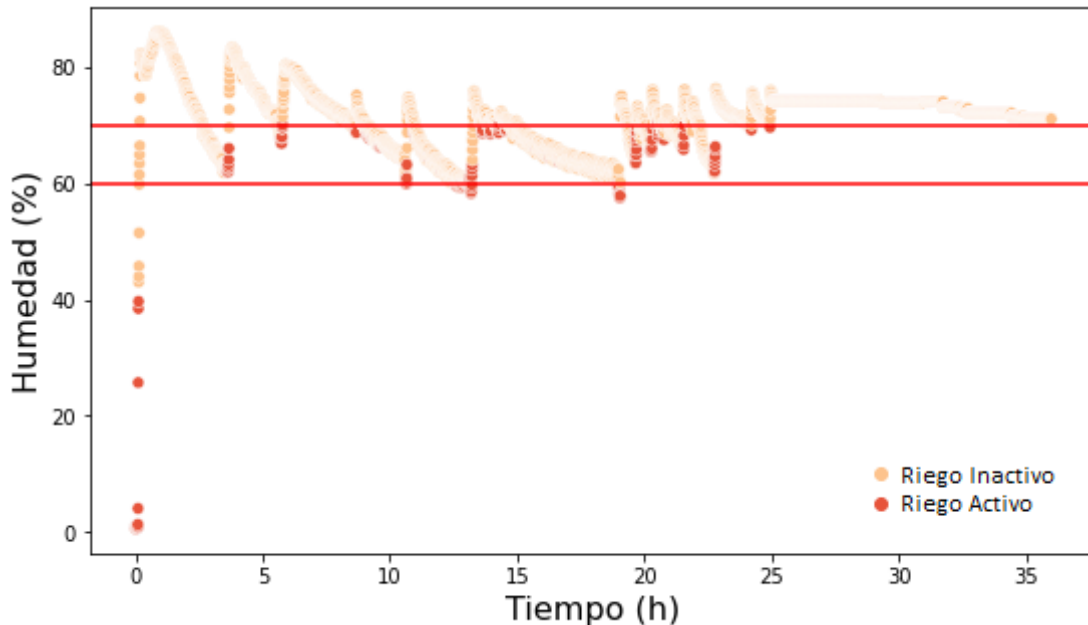


Figura 4.12 Segundos resultados de la prueba del sistema operando por tres días

El sistema de control al operar en un caso extremo de suelo seco, nos lleva la humedad final a valores no programados, pero posteriormente al estar el suelo húmedo, el prototipo permite mantener la humedad en un rango aceptable, como se ve en las pruebas, se consiguió que después de 5 h en operación, la humedad se mantuviera en valores de 60 a 80% para la prueba uno y 60 a 75% en la segunda prueba, en donde el rango esperado era 60 a 70 %.

Cabe aclarar que, para tener datos más precisos de humedad, se podría cambiar el sensor YL-69, ya que por un lado su corta longitud de 4,50 cm limita el sensado y debido a que en una planta se debe garantizar humedecimiento donde está la mayor cantidad de raíces (por ejemplo, para la quinua es de 30 cm) lo recomendable sería testear a una mayor profundidad, previniendo pérdida de recurso hídrico o un lavado de los nutrientes por sobre humedecimiento.

Por otro lado se nota que no es lo mismo hacer riego sobre un suelo seco que sobre uno ya húmedo y esto se debe a que cada vez que se aplica agua, ocurre un cambio en la estructura del suelo por lo que las condiciones de humedecimiento pueden cambiar, además de que existen varios tipos de suelo según su estructura en donde el proceso de humedecimiento varía, los cuales son factores que no se analizaron inicialmente por los que se debe hacer algunas adecuaciones al sistema teniendo en cuenta las variables mencionadas, sin embargo en este proyecto se trabajó con la inercia en la humedad, realizando una desactivación en el riego antes

de llegar al valor deseado ,que fue un parámetro clave para mejorar el control de humedad en el suelo para los cultivos de referencia.

4.1.11 Prueba de suministro de nutrientes: Se estableció que el suministro de nutrientes sería desde las 10:00 am hasta las 11:00 am, donde el sistema empezó a operar desde las 7:00 am hasta las 12:00 pm, consiguiendo que se activara la electroválvula correspondiente a controlar durante el lapso establecido ya mencionado.

