



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE PARA UN  
TERRENO MULTICULTIVO DE LA PARROQUIA “11 DE NOVIEMBRE” EN  
COTOPAXI**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Electrónico

AUTOR: Christian Sebastián Bautista Andocilla

TUTOR: Danilo Sebastián Sigcha Tipán

Quito – Ecuador

2022

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Christian Sebastián Bautista Andocilla con documento de identificación N° 1721303988 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 14 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Christian Sebastián Bautista Andocilla  
1721303988

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Christian Sebastián Bautista Andocilla con documento de identificación No. 1721303988, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del proyecto técnico: “Desarrollo de un sistema de riego inteligente para un terreno multicultivo de la parroquia “11 de noviembre” en Cotopaxi”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 14 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

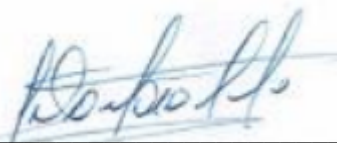
Christian Sebastián Bautista Andocilla  
1721303988

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Danilo Sebastián Sigcha Tipán con documento de identificación N° 1721770343, docente de la Universidad Politécnica Salesiana ,declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE PARA UN TERRENO MULTICULTIVO DE LA PARROQUIA “11 DE NOVIEMBRE” EN COTOPAXI**, realizado por Christian Sebastián Bautista Andocilla con documento de identificación N° 1721303988, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 14 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Ing. Danilo Sebastián Sigcha Tipán. MSc.  
1721770343

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico a mi mamá: Carola Andocilla, y a mi hermano: Leonardo Bautista, quienes con su amor, esfuerzo y paciencia me han ayudado a cumplir esta meta tan anhelada. A mi abuelita Fabiola, que siempre me ha cuidado y gracias a ella he logrado este sueño. A mi tío Iván Bautista que siempre me ha apoyado cuando lo he necesitado y a mi abuelito Miguel que desde el cielo me sigue cuidando y protegiendo.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi familia por siempre estar conmigo brindándome amor y afecto en este largo trayecto, a mis abuelos por siempre apoyarme en mis estudios, a mis tíos por sus consejos y atención, a mis amigos que me han ayudado desde el comienzo de este gran sueño.

Agradezco al Ing. Danilo Sigcha por ayudarme a realizar este proyecto y a poder adquirir nuevos conocimientos.

## INDICE

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACION A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA .....	IV
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	V
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1 Planteamiento del Problema .....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Metodología.....	4
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
2.1 Consideraciones agrícolas .....	5
2.1.1 Sistemas multicultivos .....	5
2.1.2 Suelo y cultivos de la región.....	5
2.1.3 Sistema de riego por goteo.....	7
2.1.4 Sistema de riego por aspersion .....	8
2.1.5 Fenómeno de heladas.....	9
2.1.6 Fertirrigación .....	9

2.2	Hardware del sistema de riego.....	10
2.2.1	Raspberry Pi.....	10
2.2.2	Convertidor Analógico-Digital MCP3008.....	11
2.2.3	Transistor MOSFET .....	11
2.2.4	Relés.....	12
2.2.5	Fuente de alimentación AC –DC 12V 20A .....	13
2.2.6	Sensores .....	13
2.2.7	Actuadores .....	15
2.3	Sistema de control .....	16
2.3.1	Lógica Difusa.....	16
2.3.2	Conjuntos Difusos.....	17
2.3.3	Reglas Difusas .....	20
2.3.4	Fusificación.....	20
2.3.5	Defusificación.....	21
2.4	Monitoreo por el usuario .....	22
2.4.1	IoT.....	22
2.4.2	Servidor Web Firebase.....	23
2.4.3	MIT App Inventor.....	23
2.4.4	Interfaz Hombre-Maquina (HMI).....	23
2.4.5	Sistema GSM.....	24
2.4.6	Plataforma de envío de mensajes SMS Altiria360. ....	24
3.	DISEÑO DEL HARDWARE Y SOFTWARE DEL SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE.....	25
3.1	HMI mediante aplicación móvil desarrollada en MIT App Inventor.....	27
3.2	Envío y recepción de datos mediante Firebase.....	30
3.3	Diseño de entradas del sistema.....	30
3.3.1	Diseño del sistema de detección de humedad de suelo.....	30
3.3.2	Diseño del sistema de detección de heladas .....	31
3.3.3	Diseño del sistema de llenado y control de reservorios.....	31



3.4	Diseño de salidas del sistema .....	33
3.4.1	Diseño del circuito de la bomba de agua .....	33
3.4.2	Diseño e implementación de las electroválvulas .....	34
3.5	Diseño de control inteligente.....	36
3.5.1	Diseño del controlador fuzzy .....	36
3.5.2	Diseño de conjuntos difusos .....	37
3.5.3	Diseño de reglas de inferencia .....	40
3.5.4	Proceso de Fusificación .....	41
3.6	Simulación en MATLAB .....	42
4.	ANALISIS DE RESULTADOS .....	44
4.1	Comparación de la respuesta del sistema simulado y del implementado.....	44
4.2	Tiempo de respuesta entre el sistema y el HMI.....	47
4.3	Comparación de respuesta entre sistema implementado y aplicación móvil .....	49
4.4	Funcionalidad del sistema de alerta SMS.....	51
4.5	Comparación de activación de relés con regla de inferencia del sistema.....	52
4.6	Cantidad de líquido saliente según cada valor de PWM del sistema .....	54
	CONCLUSIONES.....	57
	RECOMENDACIONES .....	58
	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS .....	59
	ANEXOS.....	63

## INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.4-1 Sistema de riego por goteo.....	8
Figura 3.1.5-1 Sistema de riego por aspersión .....	8
Figura 3.1.6-1 Plantaciones afectadas por la helada.....	9
Figura 1.2.2.1-1 Raspberry Pi 4B .....	10
Figura 2.2.2-1 Circuito integrado MCP3008.....	11
Figura 2.2.3-1 Transistor MOSFET .....	12
Figura 2.2.4-1 Módulo de ocho relés.....	12
Figura 2.2.5-1 Fuente de alimentación de 12V 20A.....	13
Figura 2.2.6.1-1 Sensor capacitivo de humedad de suelo v2.0 .....	14
Figura 2.2.6.2-1 Sensor de temperatura y humedad DHT22.....	14
Figura 2.2.6.3-1 Sensor de nivel de líquido horizontal .....	15
Figura 2.2.7.2-1 Electroválvula de 12V 0.6A.....	16
Figura 3.3.2-1 Conjunto difuso cuadrado.....	17
Figura 3.3.2-2 Conjunto difuso triangular .....	18
Figura 3.3.2-3 Conjunto difuso trapezoidal.....	18
Figura 3.3.2-4 Conjunto difuso triangular .....	19

Figura 3.3.2-5 Conjunto difuso trapezoidal.....	19
Figura 3.3.4-1 Corte de los conjuntos difusos en base a la entrada analógica .....	21
Figura 3.3.4-2 Salida difusa final del sistema .....	21
Figura 3.3.5-1 Salida difusa final del sistema con valores de corte de varios métodos de defusificación.....	22
Figura.3.1 - 1 Proceso del sistema de riego inteligente .....	25
Figura.3.1 - 2 Diagrama P&ID del sistema de riego .....	26
Figura.3.2-1 Pantalla principal de la interfaz HMI.....	27
Figura.3.2-2 Pantalla de selección de cultivos de la interfaz HMI.....	28
Figura.3.2-3 Pantalla de configuración del sistema de fertirrigación de la interfaz HMI ...	29
Figura.3.2-4 Pantalla de niveles de reservorios de la interfaz HMI .....	29
Figura.3.4.1-1 Conexiones electrónicas del sistema de detección de humedad de suelo....	30
Figura.3.4.2-1 Conexión del sensor de temperatura y humedad ambiental DHT22 .....	31
Figura 3.3.3-1 Diagrama del tanque de agua del sistema.....	32
Figura.3.4.3-1 Conexión de los sensores de nivel de líquido horizontal.....	32
Figura.3.5.1-1 Conexiones del circuito de potencia de la bomba de agua. ....	33
Figura.3.5.2-1 Conexiones del circuito de potencia de cada electroválvula .....	35
Figura.3.6.1-1 esquema general del control difuso del sistema de riego.....	37
Figura.3.6.2-1 Conjuntos difusos de humedad de suelo de los cultivos.....	38

Figura.3.6.2-2 Conjuntos difusos del fertilizante de los cultivos .....	39
Figura.3.6.2-3. Conjuntos difusos de temperatura ambiental.....	39
Figura.3.6.2-4. Conjuntos difusos de la bomba de agua .....	40
Figura.3.6.3-1 Diagrama de flujo de la regla 76 de las reglas de inferencia .....	41
Figura 3.5.4-1 PWM obtenido de la regla de inferencia N°76 .....	42
Figura 3.6-1 Diseño de la lógica difusa del sistema simulado en MATLAB.....	42
Figura 3.6-2 Creación de las reglas de inferencia del sistema simulado en MATLAB .....	43
Figura 3.6-3 Respuesta del PWM del sistema simulado en MATLAB .....	43
Figura.4.1-1 Conjuntos difusos de temperatura para realización de prebas .....	44
Figura.4.2-1 Comparativa entre la repitencia y tiempo de respuesta del sistema .....	49
Figura.4.3-1a Comparación de lecturas entre sistema inteligente y HMI.....	50
Figura.4.3-1b Comparación de lecturas entre sistema inteligente y HMI.....	50
Figura.4.4-1 Recepción de mensajes de alarmas de prueba del sistema .....	52

## INDICE DE TABLAS

Tabla.2.1.8-1 RANGOS de humedades optimas de cada cultivo – Sierra ecuatoriana.....	7
Tabla 3.3.1-1 Comparación de lógica clásica con lógica difusa .....	17
Tabla.3.4.3-1 Designación de sensores de nivel de líquidos con sus respectivos pines.....	33
Tabla.3.5.2-1 Función de cada electroválvula en el sistema de riego .....	34
Tabla.3.5.2-2 Designación de cada electroválvula con su respectivo pin. ....	35
Tabla.3.6.2-1 Rango de humedades de los conjuntos difusos de humedades de suelo.....	38
Tabla.4.1-1 Respuesta del PWM de la bomba de agua (implementado/simulado) - dos humedades bajas y una óptima. ....	45
Tabla.4.1-2 Respuesta del PWM de la bomba de agua (implementado/simulado) - humedades altas y temperatura baja. ....	46
Tabla.4.1-3 Respuesta del PWM de la bomba de agua (implementado/simulado) - todas las humedades optimas y dos fertilizantes activados .....	46
Tabla.4.1-4 Respuesta del PWM de la bomba de agua (implementado/simulado) - todos los parámetros óptimos .....	47
Tabla.4.2-1 Hora de envío y recepción de información entre sistema inteligente y aplicación móvil.....	48
Tabla.4.3-1 Descripción de los indicadores de la Figura.4.3-1 .....	51
Tabla.4.4-1 Hora de activación de sensores digitales y recepción de mensajes SMS.....	51
Tabla 4.5-1 Comparación de activación de electroválvulas entre la regla 56 y la regla 64	53

Tabla 4.5-2 Comparación de activación de electroválvulas entre la regla 56 y la regla 64 53

Tabla 4.5-3 Comparación de activación de electroválvulas entre la regla 56 y la regla 64 54

Tabla 4.6-1 Pruebas de medición de líquido saliente con un PWM de la bomba de agua del 35% ..... 55

Tabla 4.6-2 Pruebas de medición de líquido saliente con un pwm de la bomba de agua del 60% ..... 55

Tabla 4.6-3 Pruebas de medición de líquido saliente con un pwm de la bomba de agua del 89% ..... 56

## **RESUMEN**

Se presenta un sistema de riego inteligente el cual es controlado principalmente por un algoritmo de lógica difusa que toma como entradas la temperatura ambiental, la humedad del suelo de cada cultivo y la activación o desactivación del riego de fertilizante de cada una de las plantaciones. De igual forma implementa un sistema de control de nivel de reservorio tanto en el tanque de agua como en el tanque de fertilizante. Los actuadores que se utilizan en el sistema de riego son electroválvulas y una bomba de agua, las cuales se activan o desactivan dependiendo de las entradas y las reglas de inferencia de la lógica difusa. Todas las variables del sistema son visualizadas en una aplicación móvil, al igual que la selección de cada cultivo y la hora y día en los cuales se quiera activar el riego del fertilizante. Las alarmas de los niveles bajos de los reservorios y de detección de heladas son enviadas mediante mensaje SMS para que el usuario pueda tomar en cuenta la situación y tomar medidas al respecto. Para la comprobación del correcto funcionamiento del sistema de riego inteligente se somete a varios tipos de pruebas simulando un entorno real tanto de variables climáticas como geográficas.

## **ABSTRACT**

An intelligent irrigation system is presented which is mainly controlled by a fuzzy logic algorithm that takes as inputs the environmental temperature, the humidity of each crop and the activation or deactivation of the fertilizer irrigation of each plantation. Similarly, I implement a reservoir level control system in both the water tank and the fertilizer tank. The actuators that will be implemented are solenoid valves and a water pump which will be activated depending on the inputs and the inference rules of fuzzy logic. All the variables of the system will be displayed in an application, as well as the selection of each crop and the time and day in which you want to activate the irrigation of the fertilizer. The low level reservoir and frost detection alarms will be sent by SMS message so that the user can take the situation into account and take action in this regard.



# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

### 1.1 Planteamiento del Problema

La parroquia “Once de Noviembre”, ubicada en la provincia de Cotopaxi, se dedica a actividades agrícolas y ganaderas, la mayoría de las actividades como riego de sembradíos, alimentación del ganado, incubación de huevos, entre otras se realizan de forma manual, lo cual reduce el tiempo para realizar otras actividades o fuerza a la contratación de mayor personal. De igual forma los moradores al tener varios terrenos dedicados a las mismas actividades productivas, pero en sectores lejanos, dificulta el poder controlar y supervisar dichas actividades en las distintas propiedades.

El sistema que mayor automatización tiene es el riego, el cual se realiza por aspersión, pero sujeto a restricciones de abastecimiento comunitarios y por condiciones climáticas resulta insuficiente provocando pérdidas de cultivos, especialmente en épocas de sequía y cuando la temperatura ambiental es demasiado baja ya que cuando se presenta una gran cantidad de viento, el agua que debía llegar hacia la superficie del suelo de cultivo se desplaza hacia otro sitio y de esta forma se produce perdidas de recursos hídricos y la plantación no recibe el agua necesaria. (Enriquez, 2014)

Mediante una entrevista realizada al presidente parroquial del sector, Sr. Víctor Herrera, comunicó que el agua de regadío es provista a la comunidad cada dos o tres días, por un promedio de cuatro horas por día lo cual en extensiones muy grandes de terreno no es suficiente para hidratar de manera correcta a las plantaciones; pero en épocas de sequía podría variar entre cuatro a cinco días por tanto requiere la implementación de riego manual para que el cultivo no se pierda. De igual manera mediante un reglamento interno, los terrenos pueden activar un máximo de dos aspersores a la vez ya que si se activaran un número mayor ocuparían más recursos hídricos, restando a los demás pobladores. Esta normativa afecta a aquellos agricultores que tienen más de un terreno, ya que muchos habitantes poseen propiedades alejadas entre sí por lo cual suministrar el agua de regadío en cada terreno es una labor exhaustiva.

Estas medidas buscan reducir el despilfarro de agua en una zona, que podría provocar reducción en el rendimiento de la producción.

