

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica,

Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica



Diseño e implementación de un sistema de control basado en Arduino para la automatización de invernaderos orientados a la agricultura familiar

Tesis presentada por el Bachiller:

Reyes Luján Gheresi, Bryan Anthony

ORCID: 0009-0009-8023-4889

para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecatrónico**

Asesor:

Doctor Siles Nates, Fernando David

ORCID: 0000-0002-7732-6012

Arequipa – Perú

2024

DICTAMEN APROBATORIO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 28 de Mayo del 2024

Dictamen: 009586-C-EPIMMEM-2024

Visto el borrador del expediente 009586, presentado por:

2015221151 - REYES LUJAN GHERSI BRYAN ANTHONY

Titulado:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL BASADO EN ARDUINO PARA LA AUTOMATIZACION DE INVERNADEROS ORIENTADOS A LA AGRICULTURA FAMILIAR

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO MECATRÓNICO

29592341 - MESTAS RAMOS SERGIO ORLANDO
DICTAMINADOR



40302702 - QUISPE CCACHUCO MARCELO JAIME
DICTAMINADOR



29277716 - CUADROS MACHUCA JUAN CARLOS
DICTAMINADOR



Diseño e implementación de un sistema de control basado en Arduino para la automatización de invernaderos orientados a la agricultura familiar

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.irrometer.com Fuente de Internet	<1 %
2	repositorio.uan.edu.co Fuente de Internet	<1 %
3	Submitted to Arts, Sciences & Technology University In Lebanon Trabajo del estudiante	<1 %
4	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
5	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	<1 %
6	www.todomicro.com.ar Fuente de Internet	<1 %
7	prezi.com Fuente de Internet	<1 %



DEDICATORIA

A mi padre, por enseñarme el camino de la perseverancia y disciplina, por haberme apoyado en los momentos más difíciles y ser mi modelo a seguir, por todo el cariño y comprensión que me brindaste a lo largo de los años.

AGRADECIMIENTO

A mis padres y familiares, por el apoyo absoluto y constante y por creer en mí.

A ustedes, que son la fuente de mi inspiración y el pilar en mi vida. Su amor incondicional, apoyo constante y confianza me han impulsado a perseguir mis sueños y alcanzar este objetivo.

Agradezco de corazón los sacrificios que han hecho para brindarme la mejor educación y las oportunidades que me han permitido llegar hasta aquí. Su dedicación y esfuerzo me han enseñado el valor de la perseverancia, la disciplina y el trabajo duro

RESUMEN

Los invernaderos son un método de cultivo en el que se aprovecha al máximo el espacio y rendimiento de un cultivo. Para las personas que basan su economía en la agricultura familiar, un invernadero supone una fuente extra de ingresos, pero en la mayoría de los casos el manejo de estos es enteramente manual, por lo que no se aprovecha al máximo las ventajas de este tipo de cultivo. Cuando un agricultor familiar quiere automatizar su cultivo se encuentra que los costos de implementar un sistema de control son muy altos, debido principalmente por el controlador y la red de sensores.

Este proyecto tuvo como objetivo diseñar e implementar un controlador basado en la placa Arduino que imite el comportamiento de las entradas y salidas digitales discretas un PLC industrial para pilotar una red de control con elementos económicos y de fácil acceso al mercado local.

La implementación de este sistema de control basado en Arduino demostró que, mediante el refuerzo de la placa con elementos de protección, es posible controlar el cultivo en un invernadero orientado a la agricultura familiar. Se identificó, además, una reducción considerable del tiempo que se debe dedicar al cultivo, por otro lado, la inversión económica para este sistema fue de S/. 1354.10 que comparado con un sistema industrial básico que tiene un costo base de S/. 4019 supone un ahorro considerable por lo que se concluye que es viable implementar este sistema de control y es una alternativa a un PLC industrial.

En el Capítulo I, se detalla la problemática de la investigación, la cual consiste en el planteamiento del problema, objetivos, interrogantes, justificación, alcances, limitaciones, antecedentes, hipótesis y variables de investigación.

En el Capítulo II, se describe el marco teórico con todos los conocimientos requeridos para el desarrollo de la investigación como definiciones de agricultura familiar, cultivos en invernadero, parámetros de control de cultivo, elementos de un sistema de control, etc.

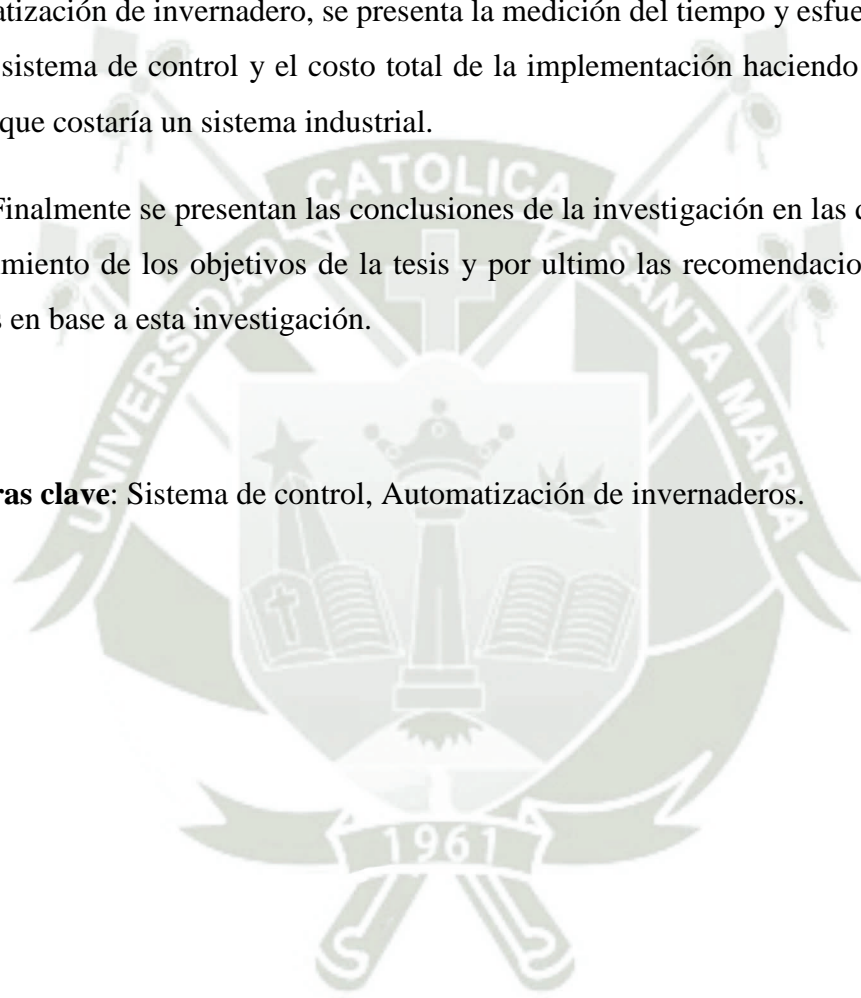
En el Capítulo III, se presenta el desarrollo del diseño e implementación del sistema de control, el cual consiste en la selección de la estrategia de control, selección del núcleo del controlador, diseño del controlador con todos los circuitos de protección, selección de

los sensores de humedad ambiental, temperatura ambiental y humedad de suelo; integración de la red de sensores y actuadores al controlador con sus respectivos diagramas de circuitos de control y fuerza, implementación de la estrategia de control mediante programación del controlador y puesta en marcha del sistema en el invernadero.

En el Capítulo IV, se presentan los resultados de la investigación en los que se describe el funcionamiento del sistema implementado, el comportamiento del cultivo con la automatización de invernadero, se presenta la medición del tiempo y esfuerzo que se ahorra con el sistema de control y el costo total de la implementación haciendo una comparativa con lo que costaría un sistema industrial.

Finalmente se presentan las conclusiones de la investigación en las que comprueba el cumplimiento de los objetivos de la tesis y por último las recomendaciones para trabajos futuros en base a esta investigación.

Palabras clave: Sistema de control, Automatización de invernaderos.



ABSTRACT

Greenhouses are a method of cultivation in which the space and yield of a crop can reach the maximum of productivity. For people who base their economy on family farming, a greenhouse is an extra source of income, but in most cases the management of these is entirely manual, so the advantages of this type of farming are not taken of. When a family farmer wants to automate his crop, he finds that the costs of implementing a control system are very high, mainly due to the controller and the sensor network.

This project aimed to design and implement a controller based on the Arduino board that mimics the behavior of discrete digital inputs and outputs, of an industrial PLC to command a control network with cheap elements and easy access to the local market.

The implementation of this Arduino-based control system demonstrated that, by strengthen the board with protection elements, it is possible to control the crop in a greenhouse oriented to family farming. A considerable reduction in the time that must be dedicated to cultivation was also identified, on the other hand, the economic investment for this system was S/. 1354.10 which, compared to a basic industrial system that has a base cost of S/. 4019, represents a considerable saving, so it is concluded that it is feasible to implement this control system and is an alternative to an industrial PLC.

In Chapter I, the research problem is detailed, which consists of the problem statement, objectives, questions, justification, scope, limitations, background, hypothesis and research variables.

In Chapter II, the theoretical framework is described with all the knowledge required for the development of the research such as definitions of family farming, greenhouse crops, crop control parameters, elements of a control system, etc.

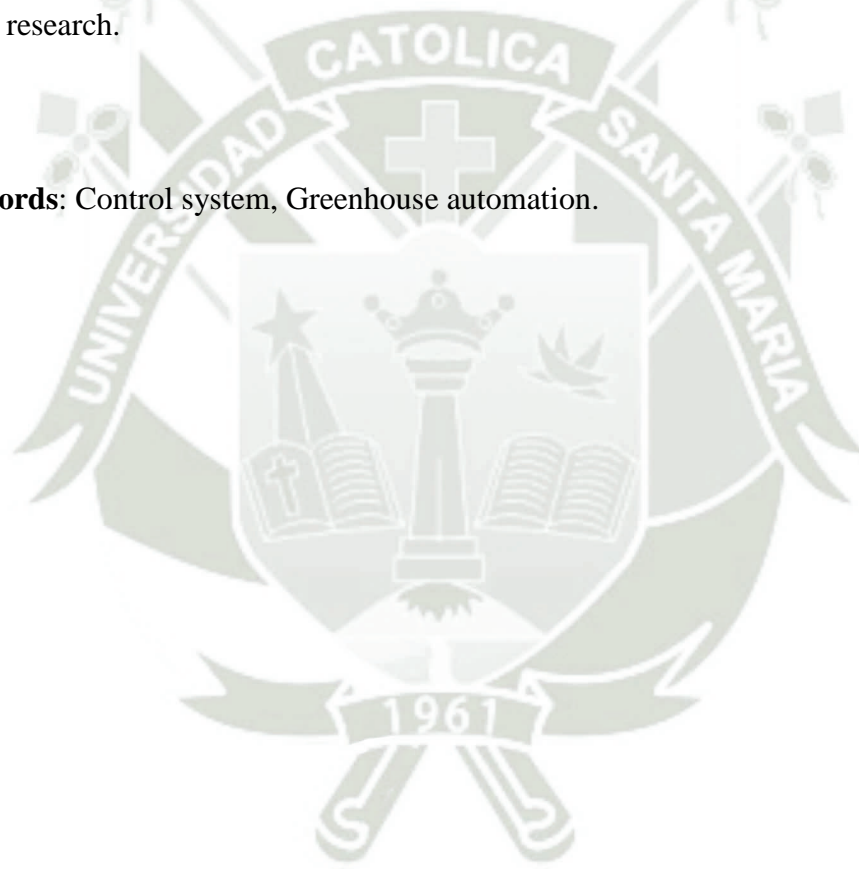
In Chapter III, the development of the design and implementation of the control system is presented, which consists of the selection of the control strategy, selection of the controller core, design of the controller with all the protection circuits, selection of the sensors of environment humidity, environment temperature and soil moisture; integration of the network of sensors and actuators to the controller with their respective control and force

circuit diagrams, implementation of the control strategy by programming the controller and commissioning of the system in the greenhouse.

In Chapter IV, the results of the research are presented, describing the operation of the implemented system, the behavior of the crop with greenhouse automation, the measurement of the time and effort saved with the control system and the total cost of the implementation, making a comparison with what an industrial system would cost.

Finally, the conclusions of the research are presented, in which the fulfillment of the objectives of the thesis is verified, and finally the recommendations for future work based on this research.

Key words: Control system, Greenhouse automation.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE GENERAL.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Descripción del problema	3
1.1.1. Enunciado del problema.....	3
1.1.2. Formulación del problema.....	4
1.2. Interrogantes.....	4
1.2.1. Interrogante principal	4
1.2.2. Interrogantes específicas.....	5
1.3. Área del conocimiento	5
1.4. Variables	6
1.4.1. Variable Independiente.....	6
1.4.2. Variable Dependiente	6
1.5. Justificación.....	6
1.5.1. Justificación social.....	6
1.5.2. Justificación técnica.....	6
1.6. Objetivos de la investigación	7
1.6.1. Objetivo general	7

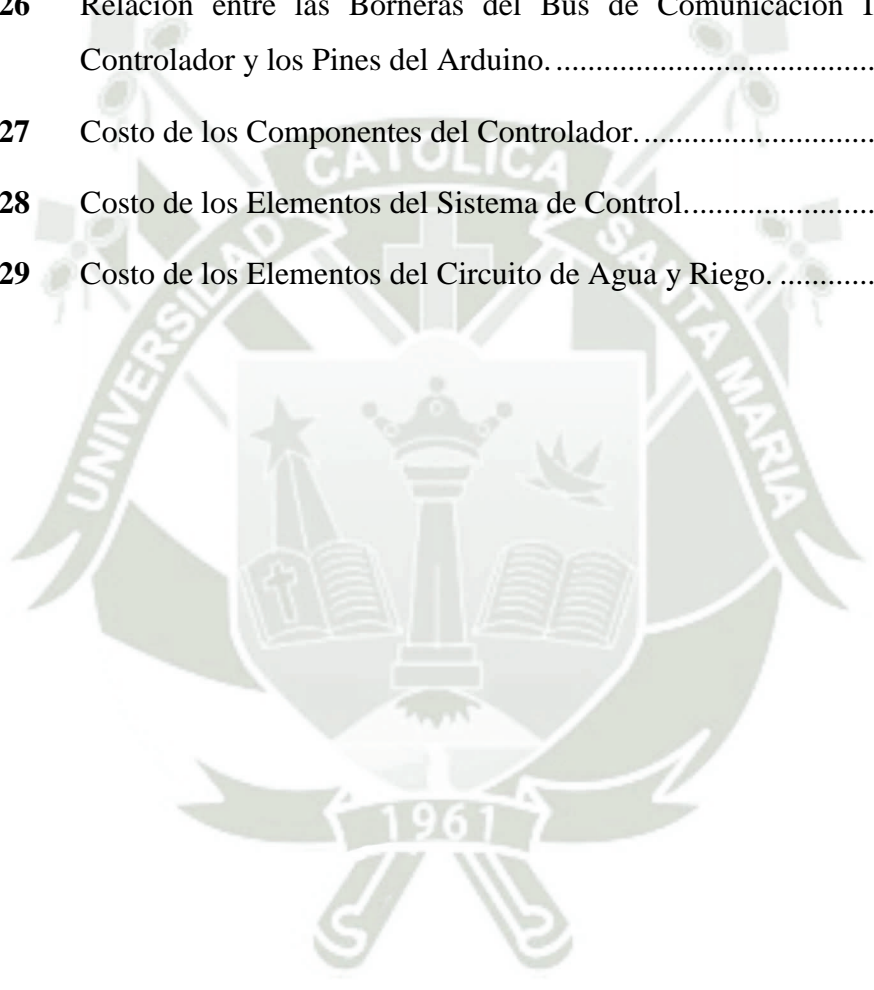
1.6.2. Objetivos específicos	7
1.7. Hipótesis.....	8
1.8. Alcances	8
1.9. Limitaciones.....	9
1.10. Antecedentes	10
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	13
2.1. Agricultura familiar en el Perú.....	13
2.2. Cultivo bajo invernadero.....	15
2.2.1. Estado de los cultivos bajo invernadero en el Perú	17
2.3. Automatización de cultivos bajo invernadero.....	19
2.3.1. Principales parámetros que inciden en la automatización de un invernadero.....	22
2.4. Sistemas de control orientados a los invernaderos.....	32
2.4.1. Sistema de control automatizado	32
2.4.2. Elementos de un sistema de invernadero.....	34
2.4.3. Circuitos de mando y de potencia	79
2.5. Estrategias de control comúnmente utilizadas en control de invernaderos.....	80
2.5.1. Control Todo o nada (on/ off)	81
2.5.2. Control PID	83
2.5.3. Lógica difusa	85
2.6. Análisis de las condiciones de cultivo del invernadero testigo.....	87
2.6.1. Tipo de cultivo que se llevara.....	87
2.6.2. Tiempo diario que se le dedica.....	88
2.7. Costo de implementación de un sistema de control estándar.....	89
CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	93
3.1. Consideraciones previas para el diseño del sistema.....	93
3.2. Selección del controlador	95
3.3. Parámetros de control para el cultivo	97
3.4. Selección de sensores	99
3.5. Selección de la estrategia de control	102

3.6. Diseño del módulo de control	104
3.6.1. Alimentación	105
3.6.2. Entradas digitales.....	108
3.6.3. Salidas digitales	112
3.6.4. Diseño e implementación de las placas PCB del controlador	116
3.7. Implementación del tablero eléctrico	126
3.7.1. Circuito de Mando	128
3.7.2. Circuito de Potencia	129
3.8. Diseño de código para el sistema de control.....	130
3.8.1. Diagrama de flujo	130
3.8.2. Codificación	131
CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS.....	137
4.1. Funcionamiento del controlador	137
4.2. Funcionamiento del sistema de control.....	139
4.3. Respuesta del cultivo al sistema implementado.....	145
4.4. Análisis de las condiciones operativas del invernadero antes y después de la automatización.....	148
4.5. Análisis del costo de implementación y comparación con un sistema industrial	149
CONCLUSIONES	152
RECOMENDACIONES	154
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155
ANEXOS	160

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Características del PLC SIEMENS S7-120044
Tabla 2	Características del Sistema HortiMax-Go! de Ridder.....46
Tabla 3	Características del Controlador Commander EVO Gold de Irritec.....49
Tabla 4	Características del Arduino MEGA 256051
Tabla 5	Características de la Raspberry Pi 454
Tabla 6	Características de la ESP32 DEVKIT V156
Tabla 7	Características de una RTD Pt10059
Tabla 8	Características de un Termistor NTC61
Tabla 9	Características de una Termocupla tipo T62
Tabla 10	Características del sensor de temperatura LM35D64
Tabla 11	Características del sensor de temperatura DS18B20.....65
Tabla 12	Características del sensor DHT2267
Tabla 13	Características del sensor MTH10069
Tabla 14	Características del sensor Thies CLIMA 1.1005.54.24170
Tabla 15	Características del sensor HS110171
Tabla 16	Características del sensor de humedad DHT22.....72
Tabla 17	Características del sensor WATERMARK – MODELO 200SS74
Tabla 18	Características del sensor ECH2O MAS - 176
Tabla 19	Características del sensor HL-69.....77
Tabla 20	Características del sensor de humedad capacitivo78
Tabla 21	Presupuesto tentativo de un sistema de control industrial básico.91
Tabla 22	Relación Entre las Entradas Digitales del Controlador y los Pines del Arduino.....123