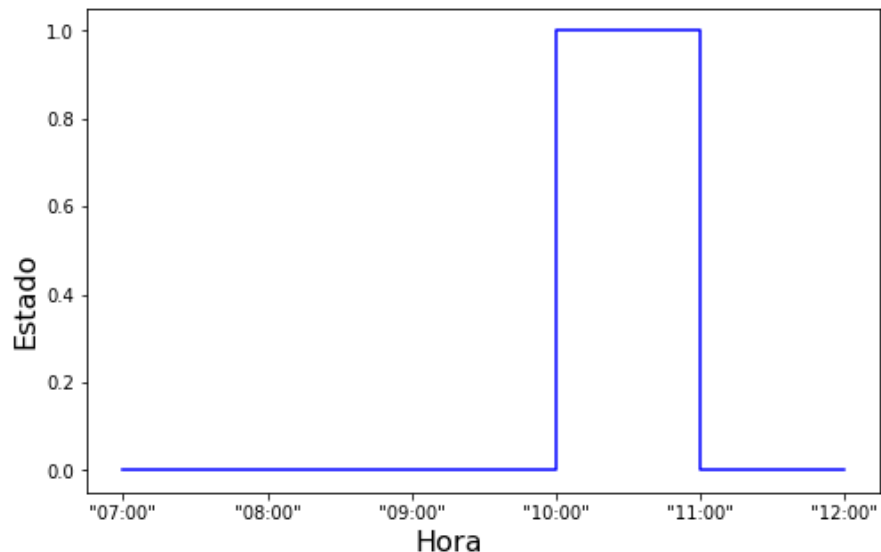


Figura 4.13 Gráfica de estados en la aplicación de nutrientes

Se logró un cambio de estado de bajo a alto y luego de alto a bajo (Figura 4.14), indicando que el sistema permite realizar control sobre una salida a electroválvula, de acuerdo a la implementación automatizada o personalizada.

Además, la opción de contar con la posibilidad de ingresar los parámetros de control mediante una interfaz, brinda una gran ventaja de tener un sistema que justamente no está hecho para un caso particular si no que es adaptable a diferentes lugares y condiciones de acuerdo a los criterios que ingrese el usuario final en los diferentes ítems desarrollados en la interfaz.

4.2 INTERFAZ DE USUARIO

La interfaz HMI desarrollada está formada por tres pestañas denominadas:

- Principal
- Personalizada
- Variables de cultivo

4.2.1 Pestaña Principal

Está diseñada para el usuario común, puesto que es muy intuitiva de interpretar, en esta se puede observar el estado de suministro de nutrientes y agua (activado o desactivado), la temperatura ambiente y la humedad relativa promedio del suelo en tiempo real (figura 4.15).

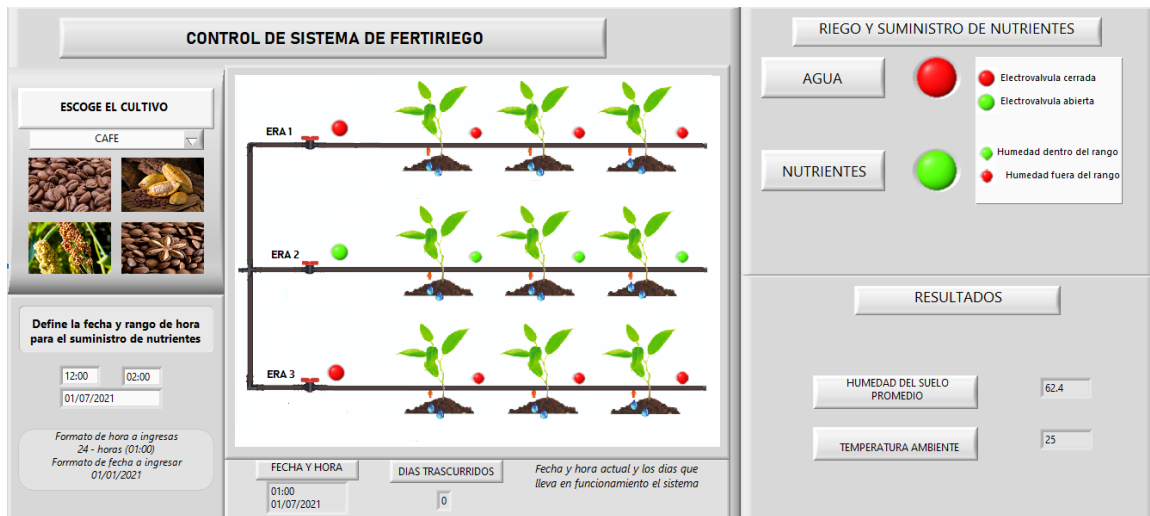


Figura 4.14 Pestaña principal de la interfaz

La ventana cuenta con:

- Una ventana desplegable que le permite al usuario establecer el cultivo en el cual implementará el sistema de fertirriego.
- Posee una figura que muestra la distribución, estado de los sensores y electroválvulas. Por una parte, los diodos led pequeños simbolizan los sensores de humedad de suelo por otro los leds grandes representan las electroválvulas, distribuidos en tres eras. La activación de las electroválvulas se indica mediante el cambio de color del led, donde rojo representa electroválvula cerrada y verde abierta. Respecto a los sensores, si el led es de color rojo indica que la humedad del suelo es baja por el contrario si es verde la humedad del suelo está dentro de rango establecido en el programa.
- El apartado de *riego y suministro de nutrientes* de cultivo muestra si el suministro de nutrientes y riego está activado, mediante el cambio de color de un led redondo, cuyo color rojo representa que no hay flujo y el color verde representa que si hay flujo de agua o nutrientes en el cultivo.

- La sección de resultados presenta la humedad promedio del suelo, cuyo valor proviene de calcular el promedio entre los datos que proveen los sensores de humedad de suelo YL-69 y temperatura ambiente, expresada en grados centígrados tomada con el sensor de temperatura DS18B20.

4.2.2 Pestaña personalizada

Esta ventana tiene un aspecto muy parecido a la ventana principal, pero se diferencia en que el usuario puede establecer el rango de valor de humedad en la cual quiere mantener el cultivo, posibilitando implementar este sistema en cualquier otro cultivo (Figura 4.16).

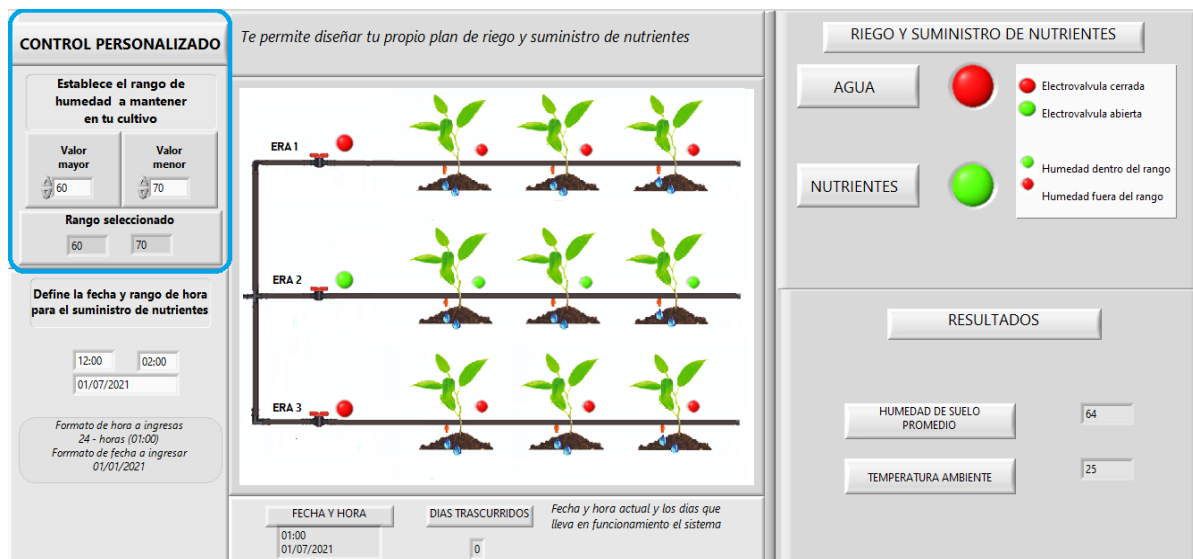


Figura 4.15 Pestaña personalizada de la interfaz

La razón del desarrollo de esta pestaña es que, si bien hay unos estándares más o menos para el riego y suministro de nutrientes en la parte de cultivos, que dependen no solo del tipo de plantación, sino de factores como la altura respecto al mar o condiciones del suelo entre otros, se vio recomendable contar con una opción personalizada donde el agrónomo tuviera la capacidad de aplicar nutrientes a voluntad y necesidad del cultivo.