Otro factor que afecta a los cultivos son las heladas, según datos meteorológicos del INAMHI, entre 1980 y 2010, las heladas se dan frecuentemente entre los meses de Julio y diciembre, donde, especialmente en las noches pueden dañar las cosechas al producir una capa de escarcha sobre las plantaciones.

En cuanto al riego manual, la mano de obra empleada para labores agrícolas representa uno de los rubros más importantes para los agricultores. En promedio, el costo por día para cada trabajador asignado a labores agrícolas es de 15 USD. La frecuencia y los días dedicados a las tareas de riego dependen del cultivo y las condiciones climáticas. (Montalvo & Bajaña, 2017)

Por lo general en los suelos que se desea cultivar no cuenta con los nutrientes suficientes o necesarios para que las plantaciones se desarrollen, o a su vez su crecimiento es más lento de lo esperado (Salgado, y otros, 2014). Al no tener un control exacto y periódico de la cantidad a suministrar de fertilizante la plantación no tendrá un crecimiento óptimo.

## **1.2 Justificación**

La agricultura es una de las actividades económicas más importantes del país, por lo cual se han implementado distintos tipos de tecnologías de automatización que ayudan a los agricultores, como sistemas de aspersión inteligentes, los cuales optimizan tanto los recursos hídricos como eléctricos. Los sistemas automáticos de reservorios también son esenciales ya que en épocas de sequía o por distintas adversidades el suministro de agua se vea interrumpido, dichos sistemas mantienen siempre lleno los reservorios para las posibles situaciones antes descritas. (Parada & Carrillo, 2014)

Mediante un monitoreo remoto los agricultores obtienen un control permanente sobre pues conocen la lectura de varias variables de interés como temperatura ambiental, humedad, nivel, entre otras. En zonas apartadas de la ciudad es común el uso de conexión mediante internet o mediante alertas SMS utilizando la red GSM. El monitoreo constante permite evitar pérdidas de agua, indispensable en zonas rurales donde el agua designada para el regadío suele ser escasa. (Quintero, Bravo, & Ramírez, 2016)

Una tendencia reciente en la automatización de cultivos es el control de fertilización para que, en el transcurso del crecimiento del cultivo, el suministro sea el adecuado, ya que en poca cantidad los frutos crecerán de forma lenta o a su vez no crecerán. De igual forma si se lo aplica en exceso tendrá más nutrientes y proteínas de lo necesario por lo cual podría marchitarse y perecer la planta. (Salgado, y otros, 2014)

Los sistemas difusos presentan gran flexibilidad y capacidad de generalización, en cuanto a la identificación y modelación de funciones no lineales. (Celi, 2017) La combinación de sus potenciales son la gran capacidad y facilidad de manejo de información vaga e incertidumbre de la lógica difusa, hace que la aplicación de un sistema difuso orientado a la solución de problemas no lineales, o procesos complejos se resuelvan satisfactoriamente, tal como es caso del regadío de un terreno de siembra de distintos tipos de cultivos los cuales cada plantación tiene un nivel distinto óptimo de humedad del suelo.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

- Desarrollar un sistema automático para el riego de terrenos multicultivo mediante un algoritmo difuso.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Investigar los parámetros de temperatura, humedad y fertilización de los múltiples cultivos para la determinación del sistema de control y variables de diseño del sistema de riego.
- Construir el sistema de riego para la facilitación de las tareas agrícolas de los trabajadores del terreno multicultivo utilizando el hardware previamente analizado con el presupuesto.

- Diseñar un controlador para la comprobación del estado óptimo de las variables de humedad, temperatura, nivel de reservorio y fertirrigación a través de un algoritmo difuso para diferentes tipos de cultivos.
- Integrar un sistema de mensajería móvil para que envíe alarmas del reservorio, de temperatura en heladas y del sistema de fertirrigación, mediante sistemas GSM al usuario.
- Desarrollar circuitos de potencia necesarios para el correcto funcionamiento tanto de sensores como actuadores, mediante la electrónica de protección industrial.
- Realizar las pruebas de funcionamiento de riego bajo diferentes niveles de humedad para la validación de los resultados esperados.

#### **1.4 Metodología**

Para el desarrollo del proyecto se usará una metodología exploratoria de investigación por el escaso conocimiento sobre el porcentaje de agua requerido para las plantaciones, se recolectó información mediante papers, artículos científicos, tesis y entrevista a expertos en el tema.

Posteriormente se implementará una investigación experimental ya que se cuenta con variables manipulables como el nivel de riego empleado en los cultivos y del nivel óptimo de llenado del tanque de agua; además se tiene variables no manipulables como la temperatura ambiental, el nivel de humedad actual de las plantaciones y fertirrigación de los cultivos. Además de la creación del sistema de control de alarma por SMS.

Finalmente se aplicará una metodología evaluativa para analizar los resultados del sistema que han de ser empleados en la solución el problema

## **CAPÍTULO 2**

### **FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

En este capítulo se abordará un análisis de los conceptos que ayudará a comprender de mejor manera al lector el funcionamiento del proyecto implementado.

#### **2.1 Consideraciones agrícolas**

##### **2.1.1 Sistemas multicultivos**

En grandes zonas agrícolas en la región Sierra del Ecuador se cultiva el maíz juntamente con el frijol ya que se aprovecha el espacio del cultivo y a su vez también disminuye los problemas de plagas y maleza; además aprovechan conjuntamente los nutrientes que les provee el suelo. Una de las principales razones por la cual los agricultores a nivel mundial adoptan policultivos, es que frecuentemente se puede obtener un mayor rendimiento en la siembra de una determinada área sembrada como policultivo que de un área sembrada en forma de monocultivo o aislada. (Torres J. , 2012)

De igual manera los sistemas multicultivo o policultivo se dan en áreas de terreno en los cuales las condiciones como tipo de suelo, climatización, luz ambiental, entre otras; son favorables para todos los diferentes cultivos que se vayan a plantar, garantizando su óptimo crecimiento. En el caso de ser plantas de diferente tipo de especies con diferentes tipos de cuidados tales como regadío, aplicación de abono, temperatura ambiental; se debe tratar cada zona de forma individual con los cuidados específicos de cada tipo de planta. (Guijarro, Cevallos, Preciado, & Zambrano, 2018)

##### **2.1.2 Suelo y cultivos de la región**

Tomado textualmente de la página oficial de la parroquia “Once de Noviembre” (Noviembre, 2022):

“El piso alto: entre 2900-3200 msnm, ubicado en las faldas de las grandes lomas que forman los valles, suelos arenosos, poco profundos, erosionados sobre una capa dura cementada (cangahua), y material pedregoso, presenta relieves moderados con pendientes que oscilan

entre el 12-40% de inclinación, teniendo una alta deficiencia de agua de riego, apto para cultivos de secano, maíz asociado con fréjol, chochos y habas. Sufre las consecuencias de la erosión eólica, e hídrica que implica el arrastre de material empobreciendo el suelo.

En el piso bajo: menos a 2900 msnm, posee llanuras con pendientes de 2-12%, a veces uniformes y en otras ligeramente onduladas. Los suelos son arenosos de origen volcánico u otras rocas básicas. La textura es arenosa sobre duripán o cangahua en un metro de profundidad. Con una lámina de agua mayor que la parte alta, pero que no satisface las necesidades de los cultivos que se tienen, apta para agricultura y sembríos de alfalfa y maíz.”

Sabiendo el tipo de suelo que abunda en la región se podrá saber qué tipos de plantaciones tendrá un desempeño óptimo. De igual forma el saber que las superficies poseen una inclinación nos podrá ayudar en el sistema de regadío por la gravedad que existe.

En la región Sierra del Ecuador se da una gran variedad de cultivos como frutas, hortalizas, verduras, legumbres, cereales, entre otras más; y cada una tiene sus variedades de cada tipo de producto agrícola. Algunos de los cultivos más comunes de encontrar en esta región son trigo, maíz, cebada, pimiento, avena, col, pepino, coliflor, cebolla, brócoli, tomate, chocho, quinua, frejol, haba, arveja y zanahoria. (Hidrobo, y otros, 2015)

Debido a la extensa variedad de cultivos se seleccionó cinco cultivos que ya han sido plantados anteriormente en el sector por lo cual se tiene conocimiento de un mejor cuidado de los mismos, los cuales son: brócoli, cebolla, pepino, pimiento y tomate. Según (Necpas & J, 2021) los parámetros óptimos de temperatura ambiental y humedad del suelo de cada uno de dichos sembradíos se detalla en la Tabla 2.1.8-1

Tabla.2.1.8-1 Rangos de humedades optimas de cada cultivo – Sierra ecuatoriana

<b>Parámetros de Humedad y Temperatura Óptimos</b>				
<b>Cultivos</b>	<b>Humedades de Cultivos</b>		<b>Temperatura de Cultivos</b>	
	<b>Humedad Mínima [%]</b>	<b>Humedad Máxima [%]</b>	<b>Temperatura Mínima [°C]</b>	<b>Temperatura Máxima [°C]</b>
Brócoli	60	75	16	18
Cebolla	70	80	20	25
Pepino	60	85	20	25
Pimiento	50	80	20	24
Tomate	60	70	20	25

Autor: Christian Bautista

Para determinar un óptimo sistema de fertirrigación se debe tener en cuenta factores como el tipo de cultivo como hortalizas, vegetales, legumbres, frutas, ente otras; información de los suelos como el potencial de hidrogeno (PH) y la electroconductividad del suelo (Ec); y la fase en la cual se encuentran los cultivos como desarrollo de cultivo, postcosecha y reposo (Fonseca, Lordan, Rufat, Villar, & Pascual, 2011). Teniendo en cuenta estos parámetros se utilizará el fertilizante que sea apropiado para los cultivos al igual que la cantidad a suministrar.

### **2.1.3 Sistema de riego por goteo**

El sistema de riego por goteo es una gran opción al momento de hidratar los cultivos, ya que se economiza agua a comparación de los sistemas de riego por aspersion. Al ser un sistema presurizado que no necesita de una gran cantidad de presión para su distribución implementada por bombas de agua, de igual manera hacer que el cultivo sea regado de manera uniforme.

Figura 3.1.4-1 Sistema de riego por goteo



Fuente: (Intagri, 2022)

La posibilidad de efectuar riegos frecuentes permite reducir notoriamente el peligro de stress hídrico, ya que es posible mantener la humedad del suelo a niveles óptimos durante todo el periodo de cultivo, mejorando las condiciones para el desarrollo de las plantas. (Liotta, 2015)

#### **2.1.4 Sistema de riego por aspersión**

Mediante este sistema de aspersión se riega toda la superficie de forma uniforme que es ideal para la germinación de las plantas, para ello se necesita una presión de agua elevada mayor, que la del sistema de aspersión por goteo. Como desventaja se tiene que, al tener presencia de viento, el agua puede desviarse. (Palomino, 2017)

Figura 3.1.5-1 Sistema de riego por aspersión



Fuente: (iagua, 2022)



### 2.1.5 Fenómeno de heladas

Las heladas son fenómenos climáticos producidos en las noches en las cuales la temperatura ambiental baja a niveles inferiores de los 0°C por un lapso prolongado de tiempo. Este fenómeno produce en ocasiones que se cree una capa de escarcha sobre los cultivos lo cual produce daños al igual que el hielo sobre la piel humana por grandes periodos de tiempo de tiempo. (Arroyo, 2020)

Figura 3.1.6-1 Plantaciones afectadas por la helada



Fuente: (Agromatica, 2022)

### 2.1.6 Fertirrigación

Con la fertirrigación el agricultor busca cubrir dos necesidades importantes de la planta que son hidratar y suministrar nutrientes al cultivo. Los fertilizantes son disueltos en agua para que de esta manera cada gota de agua tenga uniformemente la misma cantidad de nutrientes. (Sanadria, Narváez, & Otero, 2021)

Para seleccionar el fertilizante y cantidad adecuada para suministrar en el terreno a cultivar se debe realizar un análisis previo de los parámetros de PH (Potencial de Hidrogeno) y EC (Electro conductividad) los cuales indicaran las características del suelo para una óptima absorción de los nutrientes del fertilizante (Sanadria, Narváez, & Otero, 2021).

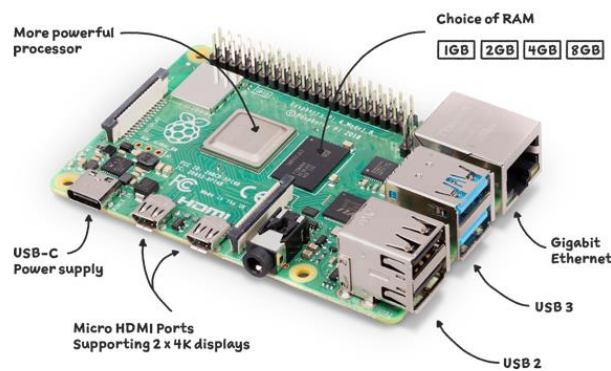
## 2.2 Hardware del sistema de riego

### 2.2.1 Raspberry Pi

La Raspberry Pi es considerada como un microcomputador ya que posee todas las características básicas que una PC tiene como conexión a Internet por medio de Wifi o mediante cable Ethernet, conexión a una pantalla mediante cable HDMI, conexión USB 2.0 para uso de teclado y mouse, el sistema operativo es instalada en una memoria microSD con una capacidad mínima de 8 GB, con una gran memoria RAM y un procesador de alta velocidad. (Caiza, 2018)

Por las características antes descritas la Raspberry Pi es ideal para poder implementar el proyecto ya que, al estar constantemente detectando la señal de los distintos sensores, la activación y desactivación de actuadores, y el envío de información al servidor web Firebase; se necesita una gran capacidad y velocidad de procesamiento de datos.

Figura 1.2.2.1-1 Raspberry Pi 4B



(RaspberryPi, 2022)

### 2.2.2 Convertidor Analógico-Digital MCP3008

Este circuito integrado de 16 pines utiliza un tipo de comunicación SPI con 8 canales los cuales reciben la señal analógica y los envía hacia el microcontrolador. Este dispositivo a diferencia de muchos utiliza 3.3V de alimentación principal. El envío de información es de 10 bits. (Figueroa, Romero, Soto, & Vázquez, 2018)

Figura.2.2.2-1 Circuito integrado MCP3008

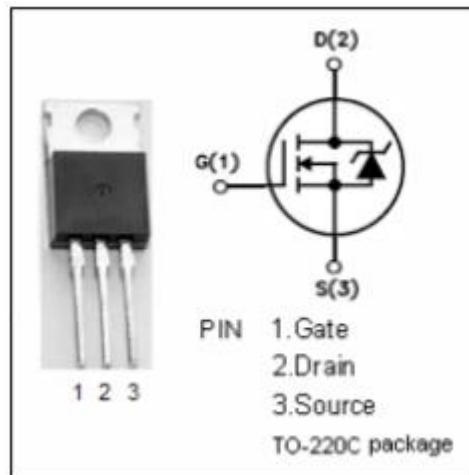


Fuente: (Microchip, 2022)

### 2.2.3 Transistor MOSFET

Un transistor MOSFET (MOS Field-Effect Transistor) es un elemento electrónico semiconductor que ayuda a regular el voltaje de salida a partir de una señal de tensión. Este dispositivo cuenta de tres partes: Drain es la compuerta de entrada del voltaje a regular, Source es el terminal de salida del voltaje y el Gate es por donde se aplicará la tensión a una determinada frecuencia la cual activará y desactivará el paso de voltaje entre el Drain y el Source. (Torres E. , 2021)

Figura.2.2.3-1 Transistor MOSFET



Fuente: (Torres E. , 2021)

## 2.2.4 Relés

Los relés son dispositivos electrónicos los cuales permiten el paso o cierre de voltaje mediante una activación eléctrica. Al recibir una carga eléctrica un electroimán se activa haciendo que el contactor pase de estar NC a NA. (Mamani, 2018)

Estos elementos son utilizados específicamente para poder separar la parte de potencia de la parte de control de un sistema electrónico.