Tabla 23	Relación Entre las Salidas Digitales del Controlador y los Pines del Arduino.....	124
Tabla 24	Relación Entre las Entradas Digitales de Sensores del Controlador y los Pines del Arduino.	125
Tabla 25	Relación Entre las Entradas Analógicas del Controlador y los Pines del Arduino.....	125
Tabla 26	Relación entre las Borneras del Bus de Comunicación I2C del Controlador y los Pines del Arduino.....	126
Tabla 27	Costo de los Componentes del Controlador.....	149
Tabla 28	Costo de los Elementos del Sistema de Control.....	150
Tabla 29	Costo de los Elementos del Circuito de Agua y Riego.	151



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Productores Orientados a la Agricultura Familiar.	13
Figura 2 Características Inherentes de la Agricultura Familiar.	14
Figura 3 Cultivo Bajo Invernadero.	15
Figura 4 Prototipos de invernaderos provincias altas del Cusco.	17
Figura 5 Invernaderos en los Andes Peruanos.	18
Figura 6 Producción de Fresas en los Andes Peruanos a 3900 m.s.n.m.	19
Figura 7 Diagrama de un Sistema de Control de Invernadero.	20
Figura 8 Análisis de in invernadero como un sistema de automatización.	22
Figura 9 Hermeticidad de la Cubierta Plástica.	25
Figura 10 Ventilación Natural Mediante la Apertura y/o cierre de Ventanas Manualmente.	26
Figura 11 Ventilación Forzada en Invernaderos.	26
Figura 12 Refrigeración por Nebulización de Agua.	27
Figura 13 Invernadero con Humedad Ambiental al 100%.	28
Figura 14 Medición de Humedad del Suelo con Tensiómetro.	30
Figura 15 Parámetros del contenido de agua en el suelo.	31
Figura 16 <i>Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.</i>	33
Figura 17 Estructura interna de un controlador industrial.	35
Figura 18 Arquitectura Interna de un PLC.	36
Figura 19 Fuente de Alimentación para PLC Marca SIEMENS.	38
Figura 20 PLC SIEMENS S7-1200.	39
Figura 21 Símbolo de un Optoacoplador.	41
Figura 22 PLC SIEMENS S7 1200.	43
Figura 23 Sistema HortiMax-GO! de Ridder.	45
Figura 24 Controlador Commander EVO de Irritec.	48
Figura 25 Arduino MEGA 2560.	50
Figura 26 Raspberry Pi 4.	53
Figura 27 Placa de desarrollo ESP32 DEVKIT V1.	55
Figura 28 Sensor de temperatura de 3 hilos.	58

Figura 29 RTD Industrial.	58
Figura 30 Termistor Industrial de 2 Hilos.	60
Figura 31 Diferentes Modelos de Termopares.	62
Figura 32 Sensor LM35.....	63
Figura 33 Sensor Digital DS18B20.....	65
Figura 34 Sensor de Humedad y Temperatura DHT22.....	66
Figura 35 Sensor de Humedad y Temperatura MTH100.....	68
Figura 36 Sensor de Humedad Thies CLIMA 1.1005.54.241.....	70
Figura 37 Sensor de Humedad Relativa HS1101.....	71
Figura 38 Sensor de Humedad de Suelo WATERMARK – MODELO 200SS.....	73
Figura 39 Sensor de Humedad de Suelo ECH2O MAS - 1.....	75
Figura 40 Sensor de Humedad de Suelo FC-28.....	76
Figura 41 Sensor de Humedad Capacitivo.....	78
Figura 42 Diagrama de Mando y Potencia.....	79
Figura 43 Comportamiento de la Variable de Control en un control todo-nada simple.....	82
Figura 44 Comportamiento de la Variable de Control en un control todo-nada de dos posiciones con zona muerta.....	82
Figura 45 Diagrama de un Sistema con Controlador PID.....	84
Figura 46 Plantas de Fresa.....	87
Figura 47 Módulo Regulador de Tensión Step-Down DC - DC XL4015.....	106
Figura 48 Vista Superior de la PCB de Alimentación.....	107
Figura 49 Vista Inferior de la PCB de Alimentación.....	107
Figura 50 Carcasa de la PCB de Alimentación con Adaptador para riel DIN.....	108
Figura 51 Arreglo de Resistencia PULL DOWN.....	109
Figura 52 Circuito para las Entradas Digitales Discretas.....	110
Figura 53 Diagrama del Circuito de las Salidas Digitales.....	113
Figura 54 Distribución de Corrientes del Circuito de Salidas Digitales.....	114
Figura 55 Modulo RTC DS3231.....	117
Figura 56 Vista Superior de la PCB del Segundo Nivel.....	118
Figura 57 Vista Inferior de la PCB del Segundo Nivel.....	118
Figura 58 Vista Superior de la PCB del Tercer Nivel.....	119
Figura 59 Vista Inferior de la PCB del Tercer Nivel.....	119
Figura 60 Vista Superior del Controlador con sus 3 Niveles ya Ensamblados.....	120

Figura 61 Vista Frontal del Controlador con sus 3 Niveles ya Ensamblados.	121
Figura 62 Vista Lateral del Controlador con sus 3 Niveles ya Ensamblados.	121
Figura 63 Carcasa del Controlador con los Adaptadores para Riel DIN ya Montados.	122
Figura 64 Diagrama de la Distribución de las Borneras del Controlador.	122
Figura 65 Distribución de las Entradas y Salidas del Controlador Ensamblado.	123
Figura 66 Montaje del Controlador y el Modulo Regulador de Tension en un Tablero Electrico.	127
Figura 67 Circuito de Mando del Sistema de Control.	128
Figura 68 Circuito de Fuerza del Sistema.	129
Figura 69 Fuente de Alimentación Externa de 12V y 10A.	137
Figura 70 Controlador Energizado y en Funcionamiento.	137
Figura 71 Prueba de las Entradas y Salidas del Controlador.	138
Figura 72 Implementación del Tablero de Control.	139
Figura 73 Medición del Consumo de Corriente Interna del Sistema.	140
Figura 74 Medición del Consumo de Corriente Interna del Sistema Incluyendo el display LCD y Pulsadores.	140
Figura 75 Tablero de Control, Vista externa.	141
Figura 76 Válvula Solenoide de 1/2" Instalada e el Sistema de Riego.	142
Figura 77 Bomba Eléctrica de 1/2 HP.	142
Figura 78 Pruebas de Funcionamiento del Circuito de Fuerza.	143
Figura 79 Pruebas de los Parámetros de Funcionamiento del Sistema - 1.	144
Figura 80 Pruebas de los Parámetros de Funcionamiento del Sistema -2.	144
Figura 81 Plantas de Fresa Creciendo Dentro del Invernadero con el Sistema de Control Implementado.	145
Figura 82 Primeras Flores y Frutos del Cultivo.	146
Figura 83 Progreso en el cultivo de las plantas de fresa.	146
Figura 84 Vista Interior del invernadero después de la automatización.	147
Figura 85 Vista Exterior del invernadero después de la automatización.	148

INTRODUCCIÓN

En los últimos años los cultivos bajo invernadero han ido obteniendo un papel cada vez más trascendente en el mercado agropecuario en el Perú debido a las ventajas que aporta este sistema respecto al cultivo en suelo tradicional, como cultivos más fáciles de manejar y obtener productos más saludables y de mejor calidad que se venden a mejores precios. Debido a las ventajas de este método de cultivo, ha aumentado la cantidad de agricultores que se están interesando y se animan a incursionar en los cultivos bajo invernadero. (Perez Cari & Tellez Garrido, 2020)

Sin embargo, la gran mayoría de los agricultores familiares que implementan un invernadero en sus predios, no aprovechan al máximo ventajas que brinda este método de cultivo porque sus invernaderos son muy rudimentarios y no llevan ningún sistema de control, debido a que la mayoría de estos agricultores no pueden costear la implementación. (MIDAGRI; INEI, 2022)

Para aprovechar al máximo el potencial del cultivo bajo invernadero es necesario implementar un sistema de automatización que permita controlar las variables que afectan al cultivo para facilitar el mismo y obtener mejores productos dedicándole menos tiempo al monitoreo del cultivo. (SIEMENS, 2018)

Entre las principales limitaciones para la automatización de un invernadero está el alto costo de inversión para implementar un sistema de control. Para automatizar un invernadero se requiere de un conjunto de sensores y actuadores comandados por un controlador, este último es la pieza clave del sistema ya que tiene que ser capaz de soportar condiciones ambientales adversas y ser capaz de analizar las variables que afectan el cultivo para ejecutar acciones de control. Es por ello que se utilizan controladores industriales como los PLCs, sin embargo, estos dispositivos son costosos y el sistema de control tiene que estar compuesto por sensores compatibles con el controlador y también son costosos.

La fuerte inversión que requieren los controladores y los demás elementos del sistema de control es un obstáculo para que los agricultores familiares puedan realizar la automatización de sus invernaderos.

Es por ello que en esta investigación se propone el diseño e implementación de un sistema de control económico que integre un controlador que lleve como núcleo a la placa Arduino y un conjunto de sensores y actuadores compatibles, para tener una alternativa económica y funcional para automatizar un cultivo en invernadero.



CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Enunciado del problema

Las nuevas tecnologías aplicadas a la agricultura, incluyendo los cultivos bajo invernadero están adquiriendo una relevancia creciente a nivel mundial, estos métodos de cultivo permiten aprovechar más eficientemente los recursos disponibles por el agricultor, teniendo como resultado productos de mejor calidad que se venden a mejores precios. (Abbasi, Martínez, & Ahmad, 2022)

En el Perú el método de cultivo bajo invernadero está obteniendo un papel más trascendente en el mercado agropecuario debido a las ventajas que aporta este sistema, por lo que muchos agricultores se están interesando y se animan a incursionar en los cultivos bajo invernadero. (Perez Cari & Tellez Garrido, 2020)

Sin embargo; de todos los agricultores que se animan por este tipo de cultivo, casi ninguno implementa un sistema de automatización.

Los pequeños agricultores no pueden costear los gastos de implementación sistemas de control; (MIDAGRI; INEI, 2022) por lo que, la mayoría de los invernaderos apenas tienen mecanismos de control y en la mayoría de los casos solo se cuenta con un temporizador de riego que son básicamente electroválvulas temporizadas y no proveen un verdadero sistema de control.

El componente más importante de un sistema de control y también el más costoso es el controlador. Este dispositivo es el corazón del sistema y está íntimamente relacionado con la red de sensores y actuadores ya que todo el conjunto debe ser capaz de interactuar y comunicarse correctamente.

En los proyectos agrícolas de grandes envergaduras donde se tiene implementado algún tipo de sistema de control, se utilizan controladores específicamente diseñados para el sector agrícola o bien se utilizan PLCs industriales. (SIEMENS, 2018). Un controlador como

el S7-1200 de SIEMENS tiene un costo de S/.1700 soles en el mercado peruano, tomando en cuenta además el costo de los sensores de grado industrial que se tiene que utilizar, el costo de implementación se encarece y hace que el agricultor no pueda costear dicho gasto.

Habiendo expuesto esto, se puede comprender que los agricultores que quieren mejorar su producción se encuentran con el siguiente problema: Los agricultores orientados a agricultura familiar no pueden automatizar sus invernaderos porque los sistemas de control industrial disponibles son costosos e inaccesibles para ellos.

Para poder aprovechar los beneficios de cultivo bajo invernadero es necesario automatizar el proceso, la falta de automatización es un problema ya que hace que el manejo del invernadero sea muy complicado y no se pueda tener un control efectivo en el cultivo, esto repercute en la calidad de los productos y su valor final del mercado; además que se tiene un manejo ineficiente de recursos, tiempo y esfuerzo dedicados.

Es por ello que la presente investigación busca el desarrollo de un sistema de control accesible basado en Arduino integrado a una red de sensores compatibles con Arduino, económicos y de fácil acceso para el pequeño agricultor que facilite la automatización del proceso de cultivo.

1.1.2. Formulación del problema

En virtud a lo anteriormente expuesto, el presente proyecto busca el desarrollo de un sistema de control basado en Arduino que permita automatizar un invernadero orientado a la agricultura familiar, pero específicamente se busca diseñar un controlador basado en Arduino que permita integrar la red de control; por ello surgió la siguiente interrogante:

¿Cómo el diseño e implementación un sistema de control basado en Arduino permitirá realizar la automatización de invernaderos orientados a la agricultura familiar?

1.2. Interrogantes

1.2.1. Interrogante principal

¿Como el diseño e implementación de un sistema de control basado en Arduino permitirá realizar la automatización de invernaderos orientados a la agricultura familiar?

1.2.2. Interrogantes específicas

- ¿Cuáles son los parámetros requeridos para controlar cultivo; y cuánto tiempo y esfuerzo se requiere dedicar al cultivo de prueba antes de la automatización?
- ¿Qué circuitos de protección para entradas y salidas son requeridos para imitar el comportamiento en las entradas y salidas digitales discretas de un PLC y como se los pueden integrar para diseñar e implementar un módulo compuesto de placas PCB acoplable a la placa Arduino que cuente con borneras?
- ¿Qué sensores de temperatura ambiental, humedad ambiental y humedad de suelo serán los adecuados para el sistema de control, considerando que estos deben ser económicos, de fácil acceso al mercado local y compatibles con Arduino para integrar el sistema de control?
- ¿Con el uso de una estrategia de control ON/OFF se podrá controlar el sistema de automatización para el invernadero?
- ¿Como se comportarán los parámetros del cultivo con el sistema de control implementado comparando un antes y después de realizar la automatización?

1.3. Área del conocimiento

De acuerdo al Consejo Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación (CONCYTEC), el cual usa como áreas del conocimiento el estándar de Áreas de Ciencia y Tecnología de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), para el presente proyecto se tiene:

Área	: Ingeniería y Tecnología
Sub Área	: Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica
Línea	: Sistemas de automatización, Sistemas de control

1.4. Variables

1.4.1. Variable Independiente

Parámetros de control del cultivo.

1.4.2. Variable Dependiente

Diseño del controlador y automatización del cultivo.

1.5. Justificación

1.5.1. Justificación social

En el contexto de la agricultura familiar en el Perú, de todos los invernaderos orientados a agricultura familiar en el Perú, muy pocos tienen sistemas de control automatizado por el costo de implementación.

El principal factor que limita la implementación de un sistema de control es el controlador, ya que este es el elemento encargado de realizar las operaciones de control del sistema y suele ser el componente más costoso de un sistema de control. Los controladores industriales como los PLC y los sensores que integran la red de control son costosos e inaccesibles para la mayoría de los agricultores orientados a agricultura familiar.

Este proyecto propone el desarrollo de un controlador económico que permita integrar un sistema de control con elementos económicos y accesibles al mercado local. Esto brindará una alternativa a su contra parte industrial con lo que se dará la oportunidad a los agricultores familiares de poder emprender proyectos de automatización para optimizar sus cultivos, con ello será posible incrementar la producción del agricultor, además de optimizar el manejo de recursos, como ahorro de agua y tiempo dedicado al cultivo, para realizar otras actividades.

1.5.2. Justificación técnica

En un cultivo en invernadero, el control de la temperatura ambiental, humedad ambiental y humedad del sustrato de las plantas; son variables cruciales para un cultivo exitoso. El control de dichas variables con la placa Arduino es posible y en investigaciones anteriores se ha demostrado que este control se puede realizar exitosamente.

Sin embargo, aunque la placa Arduino ha demostrado ser capaz de realizar el control de cultivos en invernadero, su aplicación real se ve limitada por la falta de mecanismos internos de seguridad de la propia placa.

Si bien se puede controlar el ambiente y riego de un cultivo en invernadero con esta placa, poco se habla que al ser un dispositivo de entrenamiento no tiene mecanismos de seguridad que permitan su aplicación real en entornos industriales.

Las entradas y salidas de la placa no garantizan conexiones firmes y es fácil que estas se desconecten o no hagan contacto correctamente. Por otro lado, en las entradas digitales no se tiene ningún circuito de protección que evite ruido electrónico y falsas conmutación, además que en las salidas tampoco se cuenta con protección por lo que es vulnerable a cortocircuitos, sobretensiones, sobre corrientes y cualquier otra falla que pueda ocurrir en la salida. Además, que únicamente pueden controlar actuadores que operen en 5V DC.

Sin embargo, si se pudiera adaptar la placa Arduino para adicionarle mecanismos de seguridad básicos imitando así el funcionamiento de las entradas y salidas digitales de un PLC, se podría hablar de aplicaciones reales en las que la placa Arduino pueda controlar entornos tales como el cultivo en un invernadero. Es por ello que en este proyecto se busca desarrollar un prototipo de controlador basado en Arduino que permita integrar una red de sensores compatibles con la placa, para poder controlar el cultivo de un invernadero.

1.6. Objetivos de la investigación

1.6.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de control basado en Arduino para la automatización de invernaderos orientados a la agricultura familiar

1.6.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros requeridos para el control de cultivo, además de medir tiempo y esfuerzo que se tiene que dedicar al cultivo de prueba antes de la automatización.
- Diseñar e implementar un módulo compuesto de placas PCB acoplable a la placa Arduino que cuente con borneras y circuitos de protección para entradas y salidas

que permitan imitar el comportamiento en las entradas y salidas digitales discretas de un PLC.

- Realizar la selección de sensores de temperatura ambiental, humedad ambiental y humedad de suelo considerando que estos deben ser económicos, de fácil acceso al mercado local y compatibles con Arduino para integrar el sistema de control.
- Programar al controlador para ejecutar una estrategia de control ON/OFF en el sistema de automatización para el invernadero.
- Monitorear el funcionamiento del sistema de control implementado con el uso de termómetro, higrómetro y cronómetro; para comparar los parámetros del cultivo antes y después de la automatización.

1.7. Hipótesis

Debido a que los sistemas de control industrial para invernaderos son poco accesibles para los agricultores familiares, el diseño e implementación de un sistema de control basado en Arduino, que integre elementos económicos, para poder automatizar los parámetros de control del cultivo, se tendrá una alternativa accesible que permita a estos agricultores tener un control automatizado de sus cultivos y aprovechar las ventajas que ello trae.

1.8. Alcances

El presente proyecto tiene los siguientes alcances:

- El proyecto busca diseñar e implementar un sistema de control que permita a los productores orientados a agricultura familiar, realizar la automatización de sus invernaderos.
- Se realizará la identificación de los parámetros de control para el cultivo con el objetivo de determinar los límites máximos y mínimos apropiados para el cultivo testigo, teniendo en cuenta que estos podrán ser modificables para utilizar el sistema en otros cultivos. Además, se medirá el tiempo y el esfuerzo que se tiene que dedicar al cultivo de prueba antes de realizar la automatización.