4.2.3 Pestaña variables de cultivo

Esta pestaña está diseñada para personas con mayores conocimientos en ingeniería, que les interese obtener más información sobre el cultivo. En ella se pueden ver todos los datos que

registrar los sensores en tiempo real, posee una gráfica que muestra la relación entre humedad/tiempo y temperatura ambiente/tiempo, además tiene una opción que permite descargar los datos adquiridos de humedad del suelo, temperatura ambiente, acompañados de la fecha en la que se registraron y los momentos donde el riego estaba activo, dando la posibilidad de hacer un estudio posterior de las variables objeto de estudio. Adicionalmente cuenta con un recuadro llamado sistema solar que da a conocer el estado de carga del banco de baterías del sistema solar fotovoltaico aislado (figura 4.17).

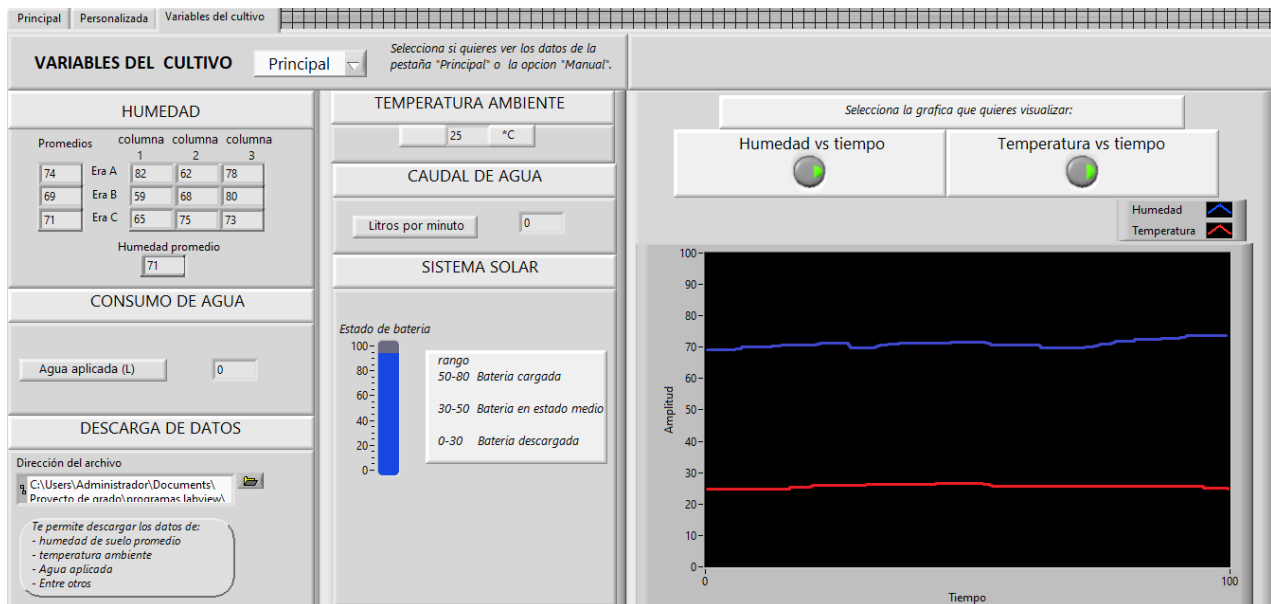


Figura 4.16 Pestaña variables del cultivo de la interfaz

4.3 DISEÑO DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Con los primeros datos de potencial de generación en punto de aplicación y de consumo inicial de energía en el sistema (Tabla 4.7), se diseñó un sistema fotovoltaico de acuerdo a las condiciones establecidas (tabla 4.8), tanto en requerimientos de potencia, como en tiempos de trabajo de la planta; este sistema fotovoltaico ajustado (Figura 3.16) una vez comprobado su funcionamiento energético, se utilizó para el desarrollo de pruebas de campo, optimización de sistema de adquisición de datos y desarrollo de interfaz usuario en las fases restantes del proyecto.