Figura.2.2.4-1 Módulo de ocho relés



Fuente: (Insuasti & Tandazo, 2019)

## 2.2.5 Fuente de alimentación AC –DC 12V 20A

Esta fuente de alimentación funciona con una entrada de voltaje de 110V AC y con una frecuencia de 60Hz. La salida de voltaje es de 12V DC y con una corriente de 20A la cual podrá energizar tanto a la bomba de agua como a las electroválvulas de manera eficiente.

Figura.2.2.5-1 Fuente de alimentación de 12V 20A



Fuente: (Mendoza & Zapata, 2022)

## 2.2.6 Sensores

### 2.2.6.1 Sensor Capacitivo de Humedad de Suelo V2.0

Comúnmente se puede encontrar sensores de humedad de suelo tanto resistivos como capacitivos. Los sensores de humedad de suelo de tipo resistivo no tienen tanto tiempo de vida útil ya que al no tener un recubrimiento puede llegar a oxidarse al estar expuesto al medio ambiente. Además, con la utilización de fertilizantes en los cultivos este sensor podría presentar variaciones en sus lecturas. (Villén, 2016)

Por la información mencionada anteriormente se ha optado por utilizar los sensores de humedad de suelo capacitivo V2.0, que posee 3 pines de conexión: Vcc(5V), GND y el pin de envío de datos analógicos.

Figura.2.2.6.1-1 Sensor capacitivo de humedad de suelo V2.0



Fuente: (Villén, 2016)

### 2.2.6.2 Sensor de Temperatura y Humedad Ambiental DHT22

Este sensor de tipo capacitivo es capaz de detectar la humedad y temperatura del ambiente mediante una comunicación serial lo cual permite que ambas señales de datos se puedan transmitir por el mismo pin. (Sinchigalo, 2022)

Este sensor tiene un rango de lectura de entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $80^{\circ}\text{C}$ , por lo cual es óptimo para poder detectar la presencia de heladas que pueden dañar a los cultivos.

Figura.2.2.6.2-1 Sensor de temperatura y humedad DHT22



Fuente: (Sinchigalo, 2022)

### 2.2.6.3 Sensor de Nivel de Líquido Horizontal

El dispositivo cuenta con dos secciones, la primera es una parte fija la cual posee dos cables los que darán o no continuidad dependiendo de la posición en la que se encuentre la parte

móvil. La segunda parte es una pieza movible la cual se desplazará en sentido vertical dependiendo del nivel de agua, al encontrarse en la parte superior hará que los cables den continuidad haciendo que sea un tipo de alarma ON/OFF. (Benalcázar, 2016)

Figura.2.2.6.3-1 Sensor de nivel de líquido horizontal



Fuente: (Benalcázar, 2016)

## **2.2.7 Actuadores**

### **2.2.7.1 Bomba de agua**

Este elemento está compuesto por un diafragma elaborado de elementos flexibles como el plástico elástico. Cuando este diafragma se contrae provoca que el líquido sea succionado y cuando es flexionado el líquido será expulsado, pero sin regresar por la misma vía por la que entro; de esta manera la bomba de agua se mantiene succionando y sacando el líquido constantemente (Huallpa, 2015). Esta bomba de agua tiene un voltaje de alimentación de 12V, una corriente de 6A, una fuerza de 100psi, un caudal de 5 litros/min y una conexión de ½ pulg.

### **2.2.7.2 Electroválvulas**

También conocido como válvula solenoide, su funcionamiento es el permitir o bloquear el flujo de agua mediante el paso de corriente eléctrica a través de la bobina que subirá o bajará el émbolo de la electroválvula. Esta electroválvula puede ser cerrada mediante un resorte,

gravedad o presión; pero para accionar se necesita energía eléctrica. Estas válvulas sólo tienen dos tipos de estados: abierto y cerrado. (Chicaiza, 2019)

Figura.2.2.7.2-1 Electroválvula de 12V 0.6A



Fuente: (Yasig, 2021)

## 2.3 Sistema de control

### 2.3.1 Lógica Difusa

La lógica difusa intenta imitar el comportamiento humano al momento de tomar decisiones, en el cual el algoritmo analiza la información de entrada y tomará una o más elecciones dependiendo de las funciones de membresía que se encuentren programadas.

Esta información al ser tanto cualitativa como cuantitativa se debe generar límites apropiados para el tipo de información que se maneja tanto de entradas (sensores) como de salidas (actuadores). (Córdoba, Cano, Durán, & Arciniegas, 2016)

A diferencia de la lógica clásica (la cual solo puede tomar valores de 1 lógico y 0 lógico), la lógica difusa puede tomar una amplia cantidad de valores intermedios los cuales darán una respuesta más precisa por parte de las salidas difusas. En la Tabla 3.3.1-1 se compara el tipo de valores lógicos de entrada de un sistema de control de temperatura mediante la lógica clásica y la lógica difusa.



Tabla 3.3.1-1 Comparación de lógica clásica con lógica difusa

Lógica clásica		Lógica difusa	
Clima	Valor lógico	Clima	Valor lógico
Calor	1	Mucho calor	1
		Calor	0.66
Frio	0	Frio	0.33
		Mucho frio	0

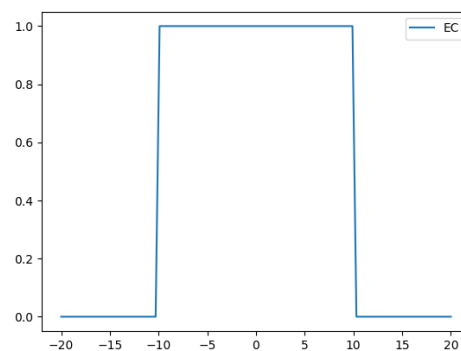
Autor: Christian Bautista

### 2.3.2 Conjuntos Difusos

En base a las entradas y salidas analógicas que se tiene se debe establecer rangos o bloques en los cuales están los valores a considerar para las posibles situaciones que se puedan presentar. Dichos conjuntos pueden ser de forma unitario, triangular, trapezoidal, Gaussiana o sigmoïdal; dependiendo del criterio de programación del usuario. De estos se obtienen las funciones de membresía correspondientes para la fusificación y defusificación. (Córdoba, Cano, Durán, & Arciniegas, 2016)

En la Figura 3.3.2-1 se muestra la gráfica del conjunto difuso unitario la cual entre el rango de -20 a 10 tiene el valor de 0, entre el rango de -10 a 10 tiene el valor de 1, y entre el rango de 10 a 20 tiene el valor de 0.

Figura 3.3.2-1 Conjunto difuso cuadrado

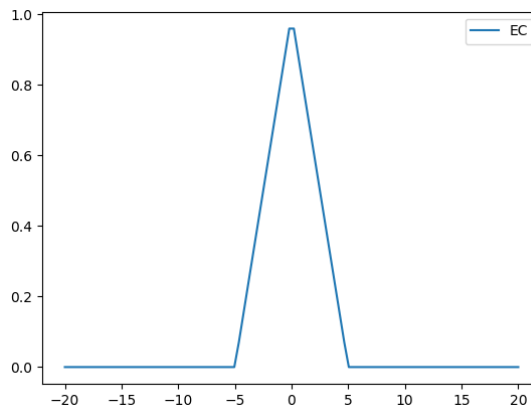


Autor: Christian Bautista

En la Figura 3.3.2-2 se muestra la gráfica del conjunto difuso triangular la cual entre el rango de -20 a 5, y de 5 a 20 tienen el valor de 0, entre el rango de -5 a 0, y de 0 a 5 sus valores son dados por la ecuación Ec 3.3.2-2.

$$\mu(x) = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} * (x - x_1) + y_1 \quad \text{Ec. (3.3.2-2)}$$

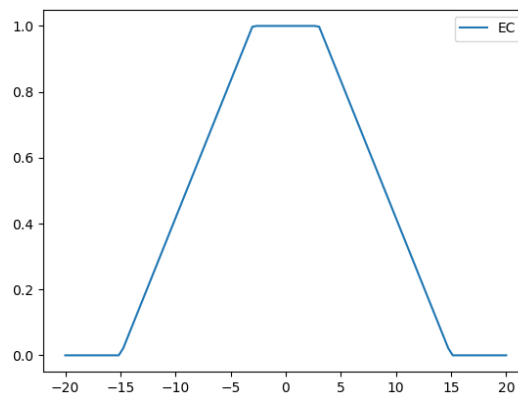
Figura 3.3.2-2 Conjunto difuso triangular



Autor: Christian Bautista

En la Figura 3.3.2-3 se muestra la gráfica del conjunto difuso trapezoidal la cual entre el rango de -20 a 5, y de 5 a 20 tienen el valor de 0, entre el rango de -5 a 5 tiene el valor de 1, entre el rango de -15 a 5, y de 5 a 15 sus valores son dados por la ecuación Ec 3.3.2-2.

Figura 3.3.2-3 Conjunto difuso trapezoidal

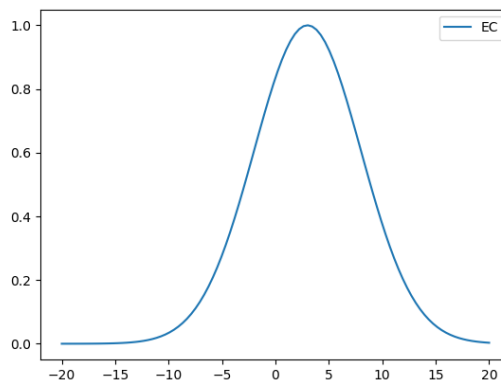


Autor: Christian Bautista

En la Figura 3.3.2-4 se muestra la gráfica del conjunto difuso gaussiana cuyos valores son dados por la ecuación Ec. 3.3.2-4. Donde “b” corresponde al valor de ventana y “c” es el ancho de la función.

$$\mu(y) = \frac{1}{c*\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad \text{Ec. (3.3.2-4)}$$

Figura 3.3.2-4 Conjunto difuso triangular

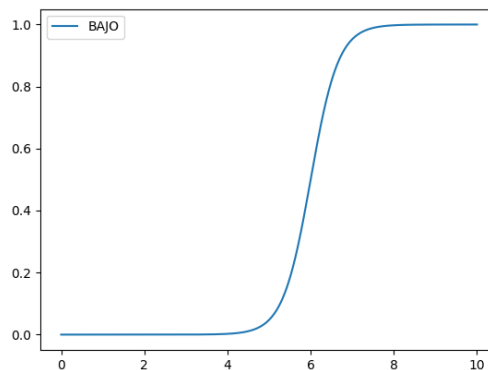


Autor: Christian Bautista

En la Figura 3.3.2-4 se muestra la gráfica del conjunto difuso gaussiana cuyos valores son dados por la ecuación Ec 3.3.2-4. Donde “a” corresponde al valor de amplitud y “c” es el ancho de la función.

$$\mu(y) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad \text{Ec. 3.3.2-4}$$

Figura 3.3.2-5 Conjunto difuso trapezoidal



Autor: Christian Bautista

### **2.3.3 Reglas Difusas**

Una vez establecidos los conjuntos difusos tanto de entradas como de salidas del sistema se debe considerar todas las posibles situaciones que se puedan presentar en las entradas analógicas y en base a ello se activan o desactivan los actuadores conformados de los conjuntos difusos de salida. Para una mejor comprensión de las eventuales situaciones se formula la estructura:

“SI (posibles condiciones 1) AND/OR (posibles condiciones 2) AND/OR ..... (posibles condiciones N) ENTONCES (posibles respuestas 1) AND/OR (posibles respuestas 2) AND/OR ..... (posibles respuestas N)””

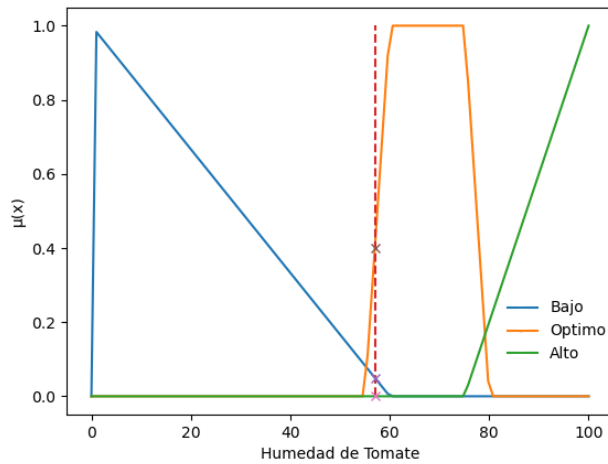
En el caso de la lógica difusa se puede tener una sola variable o elemento de salida, pero nunca puede tener solo una variable o elemento de entrada, deben ser dos o más elementos de entrada para analizar. (Diciembre, 2017)

### **2.3.4 Fusificación**

En este proceso, se da pertenencia a las variables numéricas o lecturas analógicas actuales a su respectivo conjunto o conjuntos difusos de entrada y su función o funciones de membresía correspondiente (Diciembre, 2017). Por lo cual el valor o valores de entrada se convierten en una variable lingüística.

En la Figura 3.3.4-1 se observa como al tener un valor de entrada de humedad de suelo de 57% este pertenece a dos conjuntos de entrada difusos

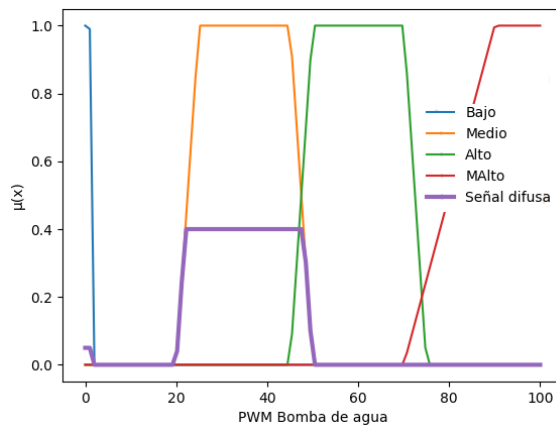
Figura 3.3.4-1 Corte de los conjuntos difusos en base a la entrada analógica



Autor: Christian Bautista

En la Figura 3.3.4-2 se observa la salida difusa final en base a la entrada de analógica del sistema y a la regla difusa establecida, en el caso que sean varios conjuntos de corte resultantes se deben unir todos y formar una salida difusa final.

Figura 3.3.4-2 Salida difusa final del sistema



Autor: Christian Bautista

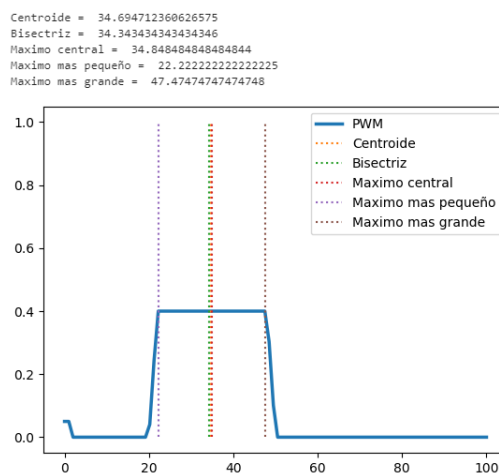
### 2.3.5 Defusificación

El proceso de defusificación es lo contrario al de fusificación ya que consiste en transformar los valores de la salida difusa final a un valor continuo que el actuador pueda procesar

(Diciembre, 2017). Por lo cual se realiza un mapeo de los valores óptimos del conjunto difuso de salida y se da un valor numérico.