- Se realizará el diseño e implementación de un controlador compuesto de placas PCB acoplables a la placa Arduino. El controlador contará con borneras que permitan conexiones fijas y seguras, además de incluir circuitos de protección para entradas y salidas que permitan imitar la robustez en las entradas y salidas digitales discretas de un PLC industrial.
- Se realizará una selección de sensores considerando que estos deben ser económicos, de fácil acceso al mercado local y compatibles con Arduino.
- Se realizará la programación del controlador para ejecutar una estrategia de control ON/OFF, que controlará los límites máximos y mínimos de los parámetros de control del cultivo, realizando acciones correctivas si se rebasa alguno de estos límites.
- El cultivo se monitoreará por un periodo de 4 semanas para evaluar el comportamiento del sistema de control y la respuesta del cultivo.
- El sistema de control a diseñar debe permitir la implementación en invernaderos similares al seleccionado para este proyecto.
- Este sistema deberá ser capaz de funcionar correctamente sin desconexiones, conmutaciones intempestivas o fallos en el controlador; de tal manera que el agricultor únicamente tendrá que dedicarle unos minutos al día para monitorear el invernadero, facilitando la tarea y permitiendo que el tiempo ahorrado en el cuidado del cultivo pueda ser destinado a otra actividad.

1.9. Limitaciones

Las limitaciones para el siguiente proyecto son las siguientes:

- El controlador a diseñar imitará el funcionamiento de las entradas y salidas digitales discretas de un PLC industrial, así como la capacidad de realizar acciones de control en un ambiente real. Además de asegurar que las conexiones eléctricas sean firmes y los cables no se suelten fácilmente.
- El sistema de control detectará cuando el sustrato no se haya regado por algún motivo, pero el agricultor deberá buscar el motivo de la falla.

- El sistema de control debe poder adaptarse a varios tipos de cultivo, para ello debe posible modificar los sets points de forma interactiva para el agricultor.
- El sistema de control debe permitir una instalación y manipulación simple, teniendo en cuenta que está orientado a agricultores.
- Este sistema de control está orientado a invernaderos para agricultura familiar no para proyectos de grandes extensiones.

1.10. Antecedentes

Higginson & Brooks (2022), *A bioreactor system remote laboratory for teaching process control*. En este artículo se desarrolló la integración de un sistema de control industrial ya existente que contaba con un SCADA basado en un PLC Siemens S7-315 y un subsistema de control basado en Arduino. Inicialmente se tenía un biorreactor de fermentación alcohólica que tenía un sistema SCADA industrial que consistía en un PLC y una red de sensores industriales de precisión. Este sistema se diseñó para controlar la función principal del biorreactor, pero no se consideró en el diseño las funciones secundarias como la refrigeración de la chaqueta de intercambio de calor, la turbidez del líquido y el flujo de gas. Esto ocasionaba que el biorreactor sea ineficiente y la mejora del sistema era inviable porque se requería adicionar más sensores industriales compatibles con el PLC y adicionar un módulo I/O al mismo, lo que suponía una inversión excesiva. Para solucionar este problema se incorporó un subsistema de control económico que se encargaría de controlar las tareas secundarias, dicho subsistema estaría basado en el control con Arduino y los sensores requeridos eran económicos y compatibles con Arduino. Este trabajo deja como antecedente que se puede controlar procesos industriales secundarios que no involucran una alta precisión y confiabilidad con Arduino. Además, que es posible integrar la placa Arduino a un control industrial, teniendo como principal mecanismo de control al PLC que se encarga del control de los procesos críticos y dejando al Arduino a cargo de tareas secundarias del control.

(Poblete Manzano, 2023), *Diseño e implementación de un sistema tecnológico para invernaderos en la comunidad José Painecura Hueñalihuen*. Este trabajo buscó diseñar e implementar un sistema tecnológico en invernaderos de dos escuelas, de la comunidad José Painecura Hueñalihuen, comuna de Carahue, Región de la Araucanía, Chile. Se realizó un estudio de los principales trabajos ya realizados de invernaderos inteligentes, junto con

proyectos en comunidades indígenas del área Internet Of Things y energías renovables. En este trabajo se destaca el uso de una placa de desarrollo como núcleo del sistema de control que permite realizar acciones correctivas en invernaderos rurales. Se presenta el diseño del sistema tecnológico implementado en los invernaderos, que incluye un controlador PID difuso basado en reglas, el cual tiene el objetivo de automatizar el riego en los invernaderos, controlando así variables del micro-clima como humedad de suelo. El controlador es desarrollado utilizando sensores y actuadores para el monitoreo de las variables del micro-clima, junto con accionar actuadores que son capaces de regar los cultivos.

Kvalsund & Winkler (2023), *Development of an Arduino-based, open-control interface for hardware in the loop applications*. En este artículo se presentó una alternativa de bajo costo a los controladores eléctricos convencionales. Se diseñó un sistema de adquisición de datos con entradas y salidas discretas basado en Python y Arduino que consistía en un conjunto de placas que permitían al dispositivo contar con entradas y salidas analógicas y salidas digitales a relé. Las placas del módulo contienen circuitos de protección para salidas digitales, circuitos de protección en las entradas analógicas que buscan el acondicionamiento de señales provenientes de sensores industriales para que sean compatibles con Arduino, además se tiene una placa que acondiciona la señal analógica de salida PWM del Arduino para controlar dispositivos que operan con ± 10 V. Este artículo sienta un precedente de la operatividad de la placa Arduino en entornos semi industriales en los que no es viable la implementación de un controlador PLC. El prototipo de controlador diseñado se conforma de un conjunto de placas con circuitos de protección que permiten al Arduino imitar el control de entradas y salidas de un PLC. En este proyecto, además, se encapsula todos los circuitos y el Arduino en un único módulo que facilite la conexión y haga que la interacción sea más amigable con el usuario.

Palomino Masco (2022), *Development and Validation of a Less Expensive and Portable PLC Module for Students Training in Industrial Automation*. En este artículo se desarrolló un controlador que imita las funciones de entradas y salidas digitales de un PLC industrial con el objetivo de ser una alternativa económica para el entrenamiento de estudiantes interesados en aprender control industrial. En el documento se explica que aprender sobre control industrial es costoso debido al precio de los PLC y licencias de software lo que limita el acceso a capacitación de estudiantes interesados. Se diseñó 2 prototipos de placas de control basadas en el microcontrolador PIC 16F877 y el

ATMEGA328P. Los prototipos contaban con circuitos de protección en las entradas y salidas digitales y para su funcionamiento se los conecto a un data logger que enviaba un pulso cada 5 segundos al controlador el cual lo procesaba y enviaba una respuesta que recibía el data logger durante un periodo de prueba de 24 horas. Los resultados indicaron que el comportamiento de estos prototipos era similar al comportamiento de las entradas y salidas digitales discretas del PLC LOGO y el S7-1200 de SIEMENS. Este artículo deja el antecedente que, mediante la incorporación de circuitos de protección con optoacopladores en las entradas digitales y optoacopladores con relés en las salidas digitales, se puede imitar el comportamiento de las entradas y salidas digitales discretas de un PLC industrial con microcontroladores económicos, ya que estos estarán protegidos.

Salazar Aguilar (2020), *Diseño de un sistema inteligente para el control automatizado de invernaderos*. Este proyecto buscó desarrollar una opción más económica ante los productos comerciales para automatización de invernaderos, para lo cual se diseñó e implemento un sistema modular inteligente, para controlar de forma eficiente un invernadero, el cual se alimentaba con celdas fotovoltaicas, y contaba con una aplicación de comunicación con dispositivos móviles. Como controlador se utilizó un Arduino MEGA 2560, con el cual se pudo controlar las condiciones de cultivo en un invernadero de prueba. El proyecto deja como antecedente que una placa Arduino es capaz de realizar el control sobre los parámetros de cultivo en un entorno de laboratorio.

Rivera Vargas , Paucar Alcantara, & Chafloque Moreno (2019), *Controlador lógico programable de salida tipo relé, basado en Arduino para transmisión de datos entre etapas de procesos industriales*. En este proyecto se realizó la adaptación de la placa Arduino para que imite las funciones de sus entradas y salidas digitales discretas y las entradas analógicas. Se implementaron circuitos de protección con optoacopladores en las entradas digitales discretas y optoacopladores con transistores y relés en las salidas digitales discretas. Se incorporo el controlador en una red de control con sensores y actuadores industriales y se comprobó que, con las protecciones implementadas, el Arduino pudo operar y controlar la red de sensores y actuadores industriales.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Agricultura familiar en el Perú

De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Riego, la agricultura familiar es una actividad productiva que realizan un conjunto de personas pertenecientes a un mismo núcleo familiar que viven en un entorno rural, cuyo modo de vida y producción están orientados a algunos de los siguientes rubros: producción agrícola, pecuaria, de manejo forestal, industrial rural, pesquera artesanal, acuícola y apícola, entre otros. (MINAGRI, 2015)

En la agricultura familiar la principal fuerza laboral proviene del propio trabajo familiar, aunque también se suele emplear trabajadores eventuales externos al núcleo familiar. La residencia de los integrantes del núcleo familiar coincide o es cercana al lugar donde se realiza la actividad productiva, los agricultores manejan pequeñas extensiones de tierra que pueden ser o no de su propiedad.

Figura 1 *Productores Orientados a la Agricultura Familiar.*



Nota: Tomado de (MINAGRI, 2015)

Este tipo de agricultura tiene acceso limitado a diversos recursos como terreno, acceso a agua constante, capital e instrucción técnica, entre otros, por lo que, en muchos casos, sobre todo en la sierra, la agricultura familiar está destinada como una actividad de subsistencia.

Otra característica importante de este tipo de agricultura es que la actividad productiva no necesariamente es la principal fuente de ingresos para el núcleo familiar, por lo que en muchos casos las familias complementan los ingresos de la canasta familiar con otras fuentes de ingreso.

La agricultura familiar tiene un papel importante en el ámbito social y económico de nuestro país ya que representa el 97% del total de las unidades agropecuarias.

Figura 2 *Características Inherentes de la Agricultura Familiar.*



Nota: Tomado de MINAGRI (2015)

2.2. Cultivo bajo invernadero

Un invernadero es por definición un recinto delimitado por una estructura, que está elaborada de metal o madera, recubierta por un material de naturaleza transparente. Los invernaderos tienen la característica que cuando los rayos de luz solar atraviesan la cubierta transparente, una parte de estos son retenidos dentro del invernadero por lo que se calienta el ambiente en su interior. Los productos que se cultivan dentro del invernadero crecen en un ambiente protegido y con condiciones favorables para su crecimiento. (Maroto Borrego, 2008)

Figura 3 *Cultivo Bajo Invernadero.*



Nota: Invernadero con estructura de palos de madera. Tomado de Lenskak & Iglesias (2019).

Los cultivos bajo invernadero tienen notables ventajas respecto a los cultivos convencionales al aire libre, estas son:

- **Producir cultivos sin depender de las condiciones climáticas.** Los cultivos bajo cubierta están protegidos de las condiciones desfavorables como temperaturas bajas, fuertes vientos, etc.; esto da como resultados ambientes óptimos para el crecimiento dentro del invernadero por lo que permite producir independientemente del clima y la

estación, este tipo de cultivo permite producir durante todo el año y no está limitado a la temporada del cultivo.

- **Aumentar la productividad de los cultivos.** La productividad de los cultivos aumenta notablemente dentro de un invernadero debido a que se tienen mejores condiciones ambientales, se tiene un control más eficiente de plagas y enfermedades, la densidad de plantas por metro cuadrado supera con creces a los cultivos tradicionales al aire libre.
- **Mejorar la calidad comercial de los cultivos.** Dentro de los invernaderos se puede producir cultivos más sanos, mejor calidad que se pueden vender a mejores precios en el mercado.

Los cultivos bajo invernadero tienen notables ventajas respecto al cultivo tradicional, es por ello que hay un creciente interés por incursionar en este tipo de sistema, sobre todo en regiones donde las condiciones climáticas y de terreno dificultan la producción. Sin embargo, antes de tomar la decisión para implementar un cultivo bajo invernadero se debe considerar algunos criterios. Lenskak & Iglesias (2019) y Maroto Borrego (2008) nos presentan algunos de estos criterios:

- La cobertura del invernadero tiene que ser lo más transparente posible para permitir el ingreso de radiación solar, también tiene que ser capaz de retener la radiación sobre todo en la noche para mantener la temperatura y tiene que ser lo más impermeablemente posible para evitar perder humedad y aislar el cultivo del ambiente exterior.
- Los materiales de construcción de las estructuras proporcionarán una instalación segura y confiable.
- Los invernaderos tienen que estar diseñados para tener una vida útil mínima entre 5 y 15 años, siendo las estructuras de madera las de menor duración. Esto es debido a que, al tener una inversión inicial alta, se necesita que el invernadero tenga una vida útil prolongada para justificar su inversión.
- Los materiales del invernadero tienen que ser lo más económicamente posible, para garantizar la rentabilidad del proyecto.
- La tecnología del invernadero debe estar adaptada al entorno económico local, los materiales constructivos, eléctricos y electrónicos deben estar disponibles localmente para minimizar los costos y facilitar el mantenimiento.
- La inversión inicial de un proyecto de cultivo bajo invernadero es elevada, por ello se debe garantizar que la producción será capaz de justificar dicha inversión.

2.2.1. Estado de los cultivos bajo invernadero en el Perú

Desde hace varios años en el Perú se ha tenido un crecimiento en el interés por los cultivos bajo invernadero por las ventajas que esta estrategia de cultivo tiene respecto al cultivo tradicional. En regiones donde se tiene climas que dificultan la producción agrícola de uno o varios tipos de cultivos y en zonas donde se tiene escasez de agua o suelos pobres, han comenzado a surgir más frecuentemente cultivos protegidos bajo cubierta ya que éstos son capaces de maximizar los recursos obteniendo producciones inclusive superiores al cultivo tradicional y sin estar limitados a las condiciones ambientales. Un ejemplo de ello son los Sayaris y Walipinis, invernaderos rudimentarios que se construyen en regiones del altiplano que permiten producir cultivos de subsistencia y/o comerciales que de otro modo no sería posible de producir en esa zona, como fresas, hortalizas, uvas, etc.

Figura 4 *Prototipos de invernaderos provincias altas del Cusco.*



Nota: Tomado de Zanabria Pacheco (2015)

En el Perú se tiene una viabilidad económica existente para el desarrollo de proyectos de cultivos bajo invernadero. Esto se debe a las ventajas propias de este método de cultivo y por el creciente interés de la población por adquirir productos más saludables y de mejor calidad. La alimentación sana y de calidad se ha convertido en un tema conocido entre la población gracias a la educación y al internet y es por ello que cada vez más familias están

dispuestas a pagar precios más altos por productos de mejor calidad. (Perez Cari & Tellez Garrido, 2020)

Figura 5 *Invernaderos en los Andes Peruanos.*



Nota: Tomado de Rojas Marroquin (2021)

Para el año 2021 solamente en Cusco, más de 8000 familias de agricultores en zonas rurales habían incursionado en prácticas de cultivo en invernadero. A nivel nacional tenemos una tendencia por la innovación en este tipo de sistema de cultivo, (Rojas Marroquin, 2021). Para las unidades agropecuarias familiares el uso de invernaderos se ha convertido en una alternativa interesante, su uso permite tener un mejor manejo del cultivo y aprovechar más eficientemente los recursos con lo que es posible producir en regiones o temporadas que normalmente sería imposible de hacer.

Según la última Encuesta Nacional Agropecuaria realizada por el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) con respaldo del Instituto Nacional de Informática (INEI) en el año 2022, se encontró que la superficie agrícola bajo riego (con acceso de agua constante) representó el 36.3% mientras que la superficie agrícola bajo secano (depende exclusivamente de las lluvias) registro el 63.7%. (MIDAGRI; INEI, 2022) En las regiones de cultivo donde se tiene una gran dependencia de las precipitaciones, así como en zonas desérticas y de temperaturas bajas, los invernaderos suponen una oportunidad para la producción agrícola.

Sin embargo, en la mayoría de los invernaderos en el Perú el manejo es completamente manual y no se tiene ningún tipo de control sobre los parámetros que rigen los cultivos. Esto

se debe al elevado costo de inversión que se tiene y al desconocimiento y capacitación de los agricultores. En la última Encuesta Nacional Agropecuaria, solo el 51.4% de los productores agrícolas cuentan con educación primaria y apenas el 3.8% afirman haber recibido algún tipo de capacitación técnica. (MIDAGRI; INEI, 2022)

2.3. Automatización de cultivos bajo invernadero

Si bien los invernaderos proveen de un ambiente protegido y con mejores condiciones ambientales que el cultivo al aire libre, se debe monitorear regularmente los parámetros ambientales dentro y fuera del invernadero ya que si se exceden los límites óptimos de cultivo se tendrán repercusiones en la productividad.

La climatización de un invernadero es una disciplina que exige un monitoreo regular ya que las condiciones pueden variar considerablemente y en tiempos cortos. Un aumento excesivo en la temperatura y humedad ambiental pueden dañar severamente los cultivos y provocar pérdidas productivas.

Figura 6 *Producción de Fresas en los Andes Peruanos a 3900 m.s.n.m.*



Nota: Todas las actividades se realizan manualmente. Tomado de Rojas Marroquin (2021)

En invernaderos sin un sistema de control implementado, los agricultores tienen que dedicarle bastante tiempo al cuidado del cultivo para realizar acciones correctivas que mantengan el ambiente del invernadero en los límites adecuados para el cultivo. Para realizar estas tareas, se abren y cierran ventanas y puertas manualmente, se encienden

bombas que esparcen agua por medio de nebulizadores, inclusive en el caso de los invernaderos más rudimentarios, como los sayaris y walippini del altiplano, el único medio de control que tienen es abrir o cerrar las puertas y echar barro a la cubierta plástica para bajar la temperatura.

El control manual de los parámetros de climatización resulta ineficiente y exige que se dedique bastante tiempo del día al monitoreo y control. Esto llega a ser inviable sobre todo si se trata de agricultura familiar ya que un gran porcentaje de los productores complementan los ingresos de la canasta familiar con otras actividades por lo que no pueden dedicarle tanto tiempo al monitoreo del invernadero.

Para aprovechar al máximo las ventajas que ofrece el cultivo bajo invernadero es necesario implementar estrategias de monitoreo y control más eficientes, que permitan un monitoreo completo las 24 horas del día para poder realizar los controles necesarios para mantener el ambiente interno dentro de los límites óptimos para el crecimiento del cultivo.

Figura 7 Diagrama de un Sistema de Control de Invernadero.



Nota: Se identifica el invernadero, el controlador (1), la bomba de agua (2), el tanque de agua (3) y la interfaz gráfica (4). Tomado de SIEMENS (2018)

Es por ello que surge la necesidad de implementar sistemas de automatización del cultivo ya que solo con ello se consigue monitorear y controlar los parámetros ambientales.