Tabla 4.7 Consumo de potencia del sistema

| Elemento | Electroválvula | Carga | Total |
|---------------|----------------|-------|-------|
| Corriente (A) | 1,7 | 1,0 | 2,7 |
| Potencia (W) | 20,4 | 12,0 | 32,4 |

Tabla 4.8 Condiciones de diseño del SFV

| | |
|---|--------|
| Energía (W*h) | 194,40 |
| Energía con factor de protección (W*h) | 252,72 |
| Capacidad de batería (A*h) | 30,08 |
| Corriente total del sistema (A) | 7,52 |
| Corriente de protección del sistema (A) | 9,40 |
| Voltaje nominal del sistema (V) | 18 |
| Potencia máxima de paneles (W) | 135,38 |
| Número de paneles requeridos | 1 |
| Voltaje de panel solar | 12 |
| Horas de funcionamiento diario (panel) | 6 |

Para que el diseño resultante del sistema solar fotovoltaico (Tabla 4.9) coincidiera con instrumentos existentes en la industria se usaron dos baterías MT12180HRG de 20 Ah, un regulador MPPT 75 de 10 A y 12V de salida, junto a dos paneles solares de 50W y cableado calibre 14.

Tabla 4.9 Consumo de potencia y diseño del sistema

| | |
|--------------------------|-----|
| Potencia de panel (W) | 135 |
| Regulador (A) | 10 |
| Protección (A) | 10 |
| 2 banco acumulador (A*h) | 20 |
| Cableado (calibre) | 14 |

4.3.1 Consumo energético con tres eras operando y el sistema sin función de corrección

Durante la prueba donde se establecieron tres humedades iniciales diferentes en tres eras y el programa aún no contaba con la función de corrección, se registró el consumo energético del sistema, en donde sus baterías partieron con un voltaje de 12,26 V y finalizaron con un valor de 12.13 V, con una corriente de consumo de 0,80 A, además el tiempo de riego con las electroválvulas activas fue de 11 min. basado en esta información se calculó el consumo de energía del sistema (Tabla 4.11).

Tabla 4.10 Resultados del consumo energético con tres eras operando y el sistema sin función de corrección

| V(v) | Vprom(v) | Consumo de energía (Wh) |
|------------|----------|---|
| Vi = 12.26 | 12,19 | $Et = 12,19 * 0.7 * 0.183 = 1561,5 E - 3$ |
| Vf = 12.13 | | |

Con esta prueba se espera comparar el consumo energético entre el sistema con función de corrección y sin esta.

4.3.2 Consumo energético con tres eras operando y el sistema con función de corrección

En esta oportunidad se incorporó al sistema de control la función de corrección, y se operó sobre tres eras con condiciones similares a la prueba anterior, donde las baterías comenzaron con un voltaje de 11,99 V y finalizaron con 11,93 V, manteniendo una corriente de consumo de 0,7 A durante 7 min de riego, por lo que su consumo de energía fue de $971,1 E - 3$ Wh (Tabla 4.12).

Tabla 4.11 Resultados del consumo energético con tres eras operando y el sistema con función de corrección

| V(v) | Vprom(v) | Consumo de energía (Wh) |
|------------|----------|--|
| Vi = 11,99 | 11,96 | $Et = 11,96 * 0,70 * 0,116 = 971,1E - 3$ |
| Vf = 11,93 | | |

EL consumo energético del sistema pasó de $1561,5 E - 3 Wh$ (Tabla 4.10) a $971,1 E - 3 Wh$ (Tabla 4.12) gracias a la integración de la función de corrección, que logró reducir el tiempo de riego, permitiendo optimizar el sistema energético, conllevando a gastar menos energía y

disminuir costos al SFV, pero a la vez reducir el gasto de recurso hídrico, contribuyendo al cuidado del recurso de agua.

4.3.3 Consumo energético del sistema durante tres días

Se hace una prueba en tiempo continuo, para establecer el consumo de energía en tres días de funcionamiento dado que el sistema desarrollado se busca que sea autónomo energéticamente, por ello se hizo un diseño bajo las peores condiciones posibles, forzando a que el sistema haga riego y operando en una sola era, para que luego con ese modelo resultante, hacer una proyección para N eras. Para ello el sistema partió con una humedad muy baja de 3% y luego de día y medio de operación se le cambio a la era el suelo con una humedad de 4%, obligando al sistema hacer riego, lo que garantiza que el sistema solar fotovoltaico diseñado, siempre va a proveer energía y será capaz de soportar energéticamente casos extremos que serán muy improbables que se den en la realidad sin embargo eso da garantía de la autonomía del sistema. Los datos obtenidos en la prueba para garantizar el suministro de energía al sistema durante tres días son:

Tabla 4.12 resultados del consumo energético del sistema durante 3 días

| CONSUMO DE POTENCIA DEL SISTEMA DE RIEGO FUNCIONANDO POR TRES DÍAS PARA UNA ERA | |
|---|-------|
| Potencia (W) | 18 |
| horas de funcionamiento | 1,20 |
| Energía (W*h) | 21,60 |
| Energía con factor de Protección (W*h) | 28,08 |
| Capacidad de Batería (A*h) | 3,34 |
| Corriente Total del sistema (A) | 0,83 |
| Corriente - Protección del sistema (A) | 1,04 |
| Voltaje nominal del sistema(V) | 18 |
| Potencia Máxima - Paneles (W) | 15,04 |
| Voltaje Sistema (V) | 12 |

El sistema tendría un consumo de energía para tres días con una era operando de 21,6 Wh y si se considera un factor de protección por pérdidas eléctricas, se tendría un consumo de 28,08 Wh, a partir de ese consumo de energía el diseño del SFV que le permita dar autonomía al sistema sería un banco de acumulación mayor a 3,34 Ah, la corriente de protección permite

establecer el calibre del cableado, las protecciones eléctricas y la corriente del regulador de carga, por lo tanto necesitamos cableado, protecciones y un regulador que soporte 1,04 A, finalmente se necesitaría un sistema de generación fotovoltaica aproximado de 15 vatios por lo cual se necesitaría un panel solar de esa potencia o superior, o un arreglo fotovoltaico de esa capacidad y todo funcionando a 12V. Además, estos datos permiten hacer una proyección del montaje requerido para N eras al mantener el mismo voltaje del sistema a 12V, pero multiplicando el número de eras deseado por las siguientes variables:

Tabla 4.13 resultados del consumo energético del sistema durante tres días para “n” eras

| CONSUMO DE POTENCIA DEL SISTEMA DE RIEGO FUNCIONANDO POR TRES DÍAS PARA N ERAS | |
|--|----------|
| Energía (W*h) | 7,2 x N |
| Energía con factor de Protección (W*h) | 9,36 x N |
| Capacidad de Batería (A*h) | 1,11 x N |
| Corriente - Protección del sistema (A) | 0,35 x N |
| Potencia Máxima - Paneles (W) | 5,01 x N |

4.3.4 Instrumentos del sistema solar fotovoltaico:

La selección de instrumentos se hace para tres eras, ya que nuestro sistema es de tres eras, por lo que el consumo de energía con un factor de protección por pérdidas eléctricas para tres días es:

Tabla 4.14 Resultados del consumo energético del sistema durante tres días para tres eras

| CONSUMO DE POTENCIA DEL SISTEMA DE RIEGO FUNCIONANDO POR TRES DÍAS PARA TRES ERAS | |
|---|-------|
| Energía con factor de Protección (W*h) | 84,24 |
| Capacidad de Batería (A*h) | 10,03 |
| Corriente - Protección del sistema (A) | 3,13 |
| Potencia Máxima - Paneles (W) | 45,13 |

A partir de ese consumo de energía, el diseño del sistema solar fotovoltaico aislado que le permita dar autonomía al sistema, teniendo en cuenta los dispositivos que se encuentran en el mercado puede ser:

Tabla 4.15 Elementos del SFV diseñado

| Elemento | Cantidad | Características | Modelo |
|--------------|----------|------------------|--------------------------|
| Paneles | 1 | 50 W | Renogy |
| Acumulador | 1 | 10Ah / 12V | ML10-12 |
| Regulador | 1 | 5 A - 6V/12V | PWM-5A |
| Inversor | 1 | 12v /110v / 120w | Truper |
| Protecciones | 3 | 3A | Breaker Ac/Dc Siemens |
| Cableado | - | calibre 18 | - |