En la Figura 3.3.5-1 se observa la salida difusa final con los valores de corte de la señal en base a algunos métodos de defusificación como el método de centroide, bisectriz, máximo centra, máximo más grande y máximo más pequeño.

Figura 3.3.5-1 Salida difusa final del sistema con valores de corte de varios métodos de defusificación



Autor: Christian Bautista

## 2.4 Monitoreo por el usuario

### 2.4.1 IoT

El “Internet de las cosas” es una tendencia la cual día a día va teniendo más relevancia en el mundo ya que ahora la información se almacena, procesa, y envía a cualquier dispositivo con capacidad de conexión a Internet en cualquier parte del planeta. (Barrera, 2018).

Mediante la implementación del IoT se puede controlar y monitorizar remotamente toda clase de implementos electrónicos de control.

En la actualidad existen una gran variedad de servidores online que ayudan a los usuarios poderse conectar con diversos dispositivos electrónicos en el área de la domótica, agrícola, climatológica, industrial, etc. (Rodríguez, A, C, & R, 2017)

### **2.4.2 Servidor Web Firebase**

Esta plataforma fue creada por Google para brindar una forma sencilla de conectar Apps y páginas web con dispositivos microprocesadores electrónicos como Arduino, Raspberrys, PLCs, etc. Entre las funciones más importantes que tiene Firebase están: almacenamientos de archivos, autenticación y base de datos en tiempo real. (Castellote, 2017)

Los datos tanto enviados como recibidos pueden ser de tipo numérico, booleano o string; los cuales pueden ser fácilmente interpretados y utilizados por los microprocesadores y por las interfaces HMI.

### **2.4.3 MIT App Inventor**

Esta herramienta al no contar con un lenguaje propio de programación, sino mediante bloque de conexiones nos facilita el poder estructurar una aplicación de forma sencilla y así prestar mejor atención a la lógica del programa a desarrollar. Estas aplicaciones compatibles con Android pueden crear, enviar, recibir e interpretar información de tipo string, booleano o numérico. También puede emplear elementos multimedia como sonidos, imágenes, videos, etc. (Lugo, 2021)

### **2.4.4 Interfaz Hombre-Maquina (HMI)**

EL HMI fue diseñado para que exista una comunicación entre el operador y la maquina; el usuario puede controlar y monitorear los distintos procesos automáticos en tiempo real mediante una interfaz gráfica con la ayuda de interruptores, pulsadores, imágenes, textos, números etc. (Sacancela, 2018)

#### **2.4.5 Sistema GSM**

Las redes GSM (global System for Mobile communications) es el estándar de comunicación móvil más usado por los teléfonos celulares, la primera generación implementaba tecnología tanto digital como analógica. A partir de la segunda generación (2G) en adelante, la tecnología es en su totalidad digital.

Mediante esta tecnología se puede realizar enlaces a través de transmisión de voz, fax, datos, comunicación por internet y mensajes SMS. (Gonzales, 2016)

#### **2.4.6 Plataforma de envío de mensajes SMS Altiria360.**

Altiria360 es una empresa de mensajería de SMS española la cual permite a empresas y a personas particulares el poder enviar mensajes SMS a dispositivos móviles en distintos países. (Lucas, 2017). Esta plataforma brinda la ayuda de código Python el cual ayudara a enviar los mensajes de alerta del sistema.



## CAPÍTULO 3

### DISEÑO DEL HARDWARE Y SOFTWARE DEL SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE

Para el desarrollo e implementación del sistema de riego inteligente se han analizado las distintas variables de entrada como la humedad de los diferentes tipos de cultivos, la temperatura optima e inadecuada para las plantaciones, el monitoreo de los niveles de reservorio tanto de agua como de fertilizante y las señales automáticas de activación para el riego de fertilizante para las diversas plantaciones. También se controla los actuadores tanto de las diferentes electroválvulas y de la bomba de agua dependiendo de las lecturas registradas en las entradas para lo cual se usará la lógica difusa como control principal.

Para un monitoreo constante del sistema de control y de configuraciones de los parámetros de los cultivos se creó un HMI mediante una aplicación móvil en tiempo real, además de un sistema de alerta vía SMS en el cual se le informara usuario de posibles situaciones que puedan causar daños a nuestros cultivos como niveles bajos en los reservorios y de presencia de heladas.

En la Figura 3.1-1 se observa el proceso general del sistema de riego con el desarrollo de lógica difusa, envío y recepción de información hacia el HMI y el envío de mensajes SMS.

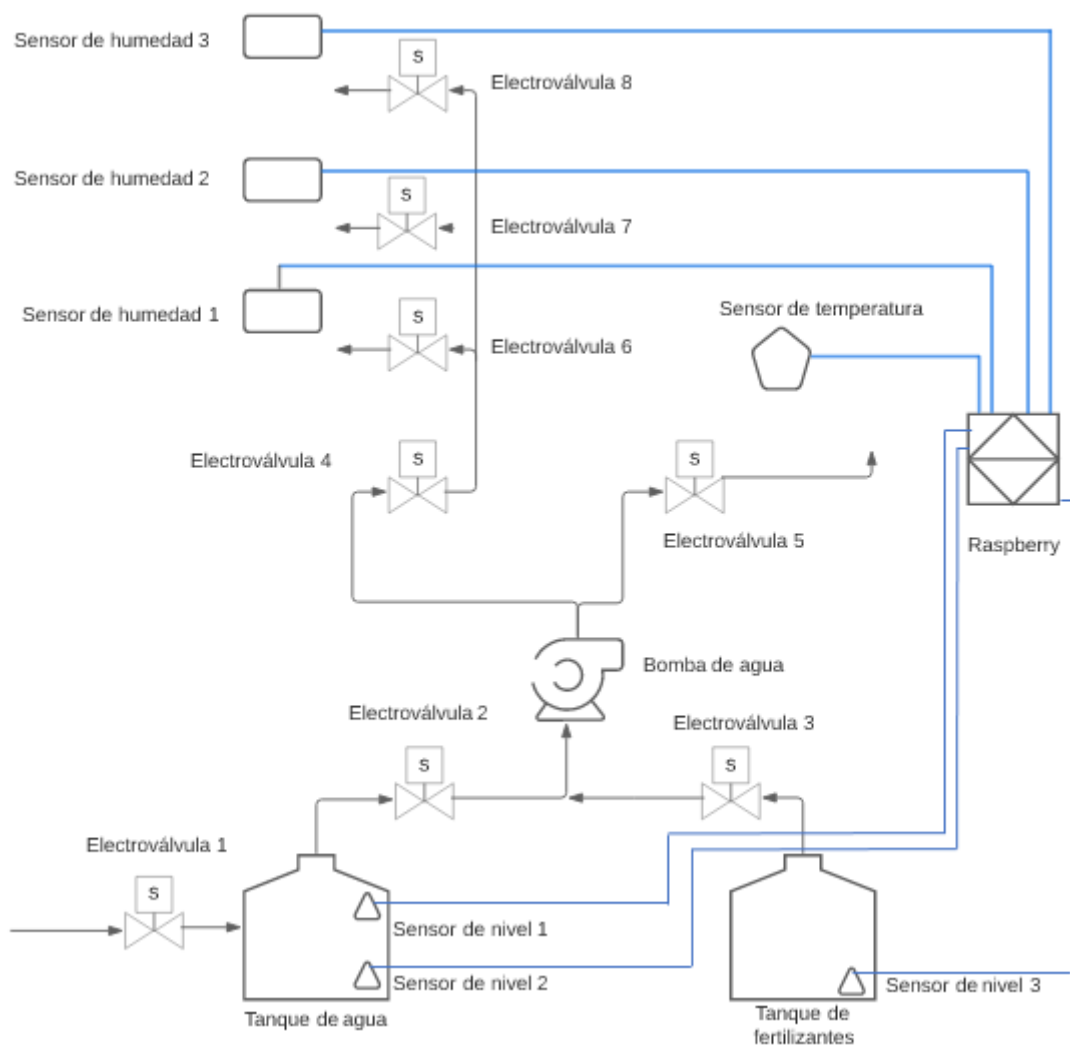
Figura.3.1 - 1 Proceso del sistema de riego inteligente



Autor: Christian Bautista

En la Figura 3.1-2 está el diagrama de PI&D donde se muestra los sensores de humedad de suelo, temperatura ambiental y de nivel; y los actuadores del sistema que son ocho electroválvulas y una bomba de agua; y la dirección de caudal dentro de los tubos de agua. Se utiliza ocho electroválvulas las cuales distribuyen el agua de cada una de las secciones del sistema, se emplea una electroválvula la cual será utilizada tanto para el sistema de riego como para el sistema de fertirrigación,

Figura.3.1 - 2 Diagrama P&ID del sistema de riego



Autor: Christian Bautista

### 3.1 HMI mediante aplicación móvil desarrollada en MIT App Inventor

Para el desarrollo del HMI se utiliza MIT App Inventor ya que posee una manera de programar sencilla al igual que conectarse a Firebase. En cada una de las pantallas se recibe y envía información al sistema de riego para tener una correcta comunicación.

En la pantalla de “Sistema de Riego” se detalla el estado de los sensores de humedad de suelo, del sensor de temperatura ambiental, el PWM de la bomba de agua, estado de las electroválvulas, el tipo de cultivo seleccionado y el estado del sistema de fertilización. En esta pantalla solamente se recibe los datos enviados desde el sistema de riego hacia Firebase y posteriormente a la aplicación móvil.

Figura.3.2-1 Pantalla principal de la interfaz HMI



Autor: Christian Bautista

En la pantalla de “Selección de Cultivo” se podrá seleccionar el tipo de cultivo que se va a plantar en cada una de las secciones del terreno. Al seleccionar cada uno de los cultivos se genera una variable numérica la cual es enviada hacia Firebase y posteriormente al sistema

de riego el cual determinara el tipo de cultivo que corresponde al igual que sus bloques difusos.

Figura.3.2-2 Pantalla de selección de cultivos de la interfaz HMI



Autor: Christian Bautista

En la pantalla de “Configuración de Fertilizante” el usuario podrá seleccionar el día, la hora y el tiempo de activación del sistema de fertirrigación. Para la activación y desactivación automática del sistema de fertirrigación el usuario seleccionara de forma manual el día de la semana, hora y tiempo (S) en el cual cada cultivo desea que sea regado. La aplicación compara el día, hora y minuto entre los seleccionados con usuario y la del sistema, al haber coincidencia enviará una variable numérica durante el tiempo establecido hacia el sistema el cual será analizado por las reglas de inferencia para activar o desactivar las salidas del sistema.

Figura.3.2-3 Pantalla de configuración del sistema de fertirrigación de la interfaz HMI



Autor: Christian Bautista

En la pantalla de “Niveles de Reservorios” el usuario podrá observar el nivel en el que se encuentran los reservorios de agua y de fertilizante. El sistema de riego enviara el estado lógico en el que se encuentra los sensores de nivel de líquido ya sea “High” o “Low” y el HMI determinara si el estado de alarma se encuentra activado o no de los reservorios.

Figura.3.2-4 Pantalla de niveles de reservorios de la interfaz HMI



Autor: Christian Bautista

### 3.2 Envío y recepción de datos mediante Firebase

Los datos seleccionados anteriormente por el usuario son enviados desde la aplicación móvil hacia el servidor web Firebase para su almacenamiento en tiempo real que posteriormente serán enviados al sistema de control para poderlos incluir en el proceso de lógica difusa. Al ser procesada la información por el sistema inteligente, se envía la información hacia el servidor Firebase para que la aplicación pueda recibir dichos datos y mostrarlos al usuario.

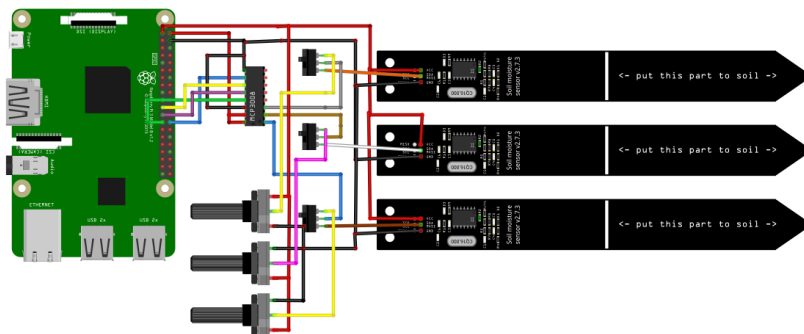
Se utiliza Firebase ya que es una herramienta libre y con una gran velocidad de procesamiento de información da una ayuda eficaz al proceso de envío y recepción de datos, además tiene una gran capacidad de almacenamiento de datos de 1GB y una gran capacidad de procesamiento de información de 100 datos en tiempo real.

### 3.3 Diseño de entradas del sistema

#### 3.3.1 Diseño del sistema de detección de humedad de suelo

Para la implementación y control de prueba del sistema de humedad de suelo se colocó tres sensores de humedad capacitivos de suelo V2.0 los cuales tienen un revestimiento el cual ayuda a evitar la oxidación del sensor, se coloca un sensor en cada una de las secciones de cultivo al igual que potenciómetros los cuales son seleccionados mediante un switch; para poder comprobar un correcto funcionamiento del sistema de riego se usará los potenciómetros para poder colocar las variables de humedad de entrada en distintos valores analógicos. Sabiendo que la RaspberryPi no posee canales de señales analógicas se utiliza el circuito integrado MCP3008 con la instalación de su correspondiente librería.

Figura.3.4.1-1 Conexiones electrónicas del sistema de detección de humedad de suelo

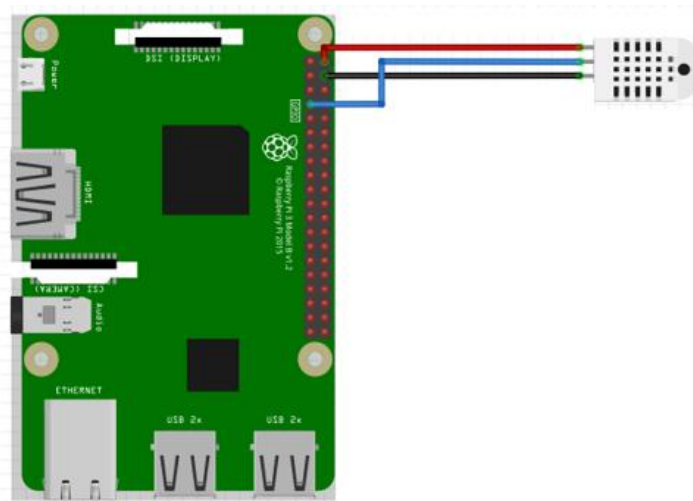


Autor: Christian Bautista

### 3.3.2 Diseño del sistema de detección de heladas

Para la detección de heladas se utiliza el sensor de temperatura y humedad ambiental DHT22 el cual detecta un rango de temperatura entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $80^{\circ}\text{C}$  el cual nos ayuda a la detección de heladas que se producen con temperaturas menores a  $0^{\circ}\text{C}$ .