La automatización de cultivos bajo invernadero ofrece las siguientes ventajas:

- Monitorear las 24 horas del día los parámetros ambientales dentro y fuera del invernadero.
- Procesar la información recopilada por los sensores para realizar correcciones a las variables de control para mantener las condiciones de cultivo en niveles óptimos para un máximo desarrollo de las plantas.
- Mantener cultivos independientemente de época del año y las condiciones ambientales. Con ello se puede producir fuera de temporada y vender los productos a precios más altos.
- Aprovechar al máximo los recursos con lo que se podrá tener producciones más grandes en espacios más pequeños y gastando menos.
- Producir prácticamente cualquier tipo de cultivo en cualquier lugar, permitiendo así tener producciones en zonas donde de otro modo sería imposible o muy poco rentable. Teniendo en cuenta que, en el Perú la superficie agrícola bajo secano (depende de la lluvia) representa el 63.7% de la superficie total cultivable, (MIDAGRI; INEI, 2022) el uso de invernaderos automatizados es una opción que permitiría aprovechar tierras en zonas donde la agricultura no se puede desarrollar bien, como en el desierto costeño o regiones de la sierra donde hay escasas de agua.
- Reducir considerablemente el tiempo que se le tiene que dedicar al cuidado del cultivo.

Si bien la automatización de los cultivos bajo invernadero tiene muchas ventajas, también tiene algunas desventajas:

- El costo de inversión inicial es alto.
- Los agricultores tienen que tener cierto nivel de capacitación técnica.
- Se requiere tener acceso a corriente eléctrica.

La automatización de invernaderos es un concepto de características multidisciplinarias ya que engloba conceptos de cultivo agrícola, instrumentación, automatización y programación, entre otros. Esta supone una opción interesante y atractiva para los pequeños productores ya se consigue tener un control adecuado sobre los cultivos sin necesidad de dedicarle mucho tiempo al día, esto permitiría abarcar otras actividades para complementar los ingresos de la canasta familiar.

Lamentablemente, muy pocos productores han incursionado en proyectos de automatización de invernaderos ya que se requiere un alto costo de inversión inicial, esto se

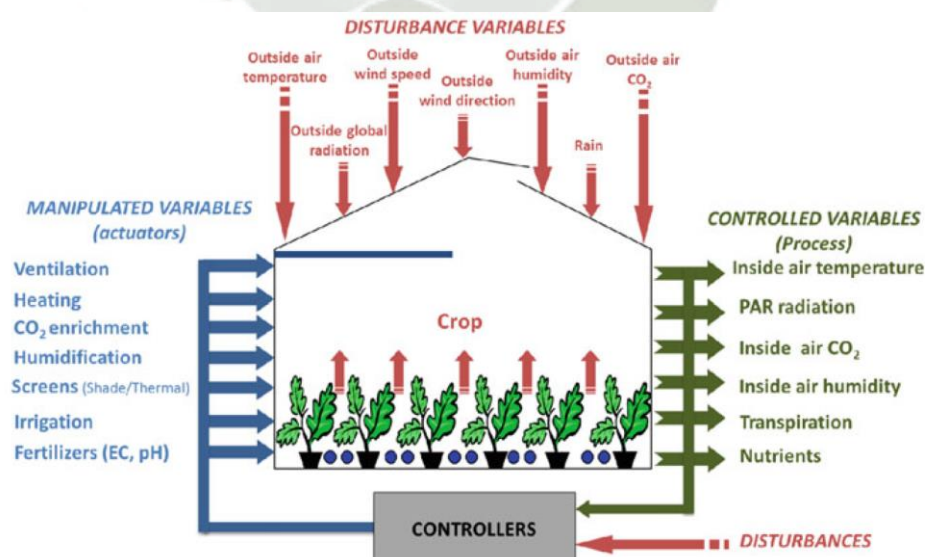
debe a que los sensores, actuadores y controladores requeridos son bastante costosos. Los controladores, sobre todo, son una gran limitante ya que estos exigen que los sensores y actuadores a los que se los conectan sean compatibles con ellos, esto eleva el costo de todo el sistema de control por lo que se vuelve inalcanzable para los pequeños productores. Es por esta razón que se no se suele automatizar los invernaderos y en la mayoría los casos el único método de control es con temporizadores que accionan bombas y válvulas de acuerdo a la programación que tengan. Este es el método de control más antiguo e ineficiente que hay porque las condiciones ambientales afectan considerablemente los requerimientos de agua de la planta y en un simple riego temporizado no se puede tener un control apropiado.

Si los productores pudieran tener acceso a un sistema de control económico, cuyos elementos estén disponibles localmente y sea fácil de instalar y manipular, la automatización de invernaderos sería una opción más viable y atractiva.

2.3.1. Principales parámetros que inciden en la automatización de un invernadero

La climatización es una disciplina compleja, los invernaderos son sistemas cuyo estado está variando continuamente con el tiempo por acción de una gran cantidad de variables.

Figura 8 Análisis de in invernadero como un sistema de automatización.



Nota: Hay una gran cantidad de parámetros que modifican el estado climático interior del invernadero. Tomado de Rodríguez, Berenguel, Guzmán, & Ramírez Arias (2015).

Si analizamos a los invernaderos desde un punto de vista de automatización, estos son sistemas dinámicos en los que hay una gran cantidad de condiciones que afectan directamente el crecimiento de los cultivos, esto hace que el modelamiento y desarrollo de estrategias de control se convierta en una tarea compleja.

Según (Rodríguez, Berenguel, Guzmán, & Ramírez Arias, 2015) y (Valera, Molina, & Álvarez, 2008) existe una amplia variedad de parámetros que afectan a los cultivos, estos pueden ser: temperatura ambiental, humedad ambiental, humedad de suelo, radiación solar, velocidad del viento, concentración de CO₂, ente otros. Sin embargo, los parámetros mas importantes que afectan directamente en el desarrollo de un cultivo dentro de un invernadero son:

- Temperatura ambiental.
- Humedad ambiental.
- Humedad de suelo.

Si bien, los demás parámetros tienen un efecto en el cultivo, estos únicamente son tomados en cuenta cuando las dimensiones e inversión del proyecto de invernadero lo justifican. Esto es debido a que para un proyecto de grandes envergaduras en el que cualquier factor que pueda influir en el cultivo debe ser considerado ya que la complejidad y dimensión del proyecto así lo demandan.

Para un proyecto pequeño, como lo son los invernaderos de agricultura familiar, la incorporación de mecanismos de control de todos los demás parámetros de control no resulta practico ni rentable ya que su efecto en el cultivo va a ser mínimo y el costo de elementos de control seria demasiado elevado.

Para los objetivos de esta investigación solo se consideran aquellos de mayor relevancia y que pueden ser fácilmente controlados en un invernadero orientado a la agricultura familiar.

a. Temperatura ambiental

La temperatura es un factor climático muy importante en el cultivo de plantas, ya que afecta directamente a su crecimiento y desarrollo. La temperatura afecta a los procesos fisiológicos de las plantas, como la fotosíntesis, la respiración y la transpiración. También

afecta a los diferentes estadios de desarrollo de las plantas, como la germinación, la floración y la fructificación. (Maroto Borrego, 2008)

Los cultivos tienen diferentes necesidades de temperatura de acuerdo a la especie de los mismos. Todas las plantas tienen rangos de temperaturas en los cuales su desarrollo es óptimo. Por otro lado, estos rangos son distintos en el día y la noche, y es necesario que el cultivo esté sometido a fluctuaciones térmicas.

Si bien cada especie tiene sus propios niveles óptimos de temperatura, distintos autores nos brindan una serie de rangos de temperatura generales en los que se engloba a la mayoría de las plantas que se cultivan en invernaderos. Por ejemplo, Lowenfels (2013) nos dice que para la mayoría de las plantas temperaturas por encima de 35°C en el día y por debajo de 5°C en la noche resultan fatales. Lenskak & Iglesias (2019) nos dicen que, para cultivos de leguminosas como las lechugas, la temperatura óptima durante el día es de 15-20°C y durante la noche es de 10-15°C. Por otro lado, (Maroto Borrego, 2008) nos dicen que, para cultivos de hortalizas, fresas y leguminosas, la temperatura óptima durante el día es de 10-25°C y durante la noche es de 7-10°C.

Sobrepasar los límites de temperatura puede provocar daños significativos en la producción del cultivo, por eso es que es importante tener algún método de control.

Temperaturas muy bajas pueden provocar la paralización del crecimiento de la planta, incluso puede causar daños muy graves a los tejidos de la planta que provocarán la muerte de esta.

Temperaturas muy altas pueden provocar marchitamiento de la planta, paralización del crecimiento de la planta, caída de las hojas, formación de frutos de baja calidad, exceso de evaporación de agua y la proliferación de enfermedades. Es importante tener un control adecuado sobre la temperatura interior del invernadero, sin embargo, para tener un control adecuado también se tiene que considerar también las condiciones ambientales exteriores, ya que estas tienen un efecto significativo en las condiciones internas del invernadero.

Para asegurar que la temperatura interior del invernadero esté dentro de los niveles óptimos se puede aplicar varias metodologías, a continuación, se presentarán las más comúnmente utilizadas:

- **Hermeticidad de la cubierta plástica:** Al incrementar la hermeticidad del invernadero, se limitan las fugas de calor que se puedan tener en la noche con lo que se mantendrá mejor la temperatura. Se debe asegurar que haya solo la cantidad necesaria de áreas abiertas en la cobertura (alrededor del 30% del área del invernadero), el plástico debe estar al ras del suelo y no debe haber orificios o puntos donde pudiera fugar el calor interior. (Valera, Molina, & Álvarez, 2008)

Figura 9 *Hermeticidad de la Cubierta Plástica.*



Nota: Se aprecia que la cubierta esta herméticamente sellada y no presenta aberturas. Tomado de Lenskak & Iglesias (2019)

Este es el único método de control considerado en esta investigación para limitar la pérdida de calor, no se han considerado ningún método de calefacción ya que implementarlos e integrarlos a un sistema integrado de control supone una inversión aún más alta ya que hay que considerar calefactores, redes de tuberías, entre otros elementos que elevarían tanto el costo que sería inaccesible para un productor de agricultura familiar.

- **Ventilación natural:** La ventilación provoca intercambios de aire entre el invernadero y el ambiente exterior, estos intercambios renuevan el aire interior modificando la temperatura, humedad y concentración de gases. La ventilación natural se consigue con la apertura o cierre de puertas y ventanas del invernadero, esto se puede hacer de forma manual o electromecánica. La apertura y cierre de ventanas se puede controlar, y regular con la ayuda de una red de sensores y controladores. (Lenskak & Iglesias, 2019)

Figura 10 *Ventilación Natural Mediante la Apertura y/o cierre de Ventanas Manualmente.*



Nota: Tomado de Lenskak & Iglesias (2019)

- **Por ventilación forzada:** Con el uso de ventiladores y extractores se tiene un control más preciso de la temperatura en el interior del invernadero. La principal desventaja que tienen es el precio de los equipos e instalaciones y el consumo de energía. Con el uso de ventilación forzada se facilita la evacuación de humedad, gases y carga de calor.

Figura 11 *Ventilación Forzada en Invernaderos.*



Nota: Ventilación por medio de extractores. Tomado de <https://www.ulmaagricola.com/es/invernaderos/equipamientos/extractor/>

- **Refrigeración por Nebulización:** La nebulización consiste en liberar pequeñas gotas de agua de menos de 100 micrones, a través de agua inyectada a presión en boquillas especiales, estas gotas quedan suspendidas en el aire por su tamaño tan pequeño absorbiendo calor del ambiente hasta evaporarse, bajando la temperatura ambiental en el proceso. En el caso que las gotas mojen las hojas, la película de agua depositada es muy pequeña como para dañar los cultivos.

Figura 12 *Refrigeración por Nebulización de Agua.*



Nota: Además de refrigerar, se usa este método para aumentar la humedad ambiental. Tomado de: https://www.flordeplanta.com.ar/wp-content/uploads/2014/03/nebulizacion_1.jpg.

Con la nebulización temperatura interior del invernadero cae considerablemente pudiendo reducir la temperatura hasta cerca de 10° C por debajo de la exterior. (Maroto Borrego, 2008)

Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta no es una solución definitiva ya es muy dependiente de la humedad interior y exterior del invernadero.

El agua suspendida en el aire se evapora hasta que el este se satura de vapor de agua, cuando esto pasa ya no es posible bajar la temperatura ambiente con este método porque el aire no es capaz de retener más vapor agua.

Una gran desventaja en este método es que puede producirse una mayor incidencia de enfermedades y hongos ya que sin un control adecuado, se aumenta considerablemente la humedad ambiental. Por lo que cuando las condiciones de humedad interior y exterior son altas resulta contraproducente aplicar la nebulización.

Otro problema que se puede tener es que, si el agua disponible cuenta con un elevado contenido de sale, se pueden producir taponamientos en las boquillas de los nebulizadores.

b. Humedad ambiental

La humedad en el ambiente se mide como la humedad relativa, que es la cantidad de vapor de agua del aire y suele expresarse en porcentaje. Mientras mayor sea el porcentaje de humedad relativa, el aire será capaz de retener menos vapor de agua siendo el 100% el estado en el que el aire está completamente saturado y no admite más vapor de agua.

Figura 13 Invernadero con Humedad Ambiental al 100%.



Nota: Tomado de: InfoAgro, Climatización de Invernaderos, 9 de enero 2020, <https://mexico.infoagro.com/climatizacion-de-invernaderos-2/>

Así como en la temperatura, cada especie de planta tiene unos rangos de humedad en los cuales el crecimiento es el óptimo. El porcentaje de vapor de agua en el aire interviene en la apertura y cierre de las estomas de la planta, afectando los procesos metabólicos. Porcentajes muy altos o muy bajos de humedad relativa son perjudiciales para la planta.

Distintos autores nos brindan una serie de rangos de humedad generales en los que se engloba a la mayoría de las plantas que se cultivan en invernaderos. Por ejemplo, Lenskak & Iglesias (2019) nos dicen que para la mayoría de cultivos, el rango de humedad relativa óptima es de 55-75%. Por otro lado, Maroto Borrego (2008) nos dicen que el rango general de humedad relativa es de 50-85%.

Si se tiene bajos niveles de humedad relativa y temperaturas altas, se provoca una transpiración excesiva por lo que la planta reacciona cerrando las estomas para evitar la deshidratación. Muy bajos niveles de humedad relativa provocan deshidratación en la planta, pudiendo llegar a marchitar tejidos provocando la caída de las hojas, caída de las flores y malformación en frutos, y en casos más graves se provoca la necrosis y muerte. Descensos bruscos de humedad durante la noche puede provocar daños en la planta como el quemado de las puntas de las hojas. (Lowenfels, 2013)

Por otro lado, un exceso en la humedad relativa puede fomentar la proliferación de hongos y enfermedades, así como también puede afectar negativamente la propia polinización, la formación del fruto y otros procesos en las plantas. Un exceso de humedad durante la noche puede provocar condensación sobre las plantas y así causarles daños. (Maroto Borrego, 2008)

Las metodologías aplicadas para el control de humedad dentro del invernadero son las mismas que se utilizan para controlar la temperatura interior:

- **Hermeticidad de la cubierta plástica:** Durante el día, se evita que la humedad del invernadero escape hacia el clima seco exterior y durante la noche condensación del vapor de agua, sobre las películas plásticas retienen la radiación infrarroja emitida por el suelo durante la noche, mejorando así el efecto térmico de las coberturas.
- **Ventilación natural:** La apertura y cierre de puertas y ventanas puede mantener los niveles de humedad al interior del invernadero cuando en el exterior se tienen porcentajes bajos de humedad.
- **Por ventilación forzada:** Cuando se tiene altas temperaturas y porcentaje de humedad relativa, se puede utilizar extractores para extraer el vapor de agua y el calor del interior del invernadero y así estabilizar las condiciones interiores.
- **Aumento de la humedad por Nebulización:** El uso de la nebulización es la fama más sencilla de aumentar el porcentaje de humedad relativa dentro del invernadero.

c. **Humedad del suelo**

Cuando se riegan las plantas, el suelo se satura de agua, todos los espacios entre las partículas se llenan de agua, en este momento el suelo está saturado al 100% con la cantidad

de agua que puede retener. Este estado desaparece después de un tiempo por el drenaje del agua que varía según la textura del suelo. El agua que queda retenida en el suelo es la que es verdaderamente aprovechable por las plantas.

Figura 14 *Medición de Humedad del Suelo con Tensiómetro.*



Nota: Tomado de Enciso, Porter, & Périès (2007)

A medida que las plantas consumen el agua del suelo, la humedad en el suelo baja hasta un nivel en el cual se requiere aplicar un riego o el cultivo comienza a estresarse por falta de agua. Si no se aplica agua, la planta continuará haciendo uso de la poca humedad que queda hasta que finalmente utilice toda el agua disponible en el suelo y muera de sed.

La mayoría de las investigaciones en riego recomiendan regar los cultivos en surcos como algodón, granos, etc. cuando el porcentaje de humedad volumétrica se acerca al 50%. Para los cultivos de hortalizas, comúnmente se establece al 60% o más, debido a su mayor sensibilidad al estrés hídrico. Estas cantidades o déficits aseguran que el estrés hídrico no sea tan severo que pueda causar una pérdida considerable de la cosecha. (Martin, 2017)

El monitoreo del porcentaje de agua contenido en el suelo es crucial para asegurar que los cultivos Esten recibiendo la cantidad de agua necesaria para su optimo desarrollo, ahorrar agua, ahorrar solución nutritiva y electricidad.

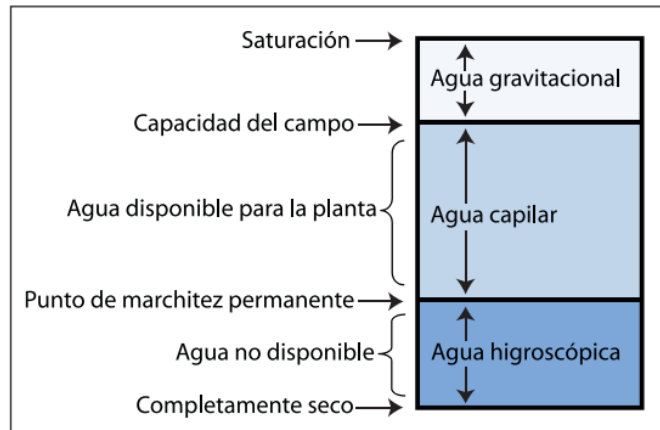
Al monitorear el porcentaje de humedad del suelo se puede tener un control sobre la cantidad de agua que está recibiendo la planta, asegurándose que se encuentre dentro de los niveles óptimos de desarrollo. Con ello, es posible optimizar la producción y ahorrar recursos.