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se desarrolló un prototipo funcional, que permite automatizar un sistema de fertirriego para los cultivos de sachá inchi, cacao, quinua y café, optimizado en base a la inercia presentada por el suelo de acuerdo a la humedad inicial, que permite eliminar tareas manuales que pueden estar sujetas al error humano, y que aumenta la eficiencia y la productividad de la plantación; adicionalmente se logra autonomía energética gracias al diseño e implementación de un sistema solar fotovoltaico aislado.
- Gracias a la pestaña personalizada con la que cuenta la interfaz HMI del sistema, se permite la implementación en otros cultivos de manera fácil y dinámica, ya que el usuario puede configurar el rango de humedad donde se quiere mantener la plantación además de la hora y día donde se realizará suministro de nutrientes, permitiendo así adaptar este sistema a los cultivos que se desee.
- Se implementó un sistema automatizado de monitoreo y control para el riego de agua y control de suministro de nutrientes, teniendo en cuenta los parámetros de humedad de suelo, tipo de cultivo y fecha para la aplicación de nutrientes, configurados mediante una interfaz HMI para cultivos de quinua, sachá inchi, cacao y café desarrollada en LabView, además de la implementación de un conjunto de relés, sensores de humedad y una placa de Arduino.
- Con el diseño del sistema fotovoltaico aislado, se asegura la autonomía energética al sistema piloto de fertirriego desarrollado, lo cual significa una gran ventaja si se quisiera utilizar en las ZNI, ya que después de realizar diferentes pruebas se demostró que el

sistema es capaz de producir la cantidad de energía requerida por el sistema de fertirriego para poder mantenerse en funcionamiento.

- El diseño del sistema solar fotovoltaico aislado elaborado, tiene la ventaja de que puede ser proyectado para la cantidad de eras requeridas en un cultivo por medio de las ecuaciones planteadas que permiten obtener el consumo de potencia del sistema de riego para las eras requeridas.
- Se obtuvo una función de corrección que permitió mejorar el control de humedad de los cultivos, reducir gastos y consumo de agua.
- La opción de descargar los datos censados que se incluyó en la interfaz brindará al usuario la posibilidad de realizar estudios sobre la evolución del cultivo, y la toma de decisiones para cultivos futuros.

5.2 RECOMENDACIONES

- Debido a la corta longitud de los sensores YL-69 para medir la humedad del suelo, se observó que aunque es útil, no es el más adecuado para proyectos de riego en cultivos de quinua, sachá inchi, cacao y café, ya que en una planta se debe garantizar humedecimiento donde estén la mayoría de raíces, y la longitud de 4.5 cm que tienen este tipo de sondas no es suficiente, por lo que sería recomendable testear a una mayor profundidad, para obtener datos más exactos, previniendo pérdidas de recurso hídrico o un lavado de los nutrientes por sobre humedecimiento.
- Al prototipo desarrollado se le podría incluir nuevos elementos de sensado para así poder realizar un estudio más amplio de un cultivo en específico, como, por ejemplo:
 - **Ph metro:** con el cual se podría hacer una medición de la acidez de la tierra, el cual es un parámetro muy importante en el suministro de nutrientes.
 - **Higrómetro:** es un instrumento que se utiliza para medir el grado de humedad del aire o de otros gases, a partir de esto se puede medir la pérdida de agua que hay en la planta, ya que debido a esto se pueden presentar problemas en el desarrollo del cultivo debido a la baja y alta humedad en la planta como por ejemplo: crecimiento débil, marchitamiento, frutos pequeños, etc.
- Llevar a práctica el prototipo desde la semilla en los cultivos de sachá inchi, quinua, café, cacao y elaborar un estudio detallado del desarrollo de las plantas y el efecto que las