Figura.3.4.2-1 Conexión del sensor de temperatura y humedad ambiental DHT22



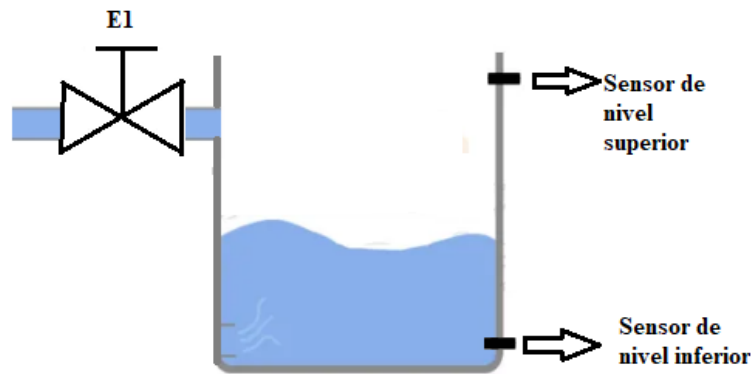
Autor: Christian Bautista

A diferencia de los sensores analógicos de humedad capacitivos V2.0, el sensor DHT22 tiene una librería en Python que se puede instalar y de esta manera se puede utilizar cualquiera de los pines GPIO de la RaspberryPi directamente. El pin GPIO 4 fue el utilizado para la recepción de datos del sensor DHT22.

### 3.3.3 Diseño del sistema de llenado y control de reservorios

Al haber sistema que provee de agua a todos los moradores del sector y sus alrededores, que se activa cada dos o tres días, se ha implementado un sensor de nivel el cual se encuentra en la parte superior del reservorio de agua el cual al estar lleno desactivara la electroválvula E1 como se observa en la Figura 3.3.3-1

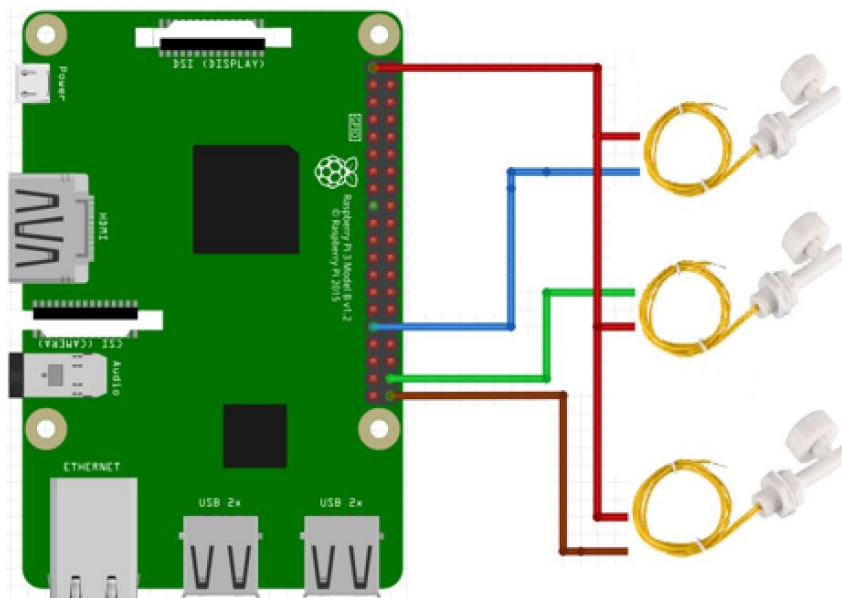
Figura 3.3.3-1 Diagrama del tanque de agua del sistema



Autor: Christian Bautista

De igual forma se implementa un sensor de nivel de líquidos al fondo de cada uno de los reservorios los cuales alertaran al usuario de la falta de agua y fertilizante de cada reservorio.

Figura.3.4.3-1 Conexión de los sensores de nivel de líquido horizontal



Autor: Christian Bautista



Es importante que los sensores de nivel estén conectados a 3.3V DC ya que los puertos GPIO de la RaspberryPi envía y reciben una carga máxima de dicho voltaje. Los pines GPIO de las RaspberryPi utilizados para los sensores de nivel fueron:

Tabla.3.4.3-1 Designación de sensores de nivel de líquidos con sus respectivos pines

Sensor	Pin
Nivel alto del tanque de agua	GPIO 6
Nivel bajo del tanque de agua	GPIO 20
Nivel bajo del tanque de fertilizante	GPIO 21

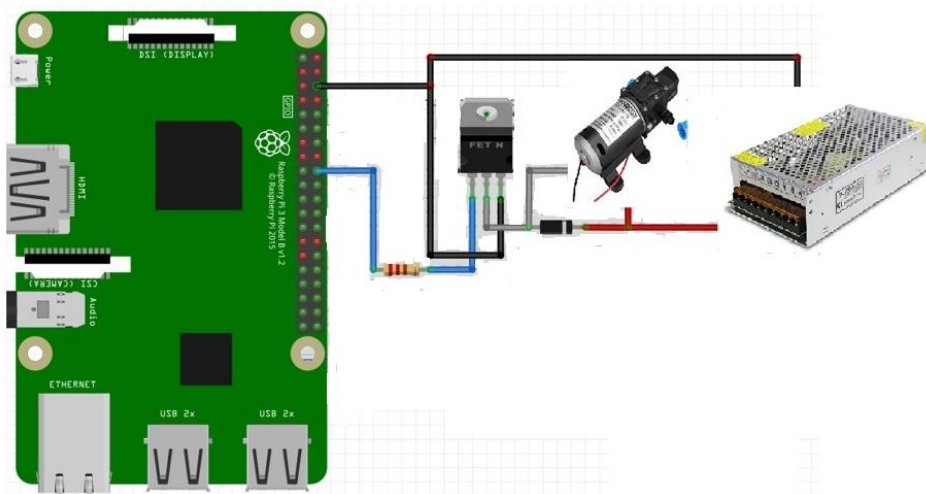
Autor: Christian Bautista

### 3.4 Diseño de salidas del sistema

#### 3.4.1 Diseño del circuito de la bomba de agua

Para poder variar la velocidad de la bomba de agua se ha implementado un circuito de potencia el cual está compuesto de un MOSFET IRFZ44N, una resistencia de 10K  $\Omega$  y un diodo 1N4001. La frecuencia utilizada para el switcheo del MOSFET es de 100Hz. El pin designado para enviar la señal de PWM es el GPIO24.

Figura.3.5.1-1 Conexiones del circuito de potencia de la bomba de agua.



Autor: Christian Bautista

### 3.4.2 Diseño e implementación de las electroválvulas

En el sistema de riego se tiene un total de ocho electroválvulas las cuales tiene un voltaje de funcionamiento de 12v DC y una corriente de 0.6 A. El funcionamiento de cada electroválvula esta detallada a continuación:

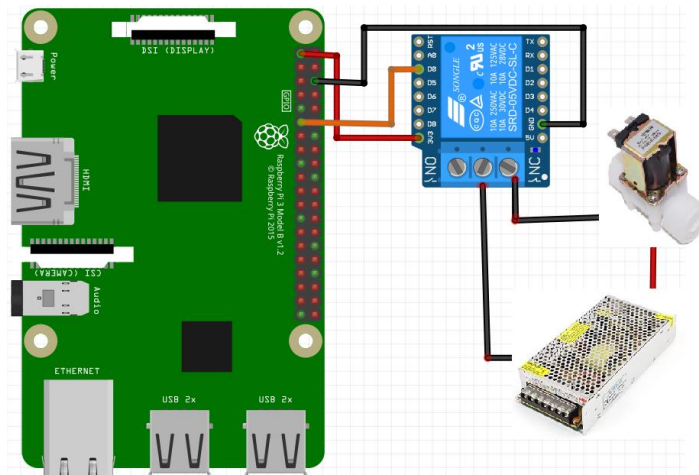
Tabla.3.5.2-1 Función de cada electroválvula en el sistema de riego

<b>Electroválvula</b>	<b>Descripción</b>
Electroválvula 1 (E1)	Válvula del llenado del tanque de agua
Electroválvula 2 (E2)	Válvula del paso del tanque de agua a los cultivos
Electroválvula 3 (E3)	Válvula del paso del tanque de fertilizante a los cultivos
Electroválvula 4 (E4)	Válvula del sistema de riego por goteo
Electroválvula 5 (E5)	Válvula del sistema de riego por aspersión
Electroválvula 6 (E6)	Válvula del cultivo 1
Electroválvula 7 (E7)	Válvula del cultivo 2
Electroválvula 8 (E8)	Válvula del cultivo 3

Autor: Christian Bautista

Cada electroválvula tendrá la siguiente conexión eléctrica:

Figura.3.5.2-1 Conexiones del circuito de potencia de cada electroválvula



Autor: Christian Bautista

Los pines designados para cada electroválvula serán:

Tabla.3.5.2-2 Designación de cada electroválvula con su respectivo pin.

<b>Electroválvula</b>	<b>Pin</b>
Electroválvula 1 (E1)	GPIO 5
Electroválvula 2 (E2)	GPIO 26
Electroválvula 3 (E3)	GPIO 19
Electroválvula 4 (E4)	GPIO 13
Electroválvula 5 (E5)	GPIO 25
Electroválvula 6 (E6)	GPIO 17
Electroválvula 7 (E7)	GPIO 27
Electroválvula 8 (E8)	GPIO 22

Autor: Christian Bautista

## **3.5 Diseño de control inteligente**

### **3.5.1 Diseño del controlador fuzzy**

Ya que se tiene una gran cantidad de entradas analógicas y digitales; al igual que salidas del sistema inteligente se ha optado por la aplicación de lógica difusa para el controlador. También con la lógica difusa se puede analizar todas las posibles situaciones que se puedan presentar en un entorno real analizando la temperatura ambiental, la humedad del suelo y el riego de fertilizantes; para el control de las distintas electroválvulas y la cantidad de caudal impartido por la bomba de agua.

En el terreno abierto donde se implementa el sistema de riego se ha tomado en cuenta siete tipos de variables las cuales son:

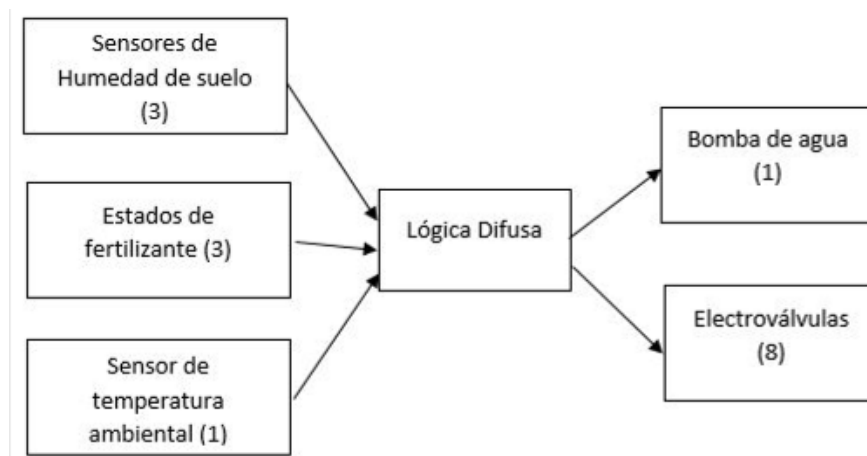
- Temperatura ambiental
- Humedad del cultivo 1
- Humedad del cultivo 2
- Humedad del cultivo 3
- Fertirrigación del cultivo 1
- Fertirrigación del cultivo 2
- Fertirrigación del cultivo 3

El sistema de riego inteligente detecta las temperaturas menores a los 0 °C para activar el sistema de aspersion y regar a las plantas para evitar que se forme una capa de hielo en los cultivos y puedan ser afectados.

Tanto los cultivos como la activación del sistema de fertilizantes son importados desde el servidor de Firebase en tiempo real para poderlos incluir en el proceso de lógica difusa. El controlador determinara los cultivos que han sido seleccionados y establecerá automáticamente los parámetros óptimos previamente ingresados para determinar los conjuntos difusos correspondientes. La activación y desactivación del sistema de fertirrigación de cada cultivo será detecta por el sistema de riego inteligente y enviará un valor numérico el cual será analizado por el sistema de lógica difusa para determinar el estado de los actuadores.

La bomba de agua es controlada mediante una señal de PWM en base a las entradas y reglas de inferencia programadas. Las electroválvulas al solo poseer dos estados lógicos que son encendido y apagado, es decir, no pueden variar de forma gradual el caudal como es el caso de las válvulas motorizadas, sus estados lógicos serán determinados por las reglas de inferencia. En la Figura 3.6.1-1 se muestra el esquema de entradas y salidas del sistema difuso del controlador.

Figura.3.6.1-1 Esquema general del control difuso del sistema de riego.

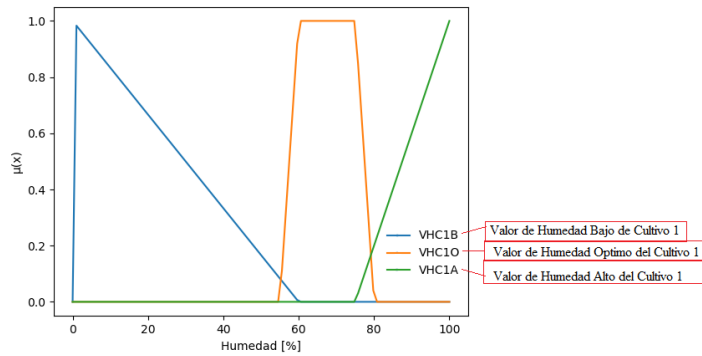


Autor: Christian Bautista

### 3.5.2 Diseño de conjuntos difusos

En el sistema se ha programado tres conjuntos difusos que representan la humedad de cada cultivo los cuales son: Valor de Humedad de Cultivo Bajo (VHC1B), Valor de Humedad de Cultivo Optimo (VHC1O) y Valor de Humedad de Cultivo Alto (VHC1A). El tipo de conjuntos difusos implementados han sido de forma trapezoidal y triangular como se observa en la Figura3.6.2-1. En el conjunto difuso de humedad optima se utilizó un conjunto de tipo trapezoidal ya que es el ideal para determinar un rango en específico con un margen de diferencia de 5%. En el caso de los conjuntos difusos de “Bajo” y “Alto” se implementó un conjunto triangular ya que al alejarse los valores entrada de sus rangos óptimos su pendiente ira creciendo.