Sobrepasar los límites de humedad admisible para los cultivos supone problemas que pueden llegar a ser fatales para la planta. Un exceso de humedad puede fomentar la proliferación de hongos y enfermedades, puede ocasionar ahogamiento de la raíz, problemas en los procesos de la planta, malformación de hojas y frutos, aborto de flores y pudrición de la planta. Por otro lado, un nivel muy bajo de humedad puede provocar daños por deshidratación, malformación de las hojas y frutos, pérdida de hojas y flores, crecimiento lento y débil. (Enciso, Porter, & Périès, 2007)

Se tiene algunos conceptos que son útiles para comprender el comportamiento del agua en el suelo y como los cultivos reaccionan a la falta o exceso de esta:

- **La capacidad de campo:** Contenido de agua en el suelo después de aplicar un riego saturando el sustrato de esta y luego de que el agua ha drenado, dejando solamente el agua retenida.
- **El punto de marchitez permanente:** Cuando el suelo se ha secado y el porcentaje volumétrico de agua ha caído tanto que las plantas no pueden absorber más agua, provocando daños que no se pueden recuperar y los tejidos se marchitan aun cuando se les adiciona suficiente humedad. Este parámetro varía de acuerdo a las especies de las plantas y al tipo de suelo, y ha sido determinado por experimentos en invernaderos.
- **El agua higroscópica:** Ocurre cuando el porcentaje volumétrico de agua cae por debajo del punto de marchitez permanente. Es agua que está retenida fuertemente por las partículas del suelo y no puede ser extraída por las raíces de la planta.
- **El agua disponible para la planta:** Es el agua que está plenamente disponible para las plantas. Se encuentra entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. Éste depende de factores tales como la estructura del suelo y sus propiedades físicas.

Figura 15 *Parámetros del contenido de agua en el suelo.*



Nota: Tomado de Enciso, Porter, & Périès (2007)

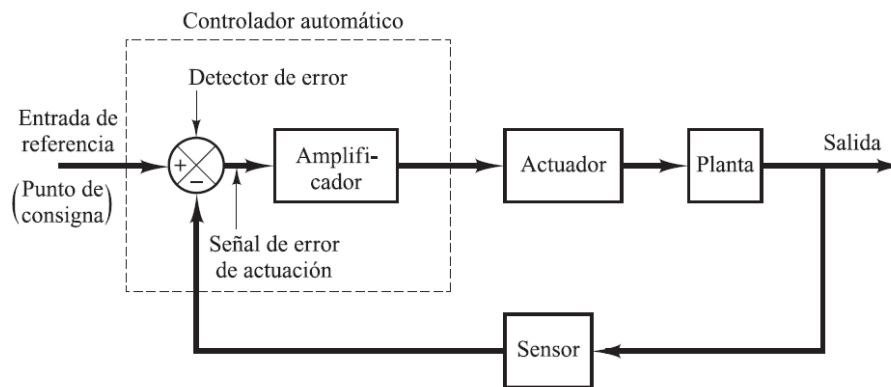
- **El contenido volumétrico de agua del suelo:** Es un parámetro que indica el contenido de agua en el suelo y la relación entre el volumen de agua en el suelo y el volumen total del suelo. Se expresa como un porcentaje (%). El porcentaje de humedad volumétrica del suelo es una medida fundamental en la agricultura y la gestión de recursos hídricos.
- **Déficit permitido en el manejo del riego (DPM):** Es el porcentaje volumétrico de agua en el suelo al cual no se debe permitir bajar para evitar el estrés hídrico de la planta por falta de agua. Bajar más de este punto supone entrar al punto de marchitez permanente.
- **El déficit permitido (DPM)** dependerá de la especie de cultivo que se esté llevando, el nivel de déficit permitido recomendado para la mayoría de cultivos ronda alrededor del 50%. Para cultivos sensibles a la sequía, como en muchas hortalizas, el déficit permitido puede ser tan bajo como de un 25% por la exigencia hídrica del cultivo.

2.4. Sistemas de control orientados a los invernaderos

2.4.1. Sistema de control automatizado

Un sistema de control es un conjunto de elementos relacionados entre sí con el fin de realizar un objetivo en común. El concepto de sistema puede abarcar fenómenos físicos, biológicos, químicos, etc. Siempre que se necesite gestionar y controlar las acciones de un sistema dinámico (cuyo estado varía con el tiempo) para mantener o modificar su comportamiento para cumplir con un objetivo; la implementación de un sistema de control automatizado es la mejor alternativa para cumplir los objetivos de una manera más eficiente. (Ogata, 2010)

Figura 16 Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.



Nota: Sistema de control de automatización con realimentación en lazo cerrado. Tomado de Ogata (2010)

Los sistemas de control contienen varias partes que trabajan juntas para cumplir con los objetivos deseados, estas son:

- **Variable controlada:** también llamada variable de proceso, es el fenómeno o magnitud que se quiere medir y controlar. Usualmente, la variable controlada es la salida del sistema.
- **Variable manipulada:** también llamada señal de control, es la condición que el controlador va a modificar para hacer variar a la variable controlada para alcanzar el objetivo deseado.
- **Set point:** es el punto de referencia al que se desea que la variable controlada se aproxime.
- **Error:** diferencia entre el set point y el valor actual de la variable controlada.
- **Planta:** objeto físico o conjunto de elementos que se van a controlar.
- **Sensor:** dispositivo encargado de medir el valor de la variable controlada.
- **Controlador:** elemento encargado de recibir la información que brinda el sensor, interpretarla y compararla con el set point para decidir qué acción tomar para modificar la variable controlada y que esta se acerque al valor del set point.

Comúnmente los sistemas de control pueden encontrarse como sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado.

Un sistema de lazo abierto es aquel sistema en el que no se mide la señal de salida ni se realimenta para compararla con la entrada (el set point). Es un sistema que basa su funcionamiento en una condición de operación fija, el sistema solo ejecuta el funcionamiento de la planta y no se tiene sensores que permitan monitorear la variable de proceso y así realizar cambios. Son sistemas de construcción y mantenimiento simples, económicos, pero no tienen forma de asegurar que la salida tenga el valor que se desea ni de realizar modificaciones para alcanzar objetivos deseados.

Un sistema de lazo cerrado o sistema de realimentación es aquel sistema que mediante el uso de un sensor se monitorea el valor de la variable de proceso, comparándola con un set point obteniendo un error (diferencia entre la variable de control y el set point) para alimentar al controlador, el cual interpreta la información y ejecuta las acciones necesarias para que la salida alcance el valor deseado. (Ogata, 2010)

2.4.2. Elementos de un sistema de invernadero

a. El Controlador

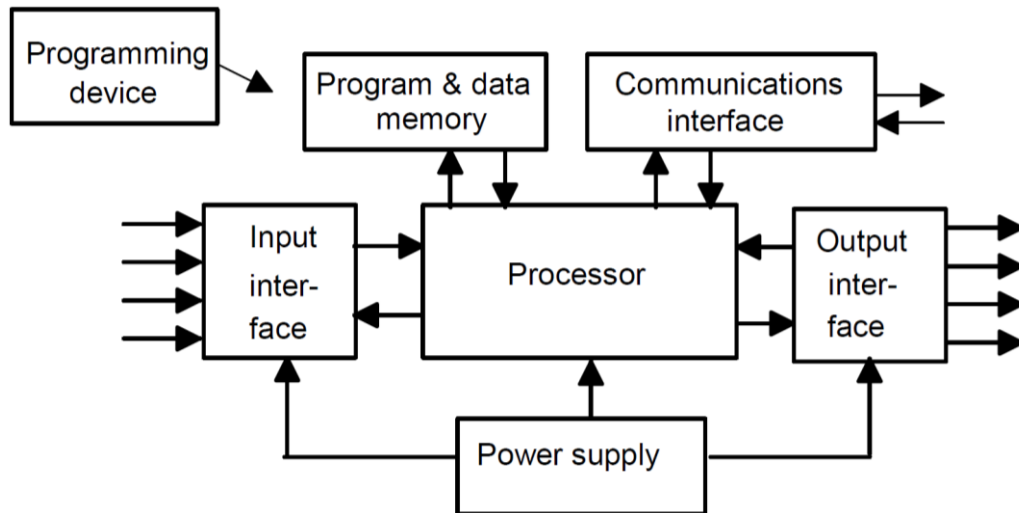
El corazón del sistema es el controlador, este es el elemento más importante pues tiene la función de recibir la información que entregan los sensores, interpretarla y procesarla para tomar decisiones sobre cómo actuar y enviar órdenes a los actuadores para modificar los valores de las variables de proceso.

Los sistemas de control industrial son costosos en gran parte debido a los controladores, ya que estos tienen que cumplir con ciertas exigencias de robustez y seguridad. Por otro lado, los sensores y actuadores también tienen que cumplir con esas exigencias para que haya compatibilidad entre los componentes del sistema de control y este pueda operar correctamente en entornos exigentes y hostiles.

Como el controlador es el elemento de mayor importancia, todo el sistema de control se diseña de tal forma que todos los sensores y actuadores involucrados sean compatibles con este, que operen con los mismos rangos de tensión y corriente, que tengan los mismos protocolos de comunicación, que tengan los niveles de robustez y seguridad adecuados, entre otros. (Bolton, 2006)

Los controladores industriales tienen los típicos componentes que tendría un computador convencional como los que vemos en la siguiente imagen:

Figura 17 Estructura interna de un controlador industrial.



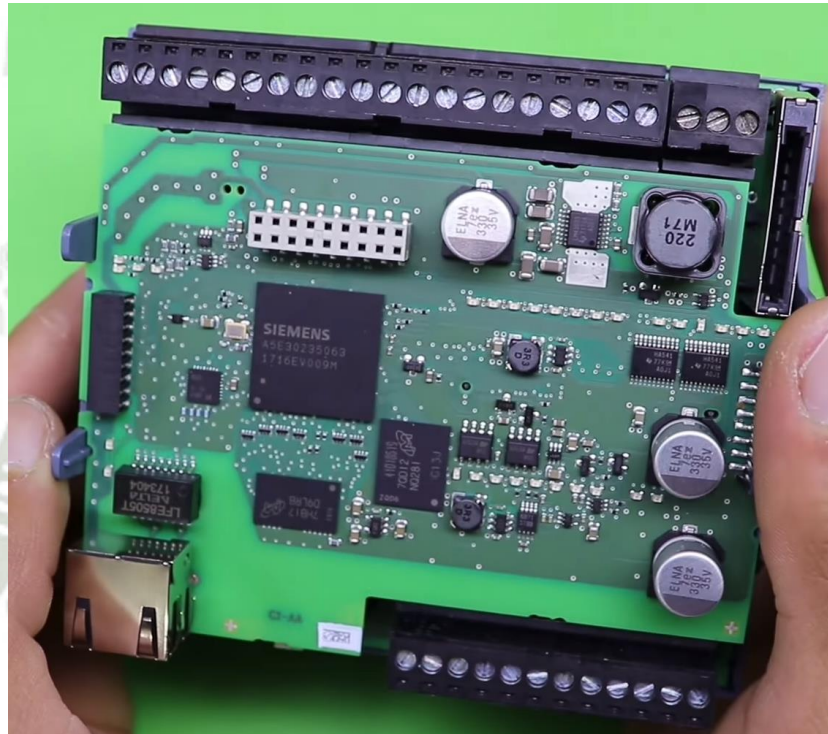
Nota: Estructura electrónica interna de un controlador en la que se aprecian sus componentes. Es prácticamente la misma de un ordenador común y corriente, la diferencia es la aplicación a la que está destinado. Tomado de Bolton (2006)

Un controlador industrial es un dispositivo electrónico que se basa en microcontroladores para interpretar información y tomar decisiones. Los controladores generan instrucciones se pueden usar para implementar funciones como secuencias, temporización, conteo, lógica, y aritmética. Los controladores industriales están diseñados para ser utilizados por técnicos e ingenieros, por lo que utilizan lenguajes de programación de alto nivel para facilitar la programación. (Bolton, 2006)

EL PROCESADOR:

También llamado unidad central de procesamiento (CPU) o microprocesador, es el elemento más importante del controlador y es el encargado de interpretar las señales de entrada para tomar acciones de acuerdo a la programación almacenada en su memoria.

Figura 18 *Arquitectura Interna de un PLC.*



Nota: Se puede apreciar un integrado de mayor tamaño que dice SIEMENS, este es el procesador del PLC. Tomado de: <https://www.electroallweb.com/>

Consiste en un conjunto de circuitos integrados impresos en una placa de silicio y son de dimensiones muy pequeñas (de ahí el término microprocesador). Se compone básicamente de los siguientes elementos:

1. **Unidad de Control (UC):** Es la encargada de deprecionar instrucciones, decodificarla y generar señales de control en función de la instrucción para que el resto de unidades se pongan a trabajar para ejecutarla correctamente.
2. **Unidad Aritmético Lógica (ALU):** Es la unidad encargada de manipular los datos y realizar cálculos matemáticos y operaciones lógicas (AND, NOT, OR, etc.) para el procesamiento de datos.

3. Unidades de Memoria: Las unidades de memoria en un microprocesador son áreas específicas de almacenamiento dentro de la CPU que se utilizan para ejecutar y gestionar las operaciones del procesador. Estas unidades de memoria desempeñan un papel fundamental en el procesamiento de datos y en la ejecución de instrucciones por parte del microprocesador. Permiten almacenar las instrucciones que conforman el programa principal y los datos, estas pueden ser principalmente de los siguientes tipos:

- **Memoria no volátil:** También llamada memoria principal, es un tipo de memoria de almacenamiento que retiene la información incluso cuando la alimentación eléctrica se apaga o se corta. A diferencia de la memoria volátil, como la memoria RAM, que pierde todos los datos cuando se apaga la energía, la memoria no volátil conserva la información de manera permanente o hasta que se borre o sobrescriba intencionalmente. Hay 3 principales tipos de memoria no volátil, estos son:
 - a) **Memoria Flash:** memoria que se puede borrar y reprogramar eléctricamente, ideal para aplicaciones donde los datos deben poder actualizarse o modificarse, como en los dispositivos de almacenamiento de datos y los sistemas operativos.
 - b) **Memoria ROM (Read Only Memory):** memoria en la que los datos no se pueden borrar ni reprogramar, ideal para aplicaciones donde los datos deben ser permanentes, como en los firmwares y los BIOS.
 - c) **Memoria EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory):** memoria en la que los datos se pueden borrar y reprogramar eléctricamente, pero solo un número limitado de veces, ideal para aplicaciones donde los datos deben poder actualizarse o modificarse ocasionalmente. Tienen menos capacidad de almacenamiento y velocidad que las memorias flash, pero por lo general son más económicas. (SIEMENS, 2018)
- **Memoria volátil:** También llamada memoria RAM (Random Acces Memory), es un tipo de memoria de almacenamiento temporal utilizada para almacenar datos. La el contenido de la memoria RAM se borra cuando se apaga o se reinicia la computadora, es decir, es "volátil" en el sentido de que no retiene la información de manera permanente. Es un tipo de memoria de alta velocidad con capacidad de almacenamiento limitada y sirve para gestionar los datos de las funciones y aplicaciones que se están ejecutando.

FUENTE DE ALIMENTACIÓN:

Es un componente que proporciona la energía eléctrica necesaria para alimentar y hacer funcionar al controlador y demás componentes del sistema de control. Es esencial para garantizar que el controlador y otros componentes del sistema reciban la tensión y la corriente eléctrica adecuadas para su funcionamiento correcto. (SIEMENS, 2014)

Figura 19 Fuente de Alimentación para PLC Marca SIEMENS.



Nota: Tomado de: SITOP power supply, SIEMENS, 2022,
<https://mall.industry.siemens.com/mall/es/es/Catalog/Products/10087339>

Esta convierte la corriente alterna (CA) de la red eléctrica en corriente continua (CC) con parámetros de voltaje y corriente adecuados para el correcto funcionamiento de los dispositivos del sistema de control. A nivel industrial, el voltaje nominal de trabajo de un sistema de control está definido por la **Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC)** bajo la norma IEC 61131-2 como 24 voltios de corriente continua (Vdc), sin embargo, para algunas aplicaciones también se puede considerar otros valores de voltaje como 12V, 5V y 3.3V. Para la mayoría de las aplicaciones no industriales el voltaje se limita a 5V o 12V.

La elección de la fuente de alimentación es un punto importante ya que esta se selecciona de acuerdo a los voltajes de operación tanto del controlador como de los sensores utilizados, además de la cantidad de corriente que esta debe ser capaz de soportar. Distintos

fabricantes de controladores recomiendan tener una fuente externa para alimentar los sensores y no contar con la fuente interna del propio controlador. (SIEMENS, 2014)

ENTRADAS Y SALIDAS:

Son puntos de conexión que permiten que el controlador se comunique con el mundo exterior. Las entradas permiten que el controlador reciba datos del mundo exterior (por ejemplo, los datos que provienen de los sensores), mientras que las salidas permiten que el controlador envíe datos al mundo exterior (la conmutación de motores y otros actuadores). (Schneider Electric, 2024)

A continuación, se hará mención sobre algunos de los controladores industriales comúnmente usados en un sistema de control de invernadero:

a.1. Controladores Lógicos Programables (PLC)

Un PLC, o también llamado autómatas programable, es un dispositivo electrónico especializado en el control y automatización de procesos industriales. Los PLC surgieron en la década de 1960 como respuesta a la necesidad de hacer más simple la lógica de contactos de tableros eléctricos. (Schneider Electric, 2024)

Figura 20 *PLC SIEMENS S7-1200*



Nota: Tomado de: SIEMENS, SIMATIC S7-1200, 2024,
<https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industria1/plc/s7-1200.html>

La lógica de contactos de tableros eléctricos se basaba en el uso de una serie de dispositivos electromecánicos como contactores, temporizadores, contadores, relays, etc.

todos estos dispositivos estaban conectados mediante cables. Estos sistemas tenían muchos problemas como:

- **La complejidad de las conexiones**, ya que por la cantidad de elementos y conexiones era muy fácil cometer un error.
- **La dificultad en el mantenimiento**, ya que cuando fallaba alguna conexión o dispositivo era muy complicado ubicar y corregir el error.
- **Eran muy costosos**, mientras más complejo era el sistema a controlar más complicada era la configuración del tablero y más costoso se volvía, por la cantidad de componentes involucrados.
- **Eran sistemas rígidos muy difíciles de modificar**, ya que para hacer alguna mejora o modificación era necesario hacer reconexiones.

Con la llegada de los PLC se solucionaron estos problemas ya que estos son dispositivos electrónicos que utilizan programación lógica para resolver problemas de automatización.