variables que se escogió, puedan tener sobre el cultivo, con el fin de determinar si un sistema automatizado es un factor determinante en el rendimiento en la cosecha.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sicard, T. L. (2014). Relaciones agricultura-ambiente en la degradación de tierras en Colombia. *Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Estudios Ambientales. 14pp. [en línea].*
- [2] Guzmán, M. (2004). Población, agua, suelo y fertilizantes: el fertirriego.
- [3] Liotta, M. A., Carrión, R. A., Ciancaglini, N., & Olguin Pringles, A. (2015). *Riego por goteo*. PROSAP; INTA.
- [4] SISTEMA DE INFORMACIÓN ELÉCTRICO COLOMBIANO. Cobertura de energía eléctrica a 2016.
<http://www.siel.gov.co/Inicio/CoberturaDelSistemaInterconectadoNacional/ConsultasEstadisticas/tabid/81/Default.aspx>
- [5] Aux, J., & Benavides, L. (2015). Control automatizado de un sistema de riego y fertirriego.
- [2] Gavi, F. (s.f). Uso de fertilizantes [Pdf], *secretaría de agricultura y ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación (sagarpa)*. Recuperado: 2013, 9 de mayo. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Uso%20de%20Fertilizantes.pdf>, P 2,8
- [7] SALAS, M.C.; URRESTARAZU, M. 2001. Técnicas de fertirrigación en cultivo sin suelo, *Manuales de la Universidad de Almería, Servicios de Publicaciones de la Universidad de Almería. España, 280 pp.*
- [8] SENA VIRTUAL. Servicios de Automatización. "Material de Estudio Semana 1, *La Automatización*".
- [9] Gañán, Luis y Castañeda, Julián (2016). Diseño e implementación de un sistema SCADA para una estación multivariable didáctica. Pereira, Colombia.
- [10] Sala, Gabriel (2012). *Energía Solar Fotovoltaica. Versión 1. España*
- [11] Abella, Miguel. *Energía Solar Fotovoltaica. Sistemas Fotovoltaicos. Madrid, España.*
- [12] Rodríguez, Aquilino (mayo 2013), *Sistemas SCADA. Tercera edición. C.V, México.*

- [13] Perpiñán, Oscar (9 de enero 2018). Energía Solar Fotovoltaica. Versión 1. España.
- [14] Palma, Y. D., Palma, G. T., Molina, B. A., & Santana, L. A. (2015). Sistema de riego automatizado para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la ESPAM MFL-Ecuador. *Revista Tecnológica ESPOL–RTE*, 28(2), 100-107.
- [15] Douglas, M., Perdomo, M., Cuellar Medina, L. A., & Quiroga Medina, C. C. Sistema automatizado de riego, fertilización y fumigado para cultivo de habichuela bajo invernadero, monitoreado mediante aplicación móvil.
- [16] Amaya García, E. A., & Ramírez Artiga, W. Y. (2017). Diseño de automatización de sistema de riego de invernadero para el desarrollo de la agricultura familiar en el marco de la seguridad alimentaria: en vínculo con la ENA.
- [17] Aux, J., & Benavides, L. (2015). Control automatizado de un sistema de riego y fertirriego.
- [18] Amaya García, E. A. (2015). Diseño e implementación de sistema de riego automatizado en un invernadero de la Escuela Nacional de Agricultura, ENA. *Revista tecnológica*. (2014), 7 (1), 48-53.
- [19] Lugo Espinosa, O., Quevedo Nolasco, A., Bauer Mengelberg, J. R., Valle Paniagua, D. H. D., Palacios Vélez, E., & Águila Marín, M. (2011). Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(5), 659-672.
- [20] Álvarez Arboleda, A. A. (2017). Análisis de un sistema de riego automatizado alimentado por energía fotovoltaica utilizando PLC.
- [21] LUIS, C. M. C. (2020). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE FERTIRRIEGO POR MICROASPERSIÓN CON INYECTOR VENTURI EN CULTIVO DE CACAO UBICADO EN EL RECINTO SAN ANTONIO CANTÓN URDANETA* (Doctoral dissertation, Universidad Agraria Del Ecuador).
- [22] García, G. C., & Sánchez, H. P. C. (2016). Evaluación de tres alternativas de fertirriego en el establecimiento del cultivo de plátano (*musa paradisiaca/harton cv*) en el Yopal, Casanare. *Ingeniería y Región*, 16, 49-55.
- [23] De la Cuesta, Á., & Alejandra, M. (2012). Implementación de un sistema de fertirriego en un cultivo de cítricos. *Trabajo de grado) Corporación Universitaria Lasallista, Caldas, Colombia*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10567/808>.

[24] Gómez Puentes, L. C., & Jiménez Vivas, S. I. (2019). Diseño e implementación de un sistema automático de fertirrigación para un cultivo de gulupa.

[25] Narváez Jiménez, D., & Ruiz, H. (2017). Efecto de la aplicación de tres láminas de fertirriego, sobre la producción de cultivo de maní en un suelo Typic Haplustalf.

[26] Martínez, C. (2015). Diseño e implementación de un sistema de riego por goteo basado en control distribuido.

[27] Avendaño S, Jerson & Segura O, Camila A. (2017). Diseño e implementación de un sistema piloto para el control de humedad y sondeo de ph del suelo mediante energía solar fotovoltaica, para el cultivo de quinua en el departamento del cauca.