Figura.3.6.2-1 Conjuntos difusos de humedad de suelo de los cultivos



Autor: Christian Bautista

Cada tipo de cultivo tiene parámetros de humedad de suelo diferentes los cuales serán detallados a continuación:

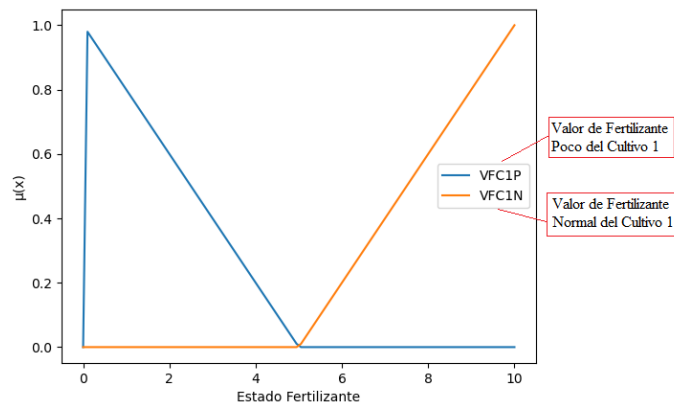
Tabla.3.6.2-1 Rango de humedades de los conjuntos difusos de humedades de suelo

<b>Cultivos</b>	<b>Rango de humedad bajo</b>	<b>Rango de humedad óptimo</b>	<b>Rango de humedad alto</b>
Brócoli	0% - 60%	55% - 80%	75% - 100%
Cebolla	0% - 70%	65% - 85%	80% - 100%
Pepino	0% - 60%	55% - 90%	85% - 100%
Pimiento	0% - 50%	45% - 85%	80% - 100%
Tomate	0% - 60%	55% - 75%	70% - 100%

Autor: Christian Bautista

Para que el sistema de fertirrigación no cree conflicto con el sistema de riego de agua se incluyó en la programación de la lógica difusa. A la hora y fecha indicada por el usuario se activará el sistema fertirrigación enviando un valor numérico hacia el servidor de Firebase y posteriormente enviándolo hacia al controlador (1), y al momento de la desactivación enviará otro valor numérico (9), como se observa en la Figura 3.6.2-2

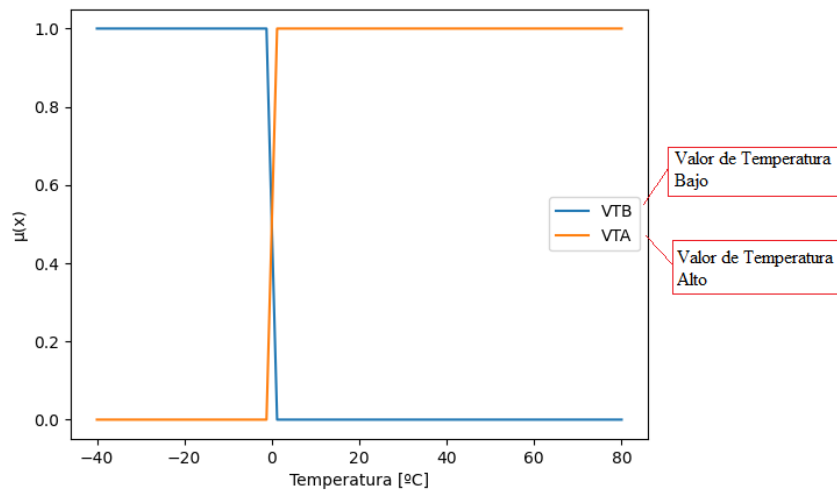
Figura.3.6.2-2 Conjuntos difusos del fertilizante de los cultivos



Autor: Christian Bautista

Para los conjuntos difusos de la entrada de temperatura se tiene como Valor Bajo de Temperatura (VTB) en un rango de  $-40^{\circ}\text{C}$  hasta  $0.1^{\circ}\text{C}$ , y para el Valor Alto de Temperatura (VTA) se estableció un rango entre  $-0.1^{\circ}\text{C}$  hasta  $40^{\circ}\text{C}$ , como se observa en la Figura 3.6.2-3.

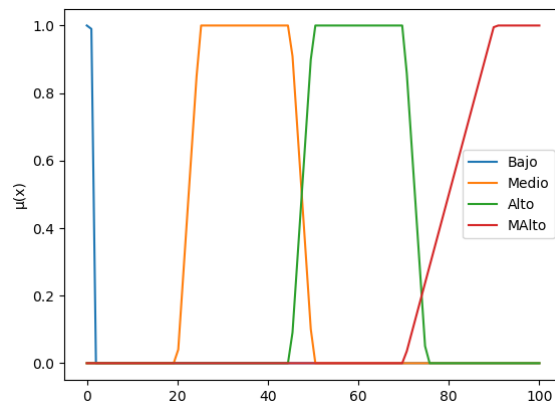
Figura.3.6.2-3. Conjuntos difusos de temperatura ambiental



Autor: Christian Bautista

Para los conjuntos difusos de salida se han creado cuatro bloques que son “Bajo” con un rango de valores entre 0 y 2, “Medio” con un rango de valores entre 20 a 50, “Alto” con un rango de valores entre 45 y 75; y “Muy Alto” con un rango de valores entre 70 y 100, como se observa en la Figura 3.6.2-4.

Figura.3.6.2-4. Conjuntos difusos de la bomba de agua



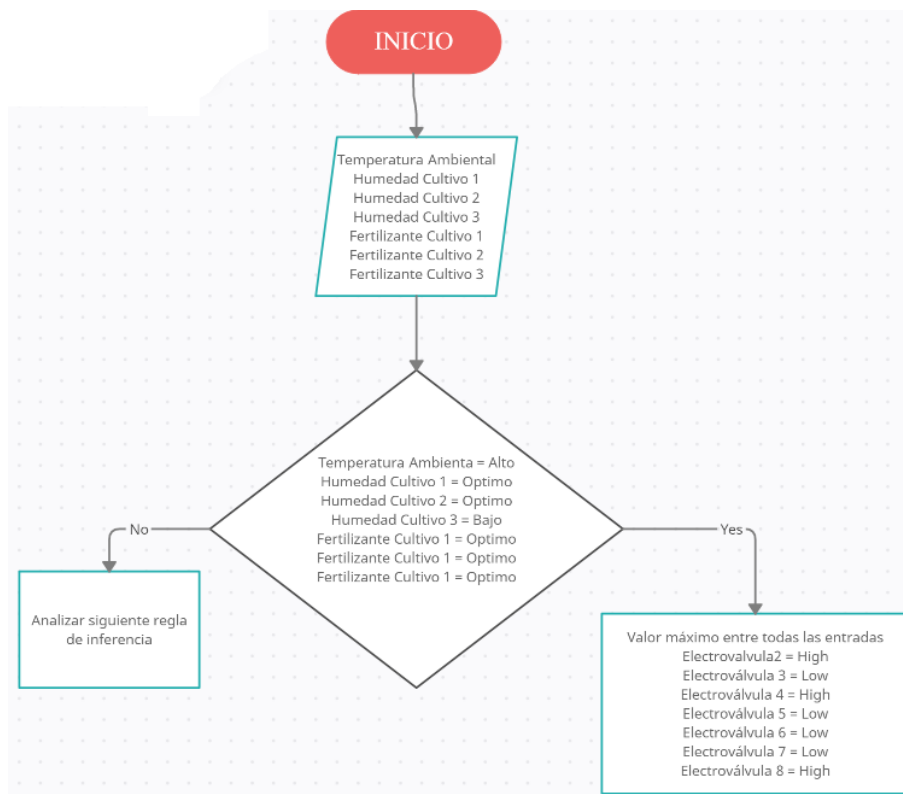
Autor: Christian Bautista

### 3.5.3 Diseño de reglas de inferencia

Para la creación de las reglas de inferencia se ha optado por la forma SI (Temperatura Ambiental) AND (Humedad de cultivo 1) AND (Humedad de cultivo 2) AND (Humedad de cultivo 3) AND (Fertirrigación de cultivo 1) AND (Fertirrigación de cultivo 2) AND (Fertirrigación de cultivo 3) THEN (Estado de la Bomba de agua). Con lo cual se compara que todos los parámetros de entrada coincidan con el bloque difuso programado y que dicha regla pase al proceso de fusificación. En la Figura 3.6.3-1 se observa el diagrama de flujo de la regla 73 de la programación de lógica difusa.



Figura.3.6.3-1 Diagrama de flujo de la regla 76 de las reglas de inferencia



Autor: Christian Bautista

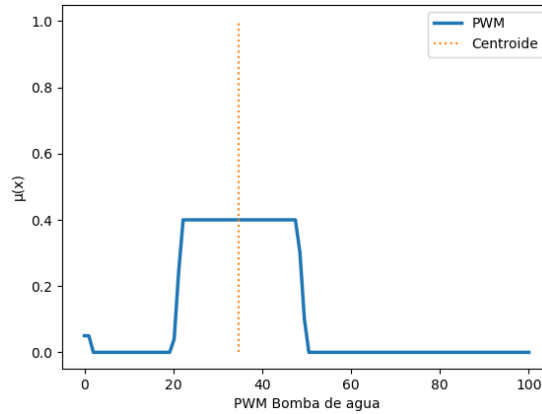
Con esta estructura se han considerado 88 casos posibles que se pueden presentar en un ambiente real en la ubicación donde se lo va a implementar. En cada regla se ha puesto el estado lógico que tendrá cada electroválvula para su situación en particular.

### 3.5.4 Proceso de Fusificación

El controlador al determinar la o las reglas de inferencia que se ejecutan al momento de obtener las lecturas de las entradas a analógicas de temperatura ambiental, humedad de los suelos y estados de los fertilizantes, se obtiene el valor de pertenencia a cada uno de los conjuntos que definen los valores difusos de entrada. Posteriormente se comprobará a que conjunto de salida pertenece y nos dará un valor numérico el cual será el PWM aplicado en la bomba de agua y los estados lógicos de cada una de las electroválvulas del sistema de riego inteligente. Para el proceso de defusificación se utilizó el método del centroide ya que da un valor más aproximado al deseado.

En la Figura 3.5.4-1 se muestra la señal de PWM correspondiente a la regla difusa N°76 teniendo como resultado un PWM de 35% mediante el proceso de defusificación del centroide.

Figura 3.5.4-1 PWM obtenido de la regla de inferencia N°76

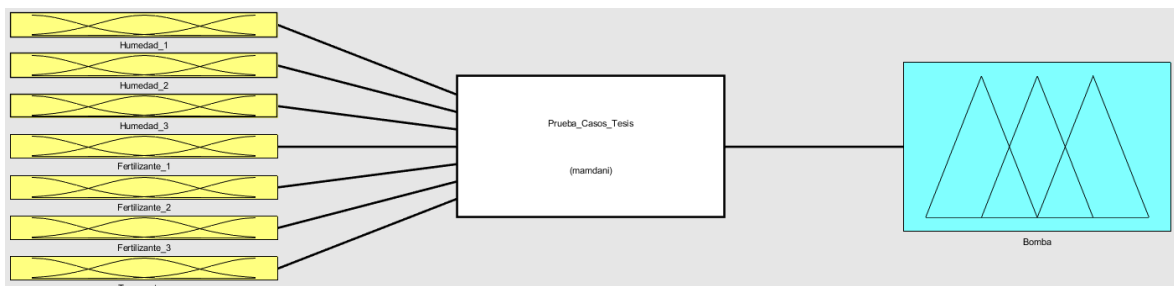


Autor: Christian Bautista

### 3.6 Simulación en MATLAB

Para comprobar que los resultados del PWM de la bomba son los esperados se hizo una simulación en MATLAB con los mismos bloques difusos y reglas de inferencia que nuestro diseño implementado. En la Figura 3.6-1 se observa el diseño del sistema en MATLAB con sus entradas analógicas y digitales; y como salida solo la bomba de agua ya que las electroválvulas se activan de forma digital dependiendo de la regla de inferencia ejecutada en el momento.

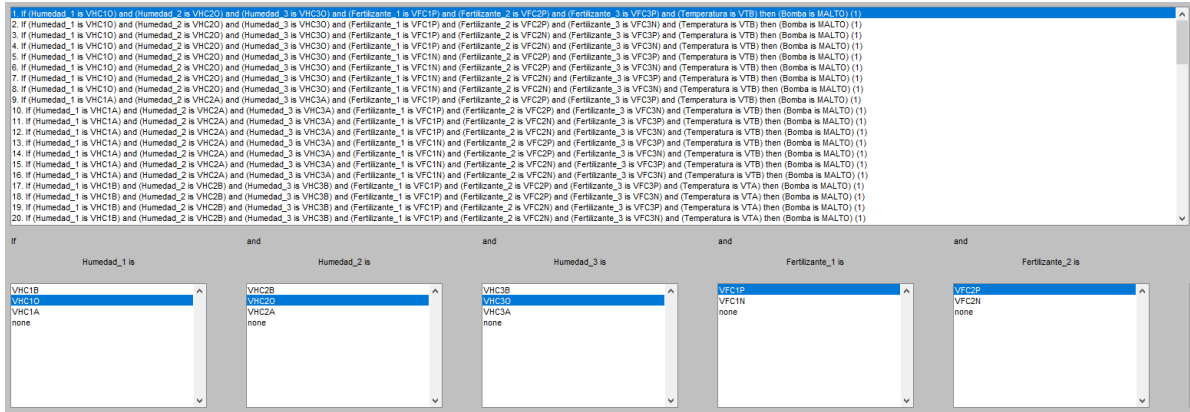
Figura 3.6-1 Diseño de la lógica difusa del sistema simulado en MATLAB



Autor: Christian Bautista

Se programa cada una de las reglas de inferencia con los mismos parámetros que en sistema real como se observa en la Figura 3.6-2.

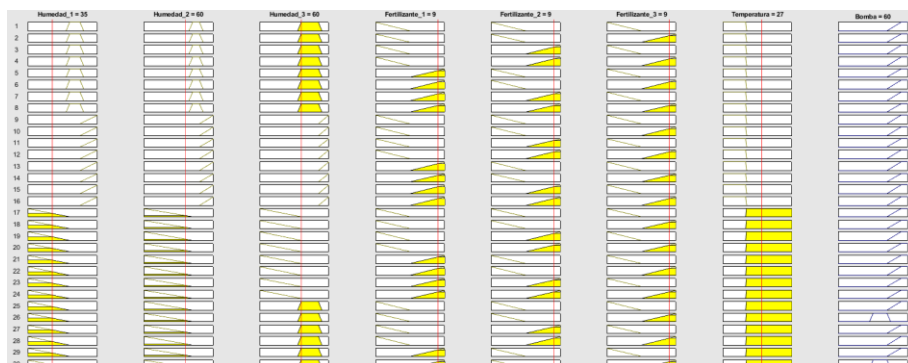
Figura 3.6-2 Creación de las reglas de inferencia del sistema simulado en MATLAB



Autor: Christian Bautista

Para comprobar los distintos casos que se puedan dar en un entorno real se varia las entradas de la simulación y se ve la salida analógica que tendrá el PWM como se observa en la Figura 3.6-3.

Figura 3.6-3 Respuesta del PWM del sistema simulado en MATLAB



Autor: Christian Bautista

## CAPÍTULO 4

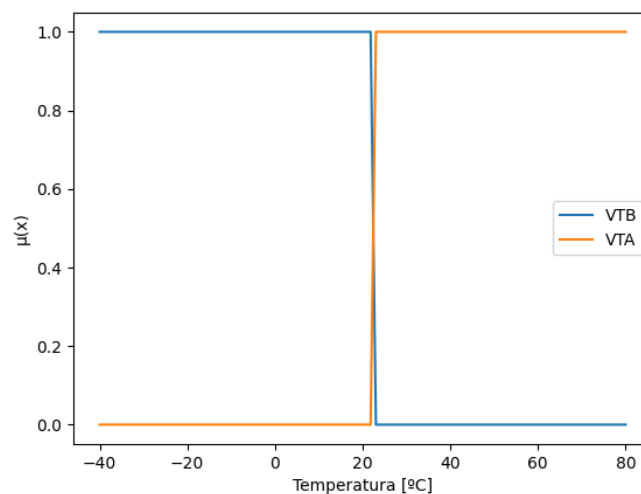
### ANALISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Comparación de la respuesta del sistema simulado y del implementado

Para determinar que el sistema difuso de un resultado eficaz se ha hecho la comparación del resultado final del PWM del sistema con una simulación diseñada en MATLAB, se realizó cinco veces cada una de las siguientes pruebas obteniendo cada vez el mismo resultado de PWM.