El PLC es un equipo electrónico inteligente diseñado en base a microprocesadores, que son utilizados para automatizar sistemas eléctricos, electrónicos, neumáticos e hidráulicos de control discreto y análogo. Las múltiples funciones que pueden asumir estos equipos en el control, se deben a la diversidad de operaciones a nivel discreto y análogo con que dispone para realizar los programas lógicos sin la necesidad de contar con equipos adicionales. (Bolton, 2006)

Las principales ventajas de los sistemas que utilizan PLC son las siguientes:

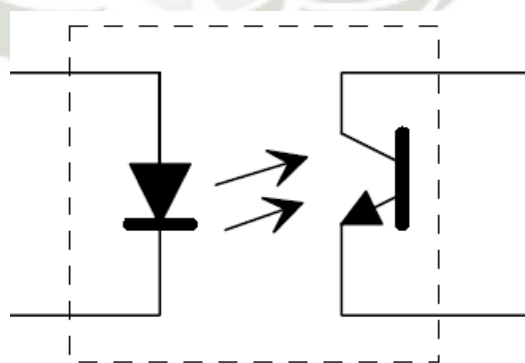
- **Simplifican mucho la complejidad del sistema**, estos pueden reemplazar dispositivos como contadores, relés auxiliares y contadores con unidades internas de memoria. Esto hace que el volumen del conexionado y la cantidad de elementos físicos requeridos se reduzca mucho.
- **Son más económicos y versátiles**, dependiendo del tipo de aplicación, el uso de los PLC supone un ahorro significativo ya que se reduce la cantidad de elementos y conexiones a utilizar, además las aplicaciones que se pueden realizar son prácticamente ilimitadas sin importar cuán complejas puedan ser.

- **Son flexibles y de fácil mantenimiento**, cuando ocurren errores es fácil identificar la fuente de la falla, además que para modificar alguna parte del sistema basta con modificar las instrucciones del programa principal.
- **Tienen una gran interconectividad**, los PLC permiten la adquisición de datos en tiempo real y la comunicación entre distintos dispositivos mediante protocolos de comunicación como ETHERNET, HART, PROFIBUS, entre otros.

Los PLC son similares a las computadoras, ambos se componen básicamente de los mismos elementos, sin embargo, las computadoras comunes son dispositivos frágiles que son incapaces de operar bajo condiciones industriales, esa es la gran diferencia con los PLC. Estos dispositivos están diseñados para operar en entornos industriales y tienen algunas características que los diferencian de las computadoras normales:

- **Son dispositivos robustos**, ya que están diseñados para operar en condiciones de vibración, temperatura, humedad, polvo y ruido. Además, las entradas y salidas están aisladas del exterior, esto provee un mecanismo de protección muy robusto pudiendo separar circuitos, con lo que se diferencia de los computadores ordinarios y otros dispositivos. Para el caso de entradas y salidas discretas, que operan a 24Vdc, cuentan con optoacopladores que separan ópticamente los circuitos como vemos en la siguiente imagen.

Figura 21 Símbolo de un Optoacoplador



Nota: Tomado de Bolton (2006).

El optoacoplador es un elemento que integra un diodo emisor de luz infrarroja y un fototransistor. Cuando el diodo del primer circuito recibe un impulso, este se activa emitiendo luz con lo que activará al fototransistor del segundo circuito cerrándolo y permitiendo el paso de corriente.

Para el caso de las salidas que operan con corriente alterna, 220Vac, se utilizan como mecanismos de protección a los relés que separan electromecánicamente a los circuitos y a los optotriac que son similares a los optoacopladores, pero en vez de un fototransistor se utiliza un fototriac.

Esta es una característica fundamental de este dispositivo, el aislamiento de circuitos, y es lo que hace que estos sean dispositivos robustos a los cuales se les puede conectar directamente los sensores y actuadores.

Sin las protecciones, el dispositivo sería vulnerable a subidas y bajadas de tensión y demás condiciones que pueden destruir los circuitos internos, además que no se podrían manejar diferentes tipos de corrientes (24Vdc y 220Vac). (Bolton, 2006)

- **Se programan fácilmente**, están diseñados para trabajar con lenguajes de programación de fácil comprensión que se ocupa principalmente de la lógica y la conmutación. Estos lenguajes están específicamente desarrollados para el tratamiento de funciones de automatismo, de modo que ni su instalación ni su uso requieren conocimientos avanzados de informática. Los lenguajes que se usan en los PLCs están establecidos por la norma IEC 61131-3 que define 4 lenguajes de programación normalizados: diagrama de contactos o LADDER, diagrama de bloques funcionales como el GRAFCET, lenguaje de texto estructurado y lenguaje de lista de instrucciones.

Los PLC son dispositivos que, como ya se explicó, son robustos y confiables; esto se debe a que están diseñados entorno a normas y protocolos que garantizan el correcto funcionamiento del equipo, permiten la estandarización y brindan confianza. Esto es lo que diferencia a los PLC de dispositivos como el Arduino, la Raspberry PI y otros controladores no normalizados. Algunas de las normas bajo la cual se construyen los PLC son:

- **IEC 61131- 1:** norma sobre controladores programables que define las especificaciones de los sistemas basados en Controladores Lógicos Programables tanto en hardware como en software.
- **IEC 61131- 2:** norma que habla sobre las especificaciones y ensayos en los equipos. Esta norma identifica y define las características más relevantes a la hora de seleccionar y usar un PLC y sus dispositivos asociados. Las definiciones hacen referencias como:

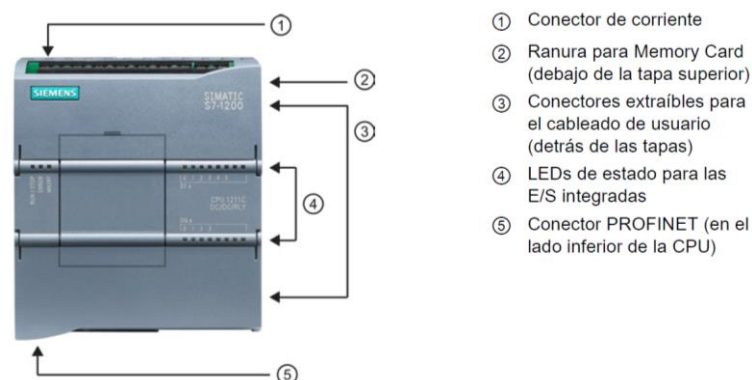
- Los voltajes nominales de trabajo, para corriente continua 24-48Vdc siendo más común 24Vdc y para corriente alterna 110-220Vac.
 - Entradas y salidas, deben tener dispositivos de protección que aíslen los circuitos.
 - Entradas analógicas, define los rangos de voltios y amperes que se pueden manejar y especifica que debe haber dispositivos de protección que aíslen los circuitos.
 - Compatibilidad electromagnética.
 - Condiciones de funcionamiento ante vibraciones.
 - Funcionamiento ante diferentes condiciones ambientales.
 - Contar con acoples para riel DIN.
 - Contar con dispositivos que permitan asegurar las conexiones eléctricas.
- **IEC 61131-3:** norma que define los lenguajes de programación aplicables para los PLC.

Existen muchas marcas y modelos de PLC, sin embargo, para los objetivos de esta investigación se analizarán las características de un PLC comúnmente utilizado en el Perú, este es el PLC de SIEMENS modelo S7 1200. (SIEMENS, 2014)

PLC SIEMENS S7 1200

Es un PLC de gama media desarrollado por Siemens, es uno de los PLC más populares y se utiliza en una amplia gama de aplicaciones industriales como automatización de máquinas y control de procesos.

Figura 22 PLC SIEMENS S7 1200



Nota: Partes principales del PLC S7 1200 de SIEMENS. Tomado de (SIEMENS, 2014)

A continuación, se presentará una tabla en la que se mencionaran las principales características de 2 modelos comunes de este dispositivo:

Tabla 1 Características del PLC SIEMENS S7-1200

PROPIEDADES	CPU 1212C	CPU 1214C
Memoria de carga (no Volátil)	1 MB	4 MB
Memoria RAM	50 KB	75 KB
Entradas Digitales	8	14
Entradas Analógicas	2	2
Salidas Digitales	6 (relé)	10 (relé)
Expandible con módulos de ampliación	SI	SI
Velocidad del procesador (para funciones matemáticas)	2.3 μ S/ instrucción (434.78 MHz)	2.3 μ S/ instrucción (434.78 MHz)
Reloj de tiempo real	SI	SI
Tensión de alimentación	120-240 V AC	120-240 V AC
Frecuencia de alimentación	50-60 Hz	50-60 Hz
Consumo de corriente interno (a 240 VAC, solo el CPU)	40 mA	50 mA
Tensión de trabajo interna	24 V DC	24 V DC
Corriente máxima por entrada digital	4 mA	4 mA
Corriente máxima de la fuente interna (alimentación de sensores)	300 mA	400 mA
Corriente máxima por salida digital (relé)	2 A	2 A
Aislación de seguridad eléctrica	SI	SI
Puerto	ETHERNET	ETHERNET
Cuenta con protocolos de comunicación	SI (PROFIBUS, FIELDBUS, MODBUS, HART, etc)	SI (PROFIBUS, FIELDBUS, MODBUS, HART, etc)
Compatibilidad a sensores digitales	Todo tipo de sensores 24 V DC	Todo tipo de sensores 24 V DC
Compatibilidad a sensores analógicos	-10 a 10 V DC 0 – 20 mA	-10 a 10 V DC 0 – 20 mA
Requiere Licencia de Software	SI	SI
Requiere capacitación técnica para su uso	SI	SI
PRECIO	S/. 1300	S/. 1700

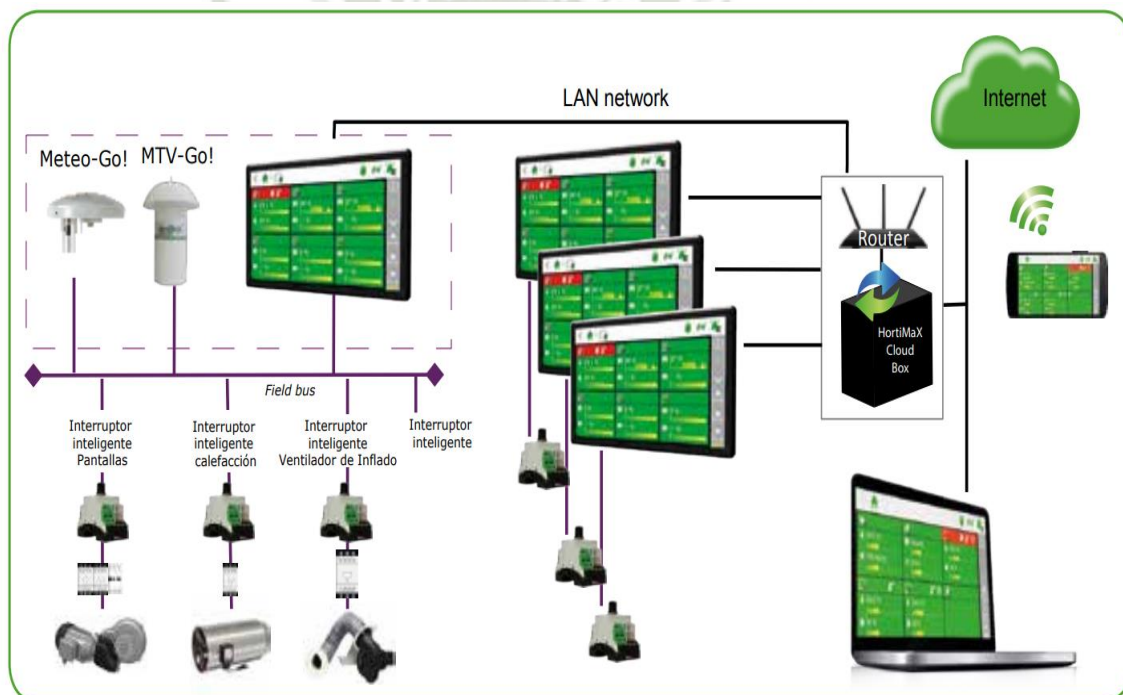
Nota: Tabla comparativa de las características de los modelos CPU 1212C y CPU 1214C. Tomado de (SIEMENS, 2014).

a.2. Controlador Ridder Hortimax – GO!

El Ridder HortiMaX-Go! es un sistema de control simple y modular para automatizar grandes extensiones de cultivos.

El controlador viene incorporado en un ordenador de panel individual que incluye una pantalla táctil y su propio sistema operativo. El software se compila automáticamente en función del equipo conectado y el costo del software se incluye en el precio de los componentes por lo que no se requiere adquirir la licencia. (Ridder, 2021)

Figura 23 Sistema HortiMax-GO! de Ridder



Nota: Tomado de Ridder (2021).

El controlador no está conectado directamente con los sensores y actuadores, sino que se conecta a un dispositivo intermedio que la marca denomina Interruptor Inteligente. El controlador recibe información procesada para luego enviar señales de control o conectarse a otros dispositivos por medio de una red local o Wifi. Cada interruptor inteligente se comunica de forma bilateral con el controlador central a través de un cable de red compartido (PROFIBUS).

Los interruptores inteligentes son de fácil instalación mediante el sistema de bus digital, el cual además permite la conexión entre un interruptor inteligente ampliando la red.

El sistema se puede expandir hasta con 32 interruptores inteligentes lo que da una gran cantidad de entradas y salidas. El controlador reconoce automáticamente cada equipo conectado y no es necesario hacer configuraciones extras al programa principal.

Cada interruptor inteligente cuenta con 14 entradas/ salidas, sin embargo, no se especifica cuantas son analógicas y digitales.

HortiMax es un sistema cerrado que, si bien opera bajo una tensión estándar de 24 V DC y puede conectarse a una red local y Wifi, que no brinda mucha información técnica sobre sus componentes y, además, es prácticamente incompatible con dispositivos que no pertenezcan a la línea HortiMax de Ridder.

A diferencia de un PLC, que puede interactuar directamente con el entorno del sistema a automatizar, el controlador de HortiMax necesariamente requiere de los interruptores inteligentes y otros dispositivos que vienen en un paquete, lo cual eleva el costo de adquisición. (Ridder, 2021)

A continuación, se presentará una tabla en la que se mencionarán las principales características de este sistema:

Tabla 2 Características del Sistema HortiMax-Go! de Ridder.

PROPIEDADES	HORTIMAX GO! Para un paquete básico que incluye el panel de control HortiMaz, un controlador, la fuente de alimentación, un juego de sensores y un interruptor inteligente.
Memoria de carga (no Volátil)	16 GB
Memoria RAM	4 GB
Entradas/Salidas	14
Expandible con módulos de ampliación	Si, hasta 32 módulos
Reloj de tiempo real	SI
Velocidad del procesador	No especifica
Tensión de alimentación	110-220V AC
Frecuencia de alimentación	50-60Hz
Consumo de corriente	1.8 A
Tensión de trabajo interna	24 V DC

Corriente máxima por entrada digital	No específica
Corriente máxima de la fuente interna (alimentación de sensores)	No específica
Corriente máxima por salida digital (relé)	No específica, pero indica que requiere relés auxiliares
Aislación de seguridad eléctrica	SI
Puerto	ETHERNET
Cuenta con protocolos de comunicación	SI (Wifi, , FIELDBUS)
Compatibilidad a sensores digitales	Solo compatible con sensores Hortimax
Compatibilidad a sensores analógicos	Solo compatible con sensores Hortimax
Requiere Licencia de Software	NO
Requiere capacitación técnica para su uso	NO
PRECIO (el precio es del paquete básico de control)	€ 2000 (S/.7981.87)

Nota: Tomado de Ridder (2021).

a.3. Controlador Irritec Commander EVO

El programador Commander EVO es un sistema de control de riego y clima para plantaciones agrícolas de medianas y grandes extensiones al aire libre o bajo invernaderos. Es un sistema modular que puede adaptarse a las necesidades de cualquier invernadero y son ideales para cultivos en hidroponía. (Irritec, 2019)

Figura 24 Controlador Commander EVO de Irritec



Nota: Tomado de (Irritec, 2019)

Estos programadores gestionan los parámetros de riego, además, mediante un software se puede controlar de forma remota por internet. Cuentan con una serie de módulos de ampliación y accesorios que permiten adaptar los sistemas a las necesidades del cultivo.

El para sistemas básicos, el controlador puede programarse manualmente desde la consola del mismo por lo que no requiere de personal técnico capacitado. Pero a medida que la extensión y complejidad del sistema aumenta, y si se suma el uso de ordenadores para el control, se requerirá que el personal reciba capacitación para poder realizar la instalación, programación y mantenimiento del sistema.

El manual de usuario indica que el controlador opera con una tensión estándar de 24V DC, pero no especifica la compatibilidad con sensores. Tampoco se indica otros datos técnicos ya que para cada parte del sistema hay un módulo específico. (Irritec, 2019)

La marca recomienda a los programadores Commander EVO GOLD especialmente para el control de invernaderos. A continuación, se presentará una tabla en la que se mencionaran las principales características de este controlador:

Tabla 3 Características del Controlador Commander EVO Gold de Irritec

PROPIEDADES	COMMANDER EVO GOLD
Memoria de carga (no Volátil)	No se especifica
Memoria RAM	No se especifica
Entradas Digitales	16 (4 son para sensores específicos y 10 son configurables)
Entradas Analógicas	4 (son para sensores específicos, no son configurables)
Salidas Digitales (A 24 V DC)	24
Expandible con módulos de ampliación	SI
Reloj de tiempo real	SI
Velocidad del procesador	No se especifica
Tensión de alimentación	230 V AC
Frecuencia de alimentación	60 Hz
Consumo de corriente interno	No se especifica
Tensión de trabajo interna	24 V DC
Corriente máxima por entrada digital	No se especifica
Corriente máxima de la fuente interna	No se especifica
Corriente máxima por salida digital	2 A
Aislación de seguridad eléctrica	SI
Puerto	RS-232
Cuenta con protocolos de comunicación	SI (GMS, SMS, RADIO, Wifi)
Compatibilidad a sensores digitales	sensores 24 V DC
Compatibilidad a sensores analógicos	sensores 24 V DC
Requiere Licencia de Software	NO, Viene incorporada
Requiere capacitación técnica para su uso	SI

PRECIO

\$. 1500

(S/. 5613.75)

Nota: Tomado de (Irritec, 2019)

A continuación, se hará mención sobre los controladores no industriales y/o de entrenamiento más utilizados para múltiples aplicaciones y proyectos:

a.4. Arduino

Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de usar. El proyecto Arduino surge en 2005, cuando varios estudiantes del Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea, Italia se reunieron e idearon una plataforma que permitiera que los estudiantes de electrónica tengan una alternativa económica que facilite el acceso y uso de la electrónica y programación, (ARDUINO, 2024).

Figura 25 *Arduino MEGA 2560*



Nota: Tomado de ARDUINO (2024) <https://www.arduino.cc/>.

La plataforma Arduino consiste en una placa electrónica de circuito impreso (PCB) de hardware libre, que incorpora componentes electrónicos como un microcontrolador y una serie de pines hembra HEADER (o espadín como comúnmente se los conoce) que permiten conectar la placa a otros dispositivos. Esta placa está diseñada para que el usuario final pueda empezar directamente a desarrollar aplicaciones electrónicas. Al ser de hardware libre cualquiera puede copiar su diseño y arquitectura sin necesidad de pagar por los derechos de autor, esto consolidó a Arduino como un hito en el mundo de la electrónica.

El software de Arduino consiste en un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) y una biblioteca de funciones. Al ser software libre, su código es accesible por cualquiera para

utilizarlo sin necesidad de realizar pagos de licencias para el uso del mismo. El desarrollo del IDE de Arduino se inspiró a raíz de los lenguajes Wiring y Processing, los cuales a su vez están basados e C++ y Java.

Arduino está diseñado específicamente para la electrónica embebida (sistema de procesamiento encapsulado y compacto que realiza una función en específico) y es excelente para proyectos que involucran interacción directa con sensores y actuadores. Tiene un enfoque simple y directo en la programación de hardware. La placa tiene un consumo muy bajo de energía, es capaz de realizar operaciones en tiempo real e interactuar directamente con los dispositivos conectados. Está basada en microcontroladores de la marca ATMEL que son fáciles de usar, su arquitectura es amigable, son económicos, son de fácil interconexión con sensores y actuadores; y tienen respaldo de una gran comunidad de desarrolladores.

A continuación, se presentarán las características principales de la Placa Arduino MEGA 2560 ya que esta es la que tiene mayor salidas y entradas por lo que se utilizara para aplicaciones de grandes prestaciones, esta placa se basa en el microcontrolador ATMEGA 2560 de la marca ATMEL.

Tabla 4 *Características del Arduino MEGA 2560*

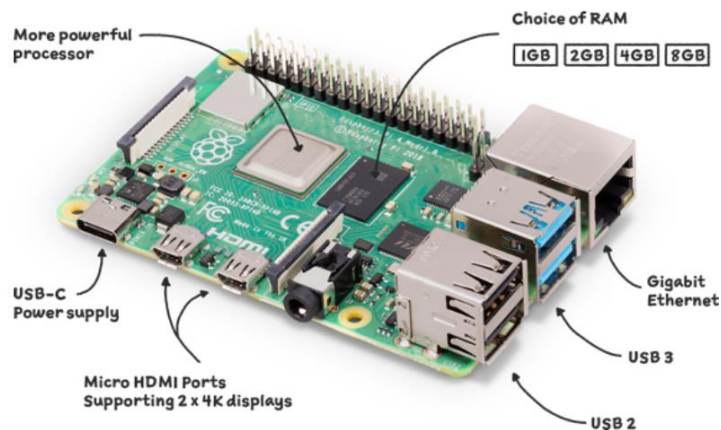
PROPIEDADES	Arduino MEGA 2560
Memoria de carga (o no volátil)	256 KB (memoria Flash)
Memoria Volátil	8 KB (memoria SRAM, es una RAM estática de alta velocidad)
Entradas/Salidas Digitales	54
Entradas Analógicas	16
Expandible con módulos de ampliación	SI
Reloj de tiempo real	NO
Velocidad del procesador	16 MHz
Tensión de alimentación (cuando se alimenta por el conector tipo Jack)	7-12 V DC (Se recomienda 7 V porque el regulador de voltaje interno NCP1117 regula idealmente de 7 a 5 VDC, el resto lo disipa en forma de calor)
Consumo de corriente interno	1 mA

Tensión de trabajo interna	5 V DC
Corriente máxima por entrada/salida digital	20 mA (la corriente de dos los pines de E/S no pueden exceder los 200 mA)
Corriente máxima de la fuente interna	800 mA (200 mA para las E/S digitales y 300 para la salida de 5v)
Aislación de seguridad eléctrica	NO (es vulnerable)
Puerto	USB tipo B
Cuenta con protocolos de comunicación	SI (I2C, SPI, UART)
Compatibilidad a sensores digitales	Todo tipo de sensores 5 V DC
Compatibilidad a sensores analógicos	0-5 V DC
Requiere Licencia de Software	NO
Es de hardware libre	SI
Requiere capacitación técnica para su uso	NO
PRECIO	S/. 200 Al ser de hardware libre se puede adquirir genéricos desde S/. 80

Nota: Tomado de ARDUINO (2024) <https://www.arduino.cc/>.

a.5. Raspberry Pi

Es una placa de desarrollo que fue concebida por la Raspberry Pi Foundation, la cual es una organización benéfica con sede en el Reino Unido que desarrolla una serie de microordenadores con objetivos didácticos, fue fundada en 2009 por Eben Upton, ingeniero de Cambridge. Sin embargo, los primeros diseños de la primera placa de prueba se empezaron a realizar en 2006. La primera Raspberry Pi fue puesta a la venta un 2012 y desde entonces, se han lanzado varios tipos de ordenadores con diferentes potencias y tamaños. (Raspberry Foundation, 2024)

Figura 26 *Raspberry Pi 4*

Nota: Tomado de Raspberry Foundation (2024)
<https://www.raspberrypi.com>

A diferencia de Arduino las placas Raspberry no son de hardware libre, la fundación que las diseña y fabrica mantiene el control del hardware por lo que es necesario comprar dispositivos originales ya la copia y reproducción del dispositivo no está permitida.

La placa Raspberry Pi es un microordenador que funciona con un sistema operativo, a diferencia de la placa Arduino que consta de un software ejecutable, por lo que es más lenta al momento de controlar directamente sensores y actuadores. El sistema operativo que utilizan, el cual sí es de código abierto, este se llama Raspbian, pero también se pueden instalar otros sistemas operativos, como el GNU/Linux, y algunas versiones de Windows 10.

Esta placa cuenta con un microprocesador, unidades de memoria, tarjeta de video, entradas y salidas digitales y analógicas, pero la característica que la hace brillar es la capacidad de comunicación ya que cuenta con una alta capacidad de comunicación con otros dispositivos como por ejemplo USB, HDMI, ETHERNET, Wifi, entre otras. Estas características hacen que la Raspberry Pi sea ideal cuando se tiene un alto procesamiento de información, procesamiento de audio y video, interconectividad con otros dispositivos e internet.

A continuación, se presentarán las características principales de la Raspberry Pi 4 ya que esta es uno de los últimos modelos y tiene características más interesantes. Este modelo en particular cuenta con el microprocesador Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC.

Tabla 5 Características de la Raspberry Pi 4

PROPIEDADES	Raspberry Pi 4
Memoria de carga (o no volátil)	No tiene (requiere incorpora una memoria SD y admite hasta 68 GB)
Memoria Volátil	8 GB (de a 8 de memoria RAM dependiendo el modelo)
Entradas/Salidas Digitales	40
Entradas Analógicas	No tiene (requiere conversor análogo digital A/D)
Expandible con módulos de ampliación	SI
Reloj de tiempo real	NO
Velocidad del procesador	1.8 GHz
Tensión de alimentación (cuando se alimenta por el conector tipo USB)	5 V DC
Consumo de corriente interno	500 mA (modo reposo, modo activo puede llegar a 800 mA)
Tensión de trabajo interna	5 V DC
Corriente máxima por pines de entrada/salida digital	16 mA (la corriente de dos los pines de E/S no pueden exceder los 100 mA)
Corriente máxima de la fuente interna (considerando todos los periféricos como USB, Wifi, etc)	1.2 A (adicional a los 500 mA para el consumo)
Aislación de seguridad eléctrica	NO (es vulnerable)
Puerto	ETHERNET/USB
Cuenta con protocolos de comunicación	SI (USB, Wifi, HDMI, etc)
Compatibilidad a sensores digitales	3.3 V DC
Compatibilidad a sensores analógicos	NO (requiere conversor AD externo)
Requiere Licencia de Software	NO
Es de hardware libre	NO
Requiere capacitación técnica para su uso	NO
PRECIO	S/. 350

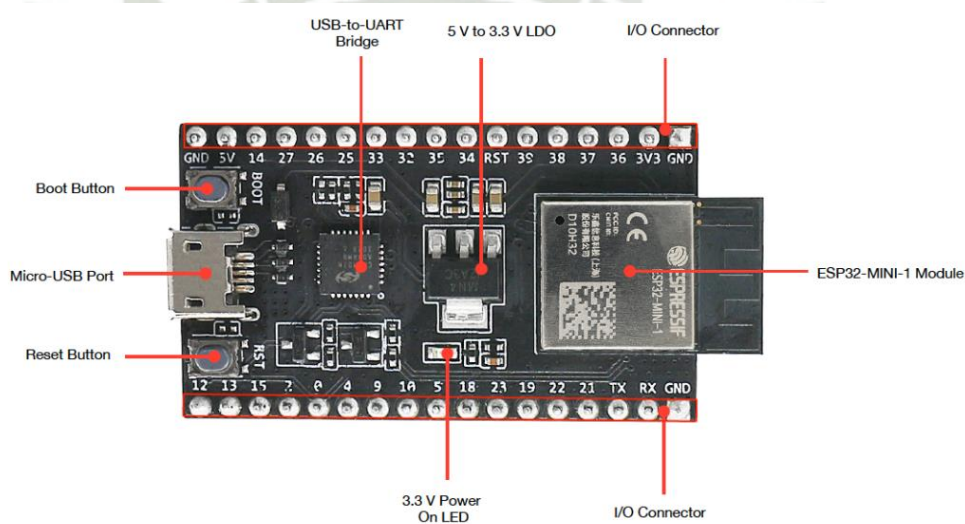
Nota: Tomado de Raspberry Foundation (2024)

<https://www.raspberrypi.com>

a.6. ESP32

ESP32 es una familia de microcontroladores desarrollados por la empresa Espressif Systems, la cual es una empresa pública multinacional de semiconductores sin fábrica establecida en 2008, con oficinas en China, la República Checa, India, Singapur y Brasil. Las principales características que destacan de esta familia de microcontroladores es que son de bajo costo, alto rendimiento y están diseñados especialmente para tener una amplia interconectividad y para dar soluciones de internet de las cosas (IoT). (Espressif Systems, 2024)

Figura 27 Placa de desarrollo ESP32 DEVKIT V1



Nota: Tomado de Espressif Systems (2024) <https://www.espressif.com>

El ESP32, a diferencia del Arduino y la Raspberry Pi, no es una placa de desarrollo sino es un microcontrolador el cual puede ser incorporado a un sinnúmero de placas para diversos propósitos. Su versatilidad y potencia lo hacen adecuado para una variedad de aplicaciones, desde estaciones meteorológicas y dispositivos de automatización del hogar hasta sistemas de control remoto y monitoreo en tiempo real.

El ESP32 cuenta con un procesador Tensilica Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 con 600 DMIPS que es un procesador de dos núcleos que operan a velocidades de hasta 240 MHz. Esto proporciona un mayor rendimiento en comparación con muchos otros microcontroladores de un solo núcleo. La empresa Espressif Systems ofrece, además, tarjetas de desarrollo que incorporan al mismo microcontrolador ESP32. La más conocida de estas es la ESP32 DEVKIT V1.

La placa puede ser programada de varias formas, la propia empresa Espressif Systems ha desarrollado un software específicamente diseñado para controlar la placa llamado ESP-IDF, pero también se programa con los lenguajes de programación Micro Python y LUA, además que es compatible con el IDE de Arduino.

La ESP32 DEVKIT V1 cuenta con ventajas respecto a otras tarjetas, como la Arduino por ejemplo, esta es más económica y es más poderosa. Sin embargo, también cuenta con algunas desventajas como el voltaje de sus E/S el cual es de 3.3 V DC por lo que dificulta la conexión con sensores ya que la mayoría de estos están configurados bajo el estándar de 5 V DC por lo que necesita de conversores DC-DC.

Cuando está trabajando al máximo de sus capacidades usando sus puertos, el Wifi, el Bluetooth, puede consumir más energía. Al ser un dispositivo más complejo, su programación también es más compleja porque exige tener más conocimientos sobre gestión de memorias y configuración de hardware. Una última desventaja notable es que, al ser un producto relativamente nuevo, no cuenta con tanto apoyo de la comunidad de desarrolladores sobre todo en la compatibilidad de librerías.

A continuación, se presentarán las características principales de la placa ESP32 DEVKIT V1.

Tabla 6 *Características de la ESP32 DEVKIT V1*

PROPIEDADES	ESP32 DEVKIT V1
Memoria de carga (o no volátil)	4 MB (memoria Flash expandible hasta 16 MB)
Memoria Volátil	520 KB (memoria SRAM expandible hasta 8 MB)
Entradas/Salidas Digitales	34
Entradas Analógicas	18
Expandible con módulos de ampliación	SI
Reloj de tiempo real	SI
Velocidad del procesador	240 MHz
Tensión de alimentación (cuando se alimenta por el conector tipo USB)	5 V DC
Consumo de corriente interno	10 μ A (en modo Deep sleep)

Tensión de trabajo interna	3.3 V DC
Corriente máxima por pines de entrada/salida digital	40 mA (la corriente de todos los pines de E/S no pueden exceder los 1.2 A)
Corriente máxima de la fuente interna (considerando todos los periféricos como USB, Wifi, etc)	1.2 A
Aislación de seguridad eléctrica	NO (es vulnerable)
Puerto	MICRO USB
Cuenta con protocolos de comunicación	SI (USB, Wifi, I2C, etc)
Compatibilidad a sensores digitales	3.3 V DC
Compatibilidad a sensores analógicos	Solo de 3.3 V DC
Requiere Licencia de Software	NO
Requiere capacitación técnica para su uso	NO
PRECIO	S/. 40

Nota: Tomado de Espressif Systems (2024) <https://www.espressif.com>

b. Sensores

Como se explicó en el punto 2.5.1, los parámetros principales sobre los que se tiene que tener control para tener un buen sistema de automatización de invernadero son: la temperatura ambiental, la humedad relativa y la humedad del suelo. Para tener control sobre éstos, se requiere del uso de una serie de sensores los cuales tienen que ser compatibles con el tipo de controlador que se va a utilizar.

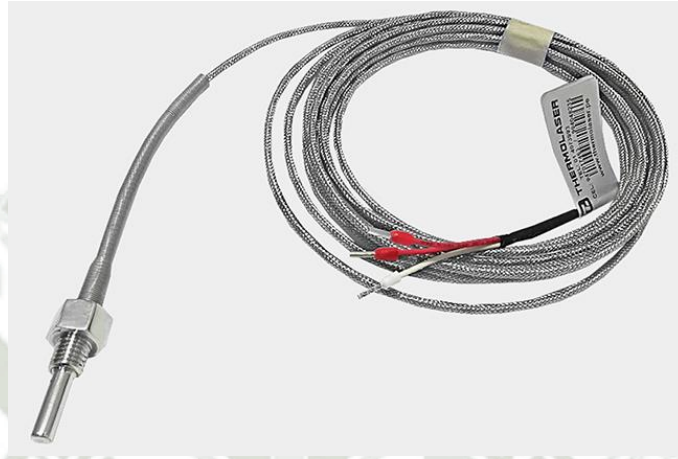
A continuación, se hará mención sobre algunos de los sensores industriales comúnmente usados en un sistema de control de invernadero:

b.1. Sensores de temperatura ambiental

Son dispositivos eléctricos o electrónicos compuestos por materiales que tienen la capacidad de variar sus propiedades dependiendo del cambio de temperatura, lo que permite así realizar mediciones. Los más utilizados son aquellos que varían su resistencia eléctrica en función de la temperatura o los que generan una leve fuerza electromotriz ante el cambio de temperatura. Estos sensores requieren ir conectados con dispositivos intermedios de

acondicionamiento de señal para que los controladores puedan recibir y reconocer las señales emitidas.

Figura 28 *Sensor de temperatura de 3 hilos*



Nota: Tomado de <https://www.thermolaser.pe/>

- **Detector de Temperatura Resistivo (RTD)**

Es un sensor que consta de un conductor metálico que varía el valor de su resistencia eléctrica conforme varía la temperatura. Las más comúnmente utilizadas son las de platino (Pt 100) que tienen un valor de 100 ohmios a 0°C y 138.5 ohmios a los 100°C. Son sensores bastante robustos y cuentan con una precisión de 0,1°C. (Perdigones, Peralta, Nalasco, Muñoz, & Pascual, 2004)

Figura 29 *RTD Industrial.*



Nota: Tomado de <https://www.grainger.com/> (GRAINGER, 2024)

Estos sondas no se pueden conectar directamente a los controladores ya que estos sensores entregan valores en ohmios, por lo que requieren de dispositivos de acondicionamiento de señal para adaptar el valor óhmico del sensor a magnitudes que el controlador puede interpretar. Usualmente se usa transmisores TX91 los cuales acondicionan la señal de la RTD Pt00 de ohmios a mili amperios (4 – 20 mA) para que el controlador pueda ser capaz de recibir la información. (Sánchez-Guerrero, Lorenzo, Fernández, & Medrano, 2022)

Existen también sondas Pt100 con transmisor integrado, en estas la distancia entre sensor y sistema de adquisición de datos no afecta a la medida, lo que es una gran ventaja en condiciones de invernadero donde las distancias pueden ser extensas.

A continuación, se presentarán las principales características de la RTD Pt 100:

Tabla 7 Características de una RTD Pt100

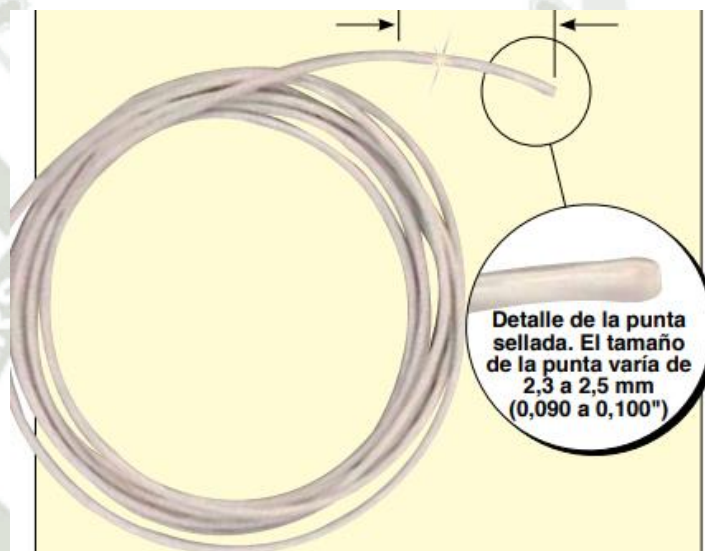
PROPIEDADES	RTD Pt100 de 3 hilos
Tipo de sensor	Analógico
Tensión de alimentación	24 V DC
Rango de resistencia	(92.55Ω a -18°C) a (175.84Ω a 200°C)
Fondo de escala (rango de temperatura)	-18°C a 200°C
Precisión	±0.1°C
Exactitud	±0,3°C
Resolución	0.1°C
PRECIO	S/. 200

Nota: Tomado de <https://www.grainger.com/> (GRAINGER, 2024)

- **Termistor**

Son sensores cuyo funcionamiento es similar a las RTD pero a diferencia de éstas, los termistores están formados a partir de materiales semiconductores. Estos miden la variación de la resistencia eléctrica del material semiconductor en función de la temperatura. (Sánchez-Guerrero, Lorenzo, Fernández, & Medrano, 2022)

Figura 30 *Termistor Industrial de 2 Hilos.*



Nota: Tomado de <https://es.omega.com/>

Los termistores se clasifican en dos tipos principales: termistores NTC (coeficiente de temperatura negativo) y termistores PTC (coeficiente de temperatura positivo).