Ya que es difícil poder crear un ambiente de prueba de temperatura ambiental por debajo de los 0°C, se ha cambiado los conjuntos difusos de la entrada de temperatura teniendo como resultado:

Figura.4.1-1 Conjuntos difusos de temperatura para realización de prebas



Autor: Christian Bautista

Los rangos considerados de temperatura ambiental para poder realizar pruebas de funcionamiento son: Valor Bajo de Temperatura (VBT) entre -40°C y 22.1°C, y para el Valor Alto de Temperatura se tomó el rango de 21.9°C a 40°C.

En la Tabla 4.1-1 se observa que la selección de cultivos ha sido Brócoli, Cebolla y Pepino; registrando una humedad de suelo de 26%, 73% y 43% respectivamente; como resultado se

tiene nivel bajo de humedad en la plantación de Brócoli y Pepino. Los accionadores de los sistemas de riego de fertilizantes se encuentran apagados y se tiene una temperatura optima de 22.6 °C. Se tiene como resultado un PWM del sistema al igual que del simulado de un 60%.

Tabla.4.1-1 Respuesta del PWM de la bomba de agua (implementado/simulado) - dos humedades bajas y una óptima.

<b>Cultivos</b>	<b>Humedad [%]</b>	<b>Estado de Fertilizante</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>PWM de la Bomba – Sistema [%]</b>	<b>PWM de la Bomba - MATLAB [%]</b>
Brócoli	26	OFF	22.6	60	60
Cebolla	73	OFF			
Pepino	43	OFF			

Autor: Christian Bautista

En la Tabla 4.1-2 se observa que la selección de cultivos ha sido Tomate, Pepino y Pimiento; registrando una humedad de suelo de 89%, 90% y 88% respectivamente, lo cual nos indica que existe un excedente de agua a causa de la lluvia. Los accionadores de los sistemas de riego de fertilizantes se encuentran apagados y se tiene una temperatura baja de 18.8 °C como resultado denota la presencia de heladas. Se tiene como resultado un PWM del sistema de 89% y del simulado de un 88.8%.

Tabla.4.1-2 Respuesta del PWM de la bomba de agua (implementado/simulado) - humedades altas y temperatura baja.

<b>Cultivos</b>	<b>Humedad [%]</b>	<b>Estado de Fertilizante</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>PWM de la Bomba – Sistema [%]</b>	<b>PWM de la Bomba - MATLAB [%]</b>
Tomate	89	OFF	18.8	89	88.8
Pepino	90	OFF			
Pimiento	88	OFF			

Autor: Christian Bautista

En la Tabla 4.1-3 se observa que la selección de cultivos ha sido Brócoli, Pepino y Pimiento; registrando una humedad de suelo de 68%, 70% y 66% respectivamente; como resultado denota un óptimo nivel de humedad de suelo en las tres plantaciones. Dos de los accionadores de los sistemas de riego de fertilizantes se encuentran encendidos y uno apagado; y se tiene una temperatura alta de 23.6 °C. Se tiene como resultado un PWM del sistema de 60% y del simulado de un 60%.

Tabla.4.1-3 Respuesta del PWM de la bomba de agua (implementado/simulado) - todas las humedades optimas y dos fertilizantes activados

<b>Cultivos</b>	<b>Humedad [%]</b>	<b>Estado de Fertilizante</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>PWM de la Bomba – Sistema [%]</b>	<b>PWM de la Bomba - MATLAB [%]</b>
Brócoli	68	OFF	23.6	60	60
Pepino	70	ON			
Pimiento	66	ON			

Autor: Christian Bautista

En la Tabla 4.1-4 se observa que la selección de cultivos ha sido Tomate, Pimiento y Tomate; registrando una humedad de suelo de 68%, 80% y 61% respectivamente; como resultado denota un óptimo nivel de humedad de suelo en las tres plantaciones. Los tres accionadores de los sistemas de riego de fertilizantes se encuentran apagados; y se tiene una temperatura alta de 23.3 °C. Se tiene como resultado un PWM del sistema de 1% y del simulado de un 0.5%.

Tabla.4.1-4 Respuesta del PWM de la bomba de agua (implementado/simulado) - todos los parámetros óptimos

<b>Cultivos</b>	<b>Humedad [%]</b>	<b>Estado de Fertilizante</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>PWM de la Bomba – Sistema [%]</b>	<b>PWM de la Bomba - MATLAB [%]</b>
Tomate	68	OFF	23.3	1	0.5
Pimiento	80	OFF			
Tomate	61	OFF			

Autor: Christian Bautista

Cada prueba fue realizada cinco veces en cada caso en los cuales los parámetros obtenidos en el sistema de riego como en MATLAB son iguales, existe un pequeño margen de error ya que en la programación del sistema se ha redondeado el valor final de PWM para que sea un valor entero. Se puede concluir que el sistema de riego implementado funciona correctamente al igual que la programación de la lógica difusa.

#### **4.2 Tiempo de respuesta entre el sistema y el HMI**

Teniendo en cuenta que el envío de información entre el sistema inteligente y la aplicación móvil es bidireccional, y pasa por un servidor web se pensaría que tomaría varios segundos

en llegar los datos desde el emisor hacia el receptor. Sin embargo, el tiempo de respuesta es casi inmediato, calculando el envío de datos de la aplicación móvil hacia el sistema y desde el sistema nuevamente hacia la aplicación móvil es de 3 segundos. Esta medición fue realizada diez veces mediante un cronometro.

Tabla.4.2-1 Hora de envío y recepción de información entre sistema inteligente y aplicación móvil

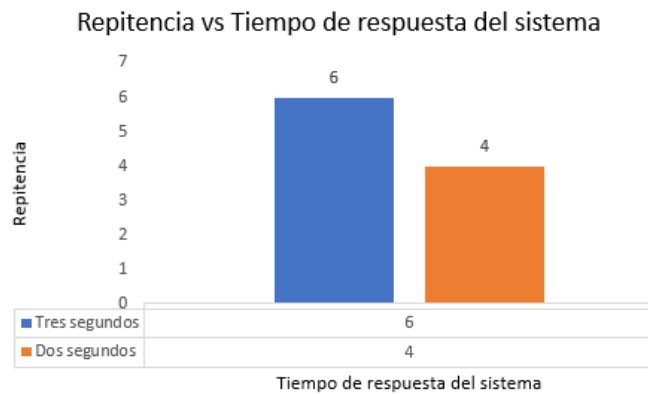
<b>Hora de envío de información del sistema</b>	<b>Hora de llegada de información a la aplicación móvil</b>
20:14:17	20:14:20
20:15:20	20:15:22
20:16:00	20:16:03
20:16:31	20:16:34
20:17:03	20:17:06
20:17:41	20:17:43
20:18:03	20:18:05
20:20:12	20:20:15
20:21:29	20:21:32
20:22:17	20:22:19

Autor: Christian Bautista

En la Figura 4.2-1 se observa la repitencia del tiempo de respuesta analizado previamente teniendo como resultado que la mayor repitencia de tiempo entre envío y recepción de datos es de tres segundos.



Figura.4.2-1 Comparativa entre la repitencia y tiempo de respuesta del sistema



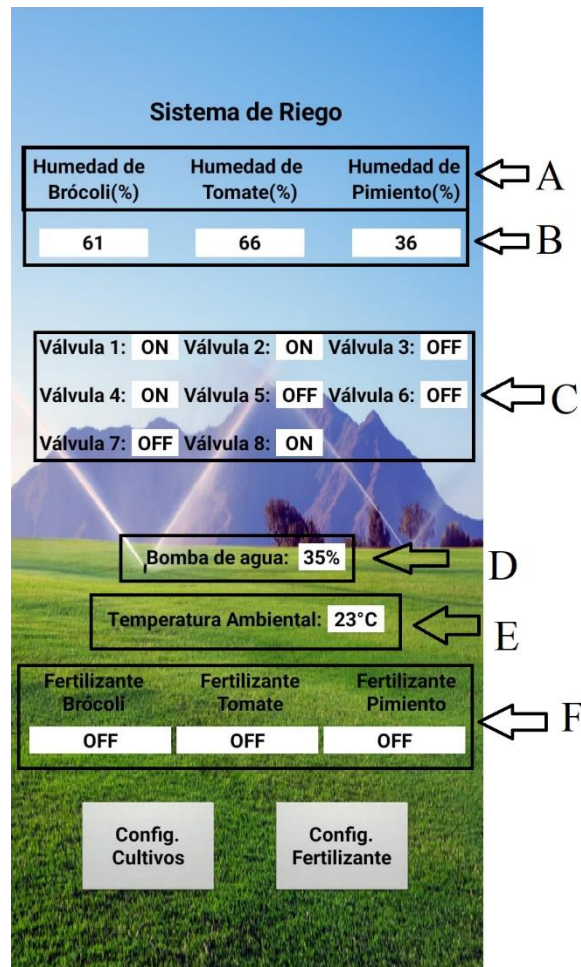
Autor: Christian Bautista

Teniendo en cuenta que no es un proceso crítico que debe tener un tiempo de respuesta instantáneo, el tiempo de tres segundos de respuesta es aceptable para el sistema de riego.

### 4.3 Comparación de respuesta entre sistema implementado y aplicación móvil

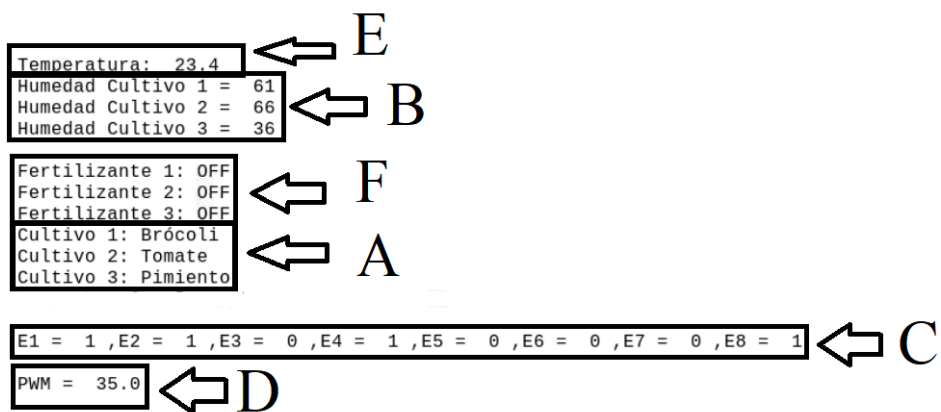
Para determinar que los datos sean iguales tanto en el sistema de riego como en el HMI se comparó la información en diez ocasiones con distintos valores de entrada teniendo como resultado que en todas las pruebas los datos son iguales. Al tener ambos resultados iguales se observa una correcta programación y conexión entre el sistema de riego y el HMI como se ve en la Figura 4.3-1.

Figura.4.3-1A Comparación de lecturas entre sistema inteligente y HMI



Autor: Christian Bautista

Figura.4.3-1B Comparación de lecturas entre sistema inteligente y HMI



Autor: Christian Bautista

Los indicadores de las Figuras 4.3-1 corresponden a las siguientes descripciones:

Tabla.4.3-1 Descripción de los indicadores de la Figura.4.3-1

<b>Indicador</b>	<b>Descripción</b>
A	Tipos de cultivos
B	Lecturas de humedad del suelo
C	Estado de electroválvulas
D	PWM de la bomba de agua
E	Temperatura ambiental
F	Estado de sistemas de fertirrigación

Autor: Christian Bautista

#### 4.4 Funcionalidad del sistema de alerta SMS

Al detectar posibles riesgos para los cultivos como es el caso de presencia de heladas y niveles bajos en los reservorios, los mensajes vía SMS llegan con un retardo aproximado de entre 5 y 7 segundos entre la detección del sensor y la llegada del mensaje a nuestro dispositivo móvil.

Tabla.4.4-1 Hora de activación de sensores digitales y recepción de mensajes SMS

<b>Hora de activación del sensor</b>	<b>Hora de llegada del mensaje SMS</b>
18:04:50	18:04:55
18:06:12	18:06:18
18:06:45	18:06:50
18:10:14	18:10:19
18:11:01	18:11:07
18:12:08	18:12:15
18:12:41	18:12:46
18:15:03	18:15:09
18:15:32	18:15:37
18:17:22	18:17:27

Autor: Christian Bautista

En la Figura 4.4.1 se tiene los mensajes de prueba que se han realizado de las distintas alarmas SMS.

Figura.4.4-1 Recepción de mensajes de alarmas de prueba del sistema



Autor: Christian Bautista

#### 4.5 Comparación de activación de relés con regla de inferencia del sistema

Al momento de registrar las lecturas analógicas de los sensores de humedad de suelo de los distintos cultivos, dicho valor puede pertenecer a dos conjuntos difusos a la vez como es el caso que sea “Bajo” y “Optimo”, u “Optimo” y “Alto”. Por lo cual es indispensable determinar el accionamiento que las electroválvulas tendrán cuando se presenten dichos casos. Para este análisis se ha determinado que los tres cultivos sean de Tomate.

En la Tabla 4.5-1 se registra una humedad de suelo del cultivo 3 de 56%, el cual pertenece al conjunto “Bajo” y al conjunto “Optimo”; teniendo como resultado la selección de la Regla 56 y la Regla 64. Se puede ver que todas las electroválvulas tienen el mismo estado lógico a excepción de la Electroválvula 8, la cual en la regla 56 permanece encendida, mientras que en la regla 64 está apagada. El sistema acciono la electroválvula 8 en estado apagado.

Tabla 4.5-1 Comparación de activación de electroválvulas entre la regla 56 y la regla 64

<b>Regla 56 y Regla 64</b>			
<b>Electroválvulas</b>	<b>Estado de Electroválvulas</b>		
	<b>Regla 56</b>	<b>Regla 64</b>	<b>Estado del sistema</b>
1	OFF	OFF	OFF
2	ON	ON	ON
3	OFF	OFF	OFF
4	ON	ON	ON
5	OFF	OFF	OFF
6	OFF	OFF	OFF
7	ON	ON	ON
8	ON	OFF	OFF

Autor: Christian Bautista

En la Tabla 4.5-2 se registra una humedad de suelo del cultivo 1 de 58%, el cual pertenece al conjunto “Bajo” y al conjunto “Óptimo”; teniendo como resultado la selección de la regla 40 y la regla 72. Se puede ver que todas las electroválvulas tienen el mismo estado lógico a excepción de la Electroválvula 6, la cual en la regla 40 permanece encendida, mientras que en la regla 72 está apagada. El sistema acciono la electroválvula 3 en estado apagado.

Tabla 4.5-2 Comparación de activación de electroválvulas entre la regla 56 y la regla 64

<b>Regla 40 y Regla 72</b>			
<b>Electroválvulas</b>	<b>Estado de Electroválvulas</b>		
	<b>Regla 40</b>	<b>Regla 72</b>	<b>Estado del sistema</b>
1	OFF	OFF	OFF
2	ON	ON	ON
3	OFF	OFF	OFF
4	ON	ON	ON
5	OFF	OFF	OFF
6	ON	OFF	OFF
7	OFF	OFF	OFF
8	ON	ON	ON

Autor: Christian Bautista

En la Tabla 4.5-3 se registra una humedad de suelo del cultivo 3 de 71%, el cual pertenece al conjunto “Bajo” y al conjunto “Óptimo”; teniendo como resultado la selección de la regla 72 y la regla 80. Se puede ver que varias electroválvulas cambian de estado como es el caso

de la electroválvula 2, la electroválvula 4 y la electroválvula 8. El sistema acciono todas las electroválvulas en de la regla 80.

Tabla 4.5-3 Comparación de activación de electroválvulas entre la regla 56 y la regla 64

<b>Regla 72 y Regla 80</b>			
<b>Electroválvulas</b>	<b>Estado de Electroválvulas</b>		
	<b>Regla 72</b>	<b>Regla 80</b>	<b>Estado del Sistema</b>
1	OFF	OFF	OFF
2	ON	OFF	OFF
3	OFF	OFF	OFF
4	ON	OFF	OFF
5	OFF	OFF	OFF
6	OFF	OFF	OFF
7	OFF	OFF	OFF
8	ON	OFF	OFF

Autor: Christian Bautista

Con en análisis anterior se puede concluir que el sistema inteligente activa o desactiva las electroválvulas de acuerdo con la regla de mayor jerarquía lo cual no afecta en el funcionamiento optimo del sistema.

#### **4.6 Cantidad de líquido saliente según cada valor de PWM del sistema**

Para poder determinar la cantidad adecuada de líquido saliente de nuestro sistema, dependiendo del valor de PWM de la bomba, se ha realizado mediciones de la cantidad de líquido saliente en intervalos de tiempo. Se ha tomado intervalos de tiempo entre 4 y 7 segundos con los diferentes valores de PWM de la bomba de agua.

En la Tabla 4.6-1 se realizó las pruebas con un PWM del 35% de la bomba de agua en los intervalos anteriormente mencionados de 4,5,6 y 7 segundos.

Tabla 4.6-1 Pruebas de medición de líquido saliente con un PWM de la bomba de agua del 35%

<b>PWM [%]</b>	<b>Tiempo [s]</b>	<b>Cantidad de líquido [L]</b>
35	4	0.2
	5	0.24
	6	0.3
	7	0.35

Autor: Christian Bautista

En la Tabla 4.6-2 se realizó las pruebas con un PWM del 60% de la bomba de agua en los intervalos anteriormente mencionados de 4,5,6 y 7 segundos.

Tabla 4.6-2 Pruebas de medición de líquido saliente con un PWM de la bomba de agua del 60%

<b>PWM [%]</b>	<b>Tiempo [s]</b>	<b>Cantidad de líquido [L]</b>
60	4	0.34
	5	0.4
	6	0.5
	7	0.6

Autor: Christian Bautista

En la Tabla 4.6-3 se realizó las pruebas con un PWM del 89% de la bomba de agua en los intervalos anteriormente mencionados de 4,5,6 y 7 segundos.

Tabla 4.6-3 Pruebas de medición de líquido saliente con un PWM de la bomba de agua del 89%

<b>PWM [%]</b>	<b>Tiempo [s]</b>	<b>Cantidad de líquido [L]</b>
89	4	0.5
	5	0.6
	6	0.75
	7	0.8

Autor: Christian Bautista

Con el análisis realizado se puede concluir que cada cultivo tendrá 0.05L de agua cada segundo, con lo cual el usuario podrá determinar el tiempo de activación adecuado para el sistema de fertirrigación de cada cultivo.



## CONCLUSIONES

En el presente proyecto se ha logrado diseñar e implementar un sistema de riego inteligente el cual tiene una gran velocidad de respuesta ante las variables externas detectadas, un envío pronto de la información hacia el usuario, y del usuario hacia el dispositivo.

Teniendo en cuenta la gran diversidad de flora de cultivos que se puede generar en la región Sierra del Ecuador, se ha tomado en cuenta cinco tipos de cultivos que son Brócoli, Cebolla, Pepino, Pimiento y Tomate; los cuales con un a previa investigación se han determinado sus valores óptimos de humedad de suelo, temperatura ambiental y fertilizante.

Mediante el uso de la lógica difusa se dio un eficaz control de todas las posibles eventualidades que se puedan dar en un ambiente real y precautelando la durabilidad de los actuadores en especial de las electroválvulas al no someterlas a una gran presión innecesaria.

Tanto en el PWM del sistema como el simulado en MATLAB nos dieron valores con un error de salida menor al 1% lo cual indica que ambos resultados son prácticamente iguales y la respuesta del sistema es la esperada.

El intervalo de tiempo entre enviar y recibir de datos entre la aplicación móvil y el sistema de riego es de 3 segundos lo cual demuestra un monitoreo adecuado a comparación de otros sistemas IoT los cuales demoran más de 15 segundos en realizar el mismo proceso.

Al utilizar la plataforma Altiria360 el periodo de recepción de mensajes es de un promedio de 6 segundos que muestra una respuesta rápida ante eventualidades que puedan poner en riesgo a las plantaciones.

## RECOMENDACIONES

Ya que la RaspberryPi no cuenta con algunas librerías necesarias para algunos tipos de elementos se puede optar por otro tipo de controladores como es el caso del módulo ESP32.

La Raspberry al procesar una gran información tiende a sobrecalentarse por lo cual se debe usar los disipadores y ventiladores necesarios para evitar que sufra averías.

El módulo de relés debe ser alimentado con otra fuente externa ya que podría exigir más corriente de la que la Raspberry podría dar ya que también esta conectados a sus GPIOs varios sensores y actuadores.

La RaspberryPi debe contar con disipadores y ventiladores para evitar un sobrecalentamiento que dae al microprocesador.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Agromatica. (02 de 07 de 2022). *Agromatica*. Obtenido de <https://www.agromatica.es/heladas-en-los-cultivos/>
- Arroyo, C. (2020). *Simulación computacional a microescala del flujo de heladas sobre cultivos de cerezo en la zona central de Chile*. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Barrera, G. (2018). *Estilo arquitectónico para aplicaciones IoT*. Universidad de CEMA, Buenos Aires, Argentina.
- Benalcázar, F. (2016). *Sistema de medición de nivel de agua en piscinas de control en un criadero de peces*. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Caiza, A. (2018). *Implementación de un prototipo domótico para seguridad y control de iluminación de una vivienda utilizando un microcomputador Raspberry Pi 3*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Castellote, M. (2017). *Desarrollo de una aplicación Android de apuestas utilizando Firebase para la sincronización de datos*. Universitat Jaume I, Castellón de la Plana, España.
- Celi, C. (2017). *Diseño, desarrollo e implementación de un sistema adaptativo neuro-difuso aplicado al brazo robot Mitsubishi RV-2AJ con visión artificial, utilizando un controlador basado en procesador ARM*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Chicaiza, O. (2019). *Construcción de un sistema de serigrafía para el estampado de sellos utilizando electroválvulas*. Instituto Tecnológico Superior Vida Nueva, Quito, Ecuador.
- Córdoba, F., Cano, A., Durán, D., & Arciniegas, J. (2016). *Método Computacional para la Identificación de Funciones de Pertenencia en Entornos de Lógica Difusa*. Universidad de Cauca, Popayan, Colombia.
- Diciembre, S. (2017). *Sistemas de Control de Lógica: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK)*. Universitat Jaume, Castello, España.

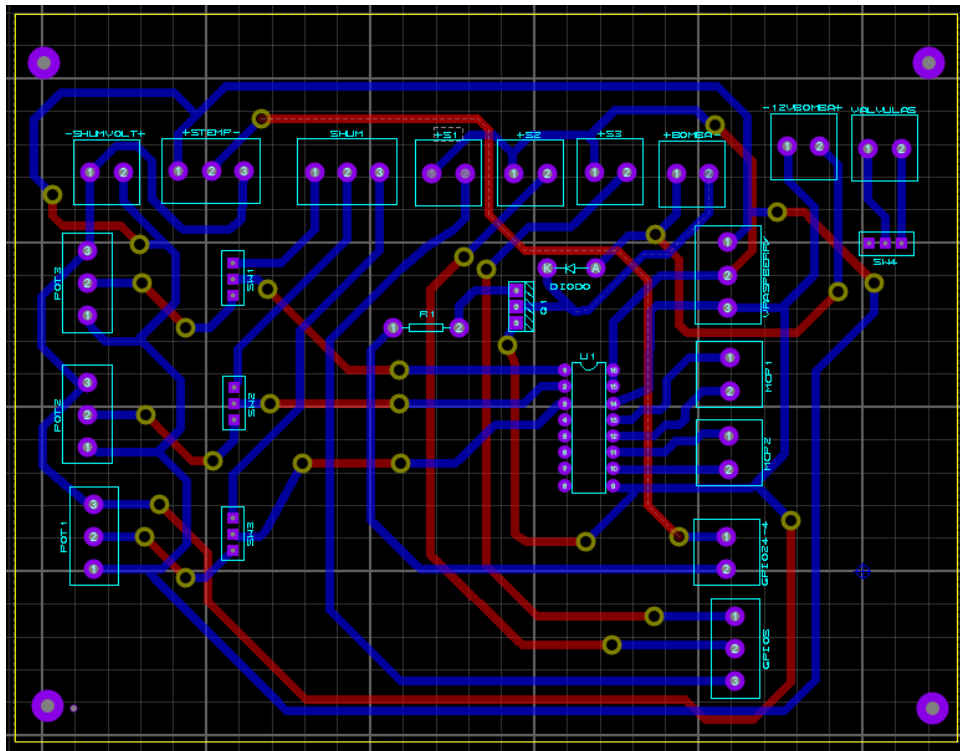
- Enriquez, P. (2014). *Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Catamarca, Argentina.
- Figuerola, J., Romero, M., Soto, M., & Vázquez, M. (2018). *Diseño de un medidos de energía eléctrica bidireccional y monitoreado mediante aplicación móvil*. Revista Iberoamericana de las Ciencias Computacionales e Informáticas, México.
- Fonseca, F., Lordan, J., Rufat, J., Villar, J., & Pascual, M. (2011). *Consideraciones técnicas para la programación de la fertirrigación en cultivos frutales*. Universitat de Lleida, Lleida, España.
- Gonzales, B. (2016). *Sistema de monitoreo de control ambiental para data center con alerta vía GSM*. Universidad San Martín de Porres, Lima, Perú.
- Guijarro, A., Cevallos, L., Preciado, D., & Zambrano, B. (2018). *Sistema de riego automatizado con Arduino*. Revista Espacios.
- Hidrobo, J., da Costa, M., Prat, C., Trujillo, G., Moreno, J., & Ortega, C. (2015). *Sistemas de producción en áreas con cangahua habilitada en la Sierra Norte de Ecuador*. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Huallpa, W. (2015). *Análisis de acoplamiento de una bomba centrífuga y bomba de diafragma a un sistema de fotovoltaicos*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.
- iagua. (02 de 07 de 2022). *iagua*. Obtenido de <https://www.iagua.es/respuestas/como-funciona-riego-aspersion>
- Insuasti, J., & Tandazo, L. (2019). *Desarrollo de una máquina expendedora de dispositivos electrónicos para la ESFOT*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Intagri. (02 de 07 de 2022). *Intagri*. Obtenido de <https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/importancia-de-la-evaluacion-de-la-eficiencia-de-los-sistemas-de-riego>
- Liotta, M. (2015). *Riego por goteo Unidad para el cambio Rural*. Ministerio de Agricultura, Argentina.
- Lucas, M. (2017). *Implementación de una plataforma de mensajería instantánea en la carrera de ingeniería en sistemas computacionales de la universidad estatal de Manabí*. Universidad Estatal del Sur de Manabí, Manabí, Ecuador.

- Lugo, J. (2021). *Algoritmo general para determinar criterios de divisibilidad en cualquier base numérica mediada por el entorno virtual App-Inventor*. Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia.
- Mamani, R. (2018). *Diseño e implementación de una tarjeta electrónica de un sillón adontológico móvil en el Municipio de Pucarani*. Universidad Mayor de San Andrés, Ciudad de La Paz, Bolivia.
- Mendoza, D., & Zapata, J. (2022). *CONTROL RETROALIMENTADO PARA UN SISTEMA DE ATERRIZAJE*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- Microchip. (02 de 07 de 2022). *Microchip technology*. Obtenido de <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP3008#>
- Montalvo, A., & Bajaña, L. (2017). *Comercialización de sistema de riego inteligente basado en sensores y módulo de radio frecuencia para transmisión y sistema de control*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Quito, Ecuador.
- Necpas, W., & J, Q. (2021). *Desarrollo de un dispositivo IoT para el invernadero de la asociación de mujeres productoras agroecológicas de Cangahua*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- Noviembre, G. P. (01 de 07 de 2022). *GAD Parroquial Once de Noviembre*. Obtenido de <https://11denoviembre.gob.ec/cotopaxi/>
- Palomino, C. (2017). *Diseño de sistema de riego por aspersión para el campus de la universidad Cesar Vallejo de la sede Lima Norte*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Parada, J., & Carrillo, J. (2014). *Autorización de sistemas de riego: estrategias de control a través de dispositivos móviles*. Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales.
- Quintero, J., Bravo, M., & Ramírez, A. (2016). *Monitoreo remoto a sistemas de riego por bombeo eléctrico a cultivos de arroz en el departamento del Huila*. Revista Ingeniería y Región.
- RaspberryPi. (02 de 07 de 2022). *RaspberryPi*. Obtenido de <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

- Rodríguez, J., A, L., C, V., & R, F. (2017). *Sistema de monitoreo y control remoto usando IOT para un regulador de presión*. Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia.
- Sacancela, M. (2018). *Sistema de supervisión de las compuertas del trasvase de la central hidroeléctrica Cumbayá mediante interfaz HMI*. Universidad Tecnológica Israel, Quito, Ecuador.
- Salgado, S., Castelán, M., M, A., C, O., L, O., L, L., . . . S, C. (2014). *Validación de dosis generadas por el sistema de fertilización SIRDF para caña de azúcar*. Colegio de Postgraduados, Veracruz, México.
- Sanadria, A., Narváez, F., & Otero, A. (2021). *Evaluación del sistema de fertirrigación superficial y subsuperficial en el Cultivo de Caña de azúcar (Saccharum officinarum) en un Molisol del departamento del Valle del Cauca*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Pasto, Colombia.
- Sinchigalo, A. (2022). *Sistema de adquisición de variables climáticas para invernaderos: Sistema embebido*. Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.
- Torres, E. (2021). *Comparación de la eficiencia de los semiconductores Carburo de Silicio (SiC) y Nitruro de Galio (GaN) para transistores de potencia MOSFET, a través del diseño e implementación de un convertor DC-AC*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Torres, J. (2012). *Diseño de un sistema de irrigación automatizado para policultivos*. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
- Villén, J. (2016). *Diseño e implementación de red telemática de sensores inalámbricos para optimización de riego*. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Yasig, G. (2021). *Implementación de un sistema automatizado de riego por aspersión utilizando arduino para las áreas verdes y jardines del barrio "Valle Hermoso" ubicado en el cantón Mejía*. Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, Ecuador.

## ANEXOS

### Anexo 1. Diseño PCB del circuito de sistema de riego



Autor: Christian Bautista

### Anexo 2. Fases y riego de fertilizante en cultivos de tomate

Fase	Duración (días)	ET <sub>0</sub> (mm)	ET <sub>c</sub> (mm)	Dosis de riego diaria (mm) <sup>1,2</sup>
Reposo	130	135	0	0
Fase I	60	200	120	2,2
Fase II	40	180	160	4,4
Fase III	50	240	220	5,1
Poscosecha	85	240	150	2,2

<sup>1</sup> Considerando una eficiencia del sistema de riego del 90%

<sup>2</sup> Una lámina de riego de 1 mm es igual a 10 m<sup>3</sup> de agua ha<sup>-1</sup>