Los termistores NTC tienen una resistencia que disminuye a medida que aumenta la temperatura. Este comportamiento se debe a que la resistividad de los materiales semiconductores disminuye a medida que aumenta la temperatura. Los termistores PTC tienen una resistencia que aumenta a medida que aumenta la temperatura. Este comportamiento se debe a que la resistividad de los materiales semiconductores aumenta a medida que aumenta la temperatura.

Normalmente se utilizan del tipo NTC ya que tienen mayor sensibilidad que los termómetros de resistencia de platino Pt100.

A continuación, se presentarán las principales características de un termistor NTC:

Tabla 8 Características de un Termistor NTC

PROPIEDADES	Termistor OMEGA NTC HSTH-44000
Tipo de sensor	Analógico
Tensión de alimentación	24 V DC
Rango de resistencia	(201Ω a -50°C) a (57.5Ω a 150°C)
Fondo de escala (rango de temperatura)	-50°C a 150°C
Precisión	±0.1°C
Exactitud	±0,25°C
Resolución	0.05°C
PRECIO	S/. 180

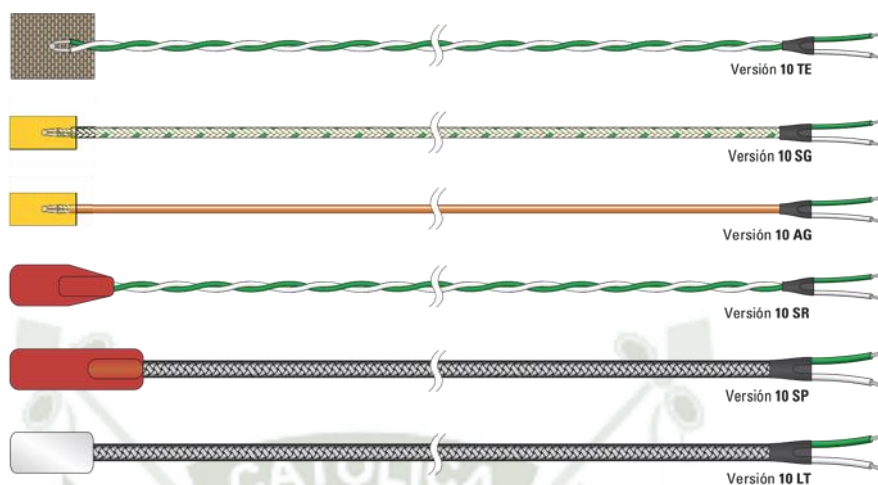
Nota: Tomado de <https://es.omega.com/>

- **Termopar**

Es un transductor térmico, capaz de convertir la energía calorífica en energía eléctrica. A diferencia de las RTD y los termistores, no necesitan una fuente de alimentación externa para su funcionamiento. Su principio de medida se basa en el efecto Seebeck, en el cual cuando dos conductores metálicos distintos se unen en un punto (unión caliente), al exponerse a cambios de temperatura generan una fuerza electromotriz, el voltaje generado será proporcional a la temperatura.

Hay diferentes tipos de termopares, según el tipo de metales que se combinan, el más utilizado en medidas ambientales es el Tipo T (Cobre-Constantan). Son sensores baratos y responden más a los cambios de temperatura que las termorresistencias, aunque su precisión es inferior y necesitan de un dispositivo que permita acondicionar la señal para que el controlador la pueda interpretar. (Sánchez-Guerrero, Lorenzo, Fernández, & Medrano, 2022)

Figura 31 *Diferentes Modelos de Termopares.*



Nota: Tomado de TC Medida y Control de Temperatura, S.A (2023)

A continuación, se presentarán las principales características de una termocupla tipo T:

Tabla 9 *Características de una Termocupla tipo T*

PROPIEDADES	Termocupla tipo T
Tipo de sensor	Analógico
Tensión de alimentación	No requiere (pero el transmisor requiere una alimentación de 24 V DC)
Rango de voltaje	(-1.48 mV a -40°C) a (5.47 mV a 125°C)
Fondo de escala (rango de temperatura)	-40°C a 125°C
Precisión	±0.1°C
Exactitud	±0.5°C
Resolución	0.2°C
PRECIO	S/. 200

Nota: Tomado de TC Medida y Control de Temperatura, S.A (2023)

A continuación, se hará mención sobre algunos de los sensores no industriales comúnmente usados en un sistema de control de invernadero:

- **Sensor de temperatura LM35**

Es un sensor de temperatura analógico utilizado tanto en aplicaciones industriales como no industriales, es económico, fácil de usar y de tamaño pequeño. Es un sensor muy popular por su fácil uso y variadas aplicaciones. No necesita de ningún circuito adicional para ser usado, se alimenta con un rango de 4 -30 V, por lo que es compatible con la mayoría de los controladores y dispositivos de desarrollo, así como los industriales y tiene un consumo interno de 60 μ A.

Figura 32 *Sensor LM35.*



Nota: Tomado de Texas Instruments (1999).

Proporciona una salida de voltaje proporcional a la temperatura y está calibrado directamente en grados Celsius, lo que significa que no es necesario realizar ninguna calibración externa.

El principio de funcionamiento del sensor LM35 se basa en el efecto Seebeck, que es la generación de una diferencia de potencial entre dos metales diferentes cuando se encuentran a diferentes temperaturas. El sensor LM35 está fabricado con un material semiconductor que tiene una resistencia que varía con la temperatura. Cuando el sensor se calienta, la resistencia del material semiconductor disminuye. Esta disminución de la resistencia provoca una diferencia de potencial entre los dos terminales del sensor. Por cada grado Celsius que varía, se produce una variación de 10 milivoltios en la salida del sensor (sensibilidad 10mV/°C). (Texas Instruments, 1999)

Este sensor tiene algunas desventajas como una baja precisión, exactitud y resolución, son susceptibles a condiciones ambientales de humedad, son frágiles y producen autocalentamiento por el propio consumo interno con lo que la medición es inexacta.

A continuación, se presentarán las principales características del sensor LM35 más común que es fabricado por la compañía Texas Instruments:

Tabla 10 Características del sensor de temperatura LM35D

PROPIEDADES	LM35 D
Tipo de sensor	Analógico
Tensión de alimentación	5 V DC (admite entre 4 – 30 V DC)
Fondo de escala (rango de temperatura)	0°C a 100°C
Precisión	±1°C
Exactitud	±2°C
Resolución	1°C
PRECIO	S/. 10

Nota: Tomado de Texas Instruments (1999)

- **Sensor de temperatura DS18B20**

El DS18B20 es un sensor de temperatura digital de alta precisión fabricado por Maxim Integrated. Se utiliza principalmente en proyectos de electrónica y prototipos debido a su facilidad de uso, precisión y capacidad para funcionar con múltiples sensores en la misma línea de datos. (Maxim Integrated, 2019)

Figura 33 *Sensor Digital DS18B20.*



Nota: Tomado de <https://naylorlampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/16-sensor-de-temperatura-digital-ds18b20.html>

El sensor de temperatura digital DS18B20 utiliza el protocolo 1-Wire para comunicarse. Este protocolo necesita solo un pin de datos para comunicarse y permite conectar más de un sensor en el mismo bus y tiene una resolución configurable de 9 a 12 bits de resolución.

Opera según el principio de cambio en la resistencia eléctrica con respecto a la temperatura utilizando una sonda de termopar digital, que es un dispositivo semiconductor cuya resistencia eléctrica cambia en función de la temperatura y tiene un consumo de 1 mA.

A continuación, se presentarán las principales características del sensor DS18B20:

Tabla 11 *Características del sensor de temperatura DS18B20*

PROPIEDADES	DS18B20
Tipo de sensor	Digital
Tensión de alimentación	5 V DC (admite entre 3.3 – 5.5 V DC)
Fondo de escala (rango de temperatura)	-55°C a 125°C
Precisión	±0.2°C
Exactitud	±0.5°C
Resolución	0.5°C
PRECIO	S/. 11

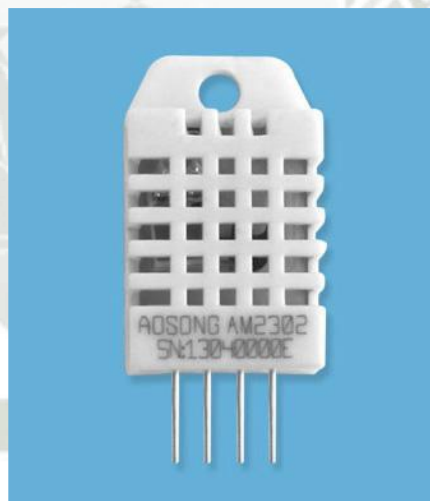
Nota: Tomado de Maxim Integrated (2019)

- **Sensor de temperatura y humedad DHT22**

El sensor DHT22 es un sensor digital que permite realizar mediciones de la temperatura y humedad relativa del aire. El sensor está compuesto por un sensor capacitivo de humedad y un termistor que están integrados en un circuito impreso PCB. El sensor capacitivo de humedad mide la cantidad de humedad en el aire mediante la medición de la capacitancia entre dos electrodos. El termistor mide la temperatura del aire mediante la medición de la resistencia eléctrica de un material semiconductor sensible a la temperatura. (AOSONG, 2020)

El sensor DHT22 utiliza un protocolo de comunicación serial para transmitir los datos de temperatura y humedad al controlador. El protocolo de comunicación serial es un protocolo simple que utiliza un solo pin para transmitir los datos.

Figura 34 *Sensor de Humedad y Temperatura DHT22.*



Nota: Tomado de AOSONG (2020).

El fabricante recomienda utilizar una resistencia de 4.7K Ohm en modo Pull-up, entre el pin de datos y vcc para asegurar el correcto funcionamiento del sensor. Permite una transmisión de señal hasta 20 metros de distancia por cable. Tiene un consumo interno de 500 μ A y la señal de salida son cadenas de 40 bits. (AOSONG, 2020)

A continuación, se presentarán las principales características del sensor DHT22:

Tabla 12 Características del sensor DHT22

PROPIEDADES	DHT22
Tipo de sensor	Digital
Tensión de alimentación	5 V DC (voltaje recomendado)
Fondo de escala (rango de temperatura)	0°C a 100°C
Precisión	±0.2°C
Exactitud	±0.5°C
Resolución	0.1°C
PRECIO	S/. 30

Nota: Tomado de (AOSONG, 2020)

b.2. Sensores de humedad relativa

Un sensor de humedad ambiental es un dispositivo que permite detectar el porcentaje de vapor de agua del aire. Su nombre técnico es higrómetro y suelen venir en presentaciones que integran un sensor de temperatura, cuando vienen en esta configuración se les llama termo-higrómetros.

En condiciones de invernadero se utilizan normalmente dos tipos de sensores con diferente principio de medida: de resistencia o de capacitancia.

- **Higrómetro ambiental resistivo:** Consiste en dos electrodos metálicos separados entre los que se coloca una película conductora. A medida que aumenta la humedad del aire la película conductora absorbe más vapor de agua lo que hace que su resistencia disminuya y a su vez también disminuye la resistencia entre los terminales de los dos electrodos. La resistencia entre terminales puede entonces relacionarse con la humedad relativa. Una desventaja que tiene es que su tiempo de respuesta es alto y la fiabilidad es baja a valores extremos de humedad relativa. (Sánchez-Guerrero, Lorenzo, Fernández, & Medrano, 2022)

- **Higrómetro ambiental capacitivo:** Mide el cambio de capacitancia provocado por la absorción de agua de un material dieléctrico. Es un pequeño sensor que consta de dos electrodos entre los que se encuentra un material dieléctrico. Este material puede absorber el agua del aire, de manera que la capacitancia del sensor aumenta linealmente con la humedad relativa. Tienen un alto grado de sensibilidad a niveles bajos de humedad, donde proveen una respuesta relativamente rápida. Su principal inconveniente es que a valores de humedad superiores al 85% el sensor tiene una tendencia a saturar y la respuesta se transforma en no lineal. Este tipo de sensores son susceptibles de ser contaminados por partículas como el polvo por lo que se protegen con una cápsula porosa. (Sánchez-Guerrero, Lorenzo, Fernández, & Medrano, 2022)

A continuación, se hará mención sobre algunos de los sensores industriales comúnmente usados en un sistema de control de invernadero:

- **Sensor de humedad MTH100**

El MTH100 producido por marca española SRC es un sensor - transmisor de temperatura y humedad de alto rendimiento diseñado para la medición de temperatura y humedad ambiental en interiores.

Figura 35 Sensor de Humedad y Temperatura MTH100.



Nota: Tomado de SRC Especialistas en Regulación y Control de Temperatura (2024) <https://srcsl.com/>

Consta de un integrado capaz de detectar temperatura y humedad protegido y encapsulado en una probeta por lo que es un dispositivo robusto y es ideal para condiciones ambientales adversas. Es compatible con protocolo de comunicación RS485 MODBUS por lo que permite comunicarse con una amplia gama de controladores. La tensión de alimentación recomendada es de 24 V DC por lo que es compatible con la mayoría de los controladores, tiene un consumo interno de 15mA y en configuración de salidas analógicas entrega valores de 4-20 mA. (SRC Especialistas en Regulación y Control de Temperatura, 2024).

A continuación, se presentarán las principales características del sensor MTH100 de la marca SRC:

Tabla 13 Características del sensor MTH100

PROPIEDADES	MTH100
Tipo de sensor	Analógico
Tensión de alimentación	24 V DC (admite entre 15 – 36 V DC)
Fondo de escala (rango de humedad)	0% - 99.9% de HR
Precisión	±1% HR
Exactitud	±3% HR
Resolución	0.1% HR
PRECIO	S/. 200

Nota: Tomado de SRC Especialistas en Regulación y Control de Temperatura (2024) <https://sresl.com/>

- **Sensor de humedad Thies CLIMA 1.1005.54.241**

Thies CLIMA es una empresa originaria de Göttingen, Alemania con más de 75 años de experiencia en el desarrollo y producción de sensores y sistemas de medición para proyectos de meteorológica y climatológica. El sensor con **TAG 1.1005.54.241** consiste en un sensor que integra un sensor de humedad capacitivo y una PT 100 integrados en

un solo dispositivo el cual esta encapsulado y protegido por una sonda. Es un dispositivo robusto y resistente a condiciones ambientales de alta humedad y radiación solar y resistente al polvo.

Figura 36 Sensor de Humedad Thies CLIMA 1.1005.54.241



Nota: Tomado de Thies Clima (2023) <https://www.thiesclima.com/>

Es compatible con protocolo de comunicación RS485 MODBUS por lo que permite comunicarse con una amplia gama de controladores. La tensión de alimentación recomendada es de 24 V DC por lo que es compatible con la mayoría de los controladores, tiene un consumo interno de 15mA y en configuración de salidas analógicas entrega valores de 4-20 mA. (Thies Clima, 2023)

A continuación, se presentarán las principales características del sensor Thies Clima 1.1005.54.241:

Tabla 14 Características del sensor Thies CLIMA 1.1005.54.241

PROPIEDADES	Thies CLIMA 1.1005.54.241
Tipo de sensor	Analógico
Tensión de alimentación	24 V DC (admite entre 12 – 30 V DC)
Fondo de escala (rango de humedad)	0% - 100% de HR
Precisión	±0.5% HR
Exactitud	±2% HR
Resolución	0.1% HR
PRECIO	S/. 350

Nota: Tomado de Thies Clima (2023) <https://www.thiesclima.com/>

A continuación, se hará mención sobre algunos de los sensores no industriales comúnmente usados en un sistema de control de invernadero:

- **Sensor HS1101**

Es un sensor capacitivo de humedad relativa que utiliza el principio de capacitancia para medir la humedad. Es un sensor asequible y versátil cuyo diseño consiste en un elemento sensible que reacciona a las variaciones en la capacitancia del aire causadas por la presencia de vapor de agua. Proporciona mediciones rápidas y precisas pudiendo operar en un amplio rango de temperaturas y condiciones ambientales.

Figura 37 Sensor de Humedad Relativa HS1101.



Nota: Tomado de HUMIDREL (2022) <http://www.humirel.com>

El fabricante, HUMIDREL, indica que para conectarlo a un controlador es necesario utilizar un circuito externo por lo que se reduce su practicidad en aplicaciones reales ya que no tiene conexión directa.

A continuación, se presentarán las principales características del sensor HS1101:

Tabla 15 Características del sensor HS1101

PROPIEDADES	HS1101
Tipo de sensor	Analógico
Tensión de alimentación	5 V DC
Fondo de escala (rango de humedad)	0% - 99% de HR
Precisión	±1.5% HR

Exactitud	$\pm 5\%$ HR
Resolución	0.1%
PRECIO	S/. 25

Nota: Tomado de HUMIDREL (2022) <http://www.humirel.com>

- **Sensor de humedad DHT22**

El sensor de humedad DHT22, también conocido como AM2302, es un dispositivo que es capaz de medir la humedad relativa y la temperatura ambiental. Anteriormente ya se habló de este sensor, pero se indicó sus propiedades como sensor de temperatura.

A continuación, se presentarán las principales características del sensor de humedad del DHT22:

Tabla 16 *Características del sensor de humedad DHT22*

PROPIEDADES	DHT22
Tipo de sensor	Digital
Tensión de alimentación	5 V DC (voltaje recomendado)
Fondo de escala (rango de humedad)	0% - 99.99% de HR
Precisión	$\pm 0.2\%$ HR
Exactitud	$\pm 2\%$ HR
Resolución	0.1% HR
PRECIO	S/. 30

Nota: Tomado de AOSONG (2020)

b.3. Sensores de humedad de suelo

Estos también son higrómetros, pero su construcción está orientada para su uso como sondas para incrustarse en el suelo. Así como en los higrómetros de humedad relativa del aire, también se tienen higrómetros de suelo resistivos y capacitivos. Por otro lado, existe otro sensor de humedad de suelo llamado tensiómetro, el cual mide la tensión o la succión del agua del suelo y consiste de un tubo de plástico lleno de agua y herméticamente cerrado, equipado con un manómetro de vacío en la parte superior y una capsula de cerámica porosa en el extremo inferior.

Para este proyecto nos centraremos únicamente en los sensores resistivos y capacitivos ya que son más asequibles y fáciles de usar. (IRROMETER, 2020)

A continuación, se hará mención sobre algunos de los sensores industriales comúnmente usados en un sistema de control de invernadero:

- **Sensor de humedad del suelo Watermark – Modelo 200SS**

El sensor WATERMARK es un dispositivo fabricado por la empresa estadounidense IRROMETER, la cual tiene más de 70 años fabricando sensores para el sector agropecuario.

Figura 38 *Sensor de Humedad de Suelo WATERMARK – MODELO 200SS.*



Nota: Tomado de IRROMETER (2020) <https://www.irrometer.com/>

El WATERMARK es un dispositivo de detección de resistencia eléctrica en estado sólido que se utiliza para medir la tensión de agua del suelo. A medida que cambia la tensión con el contenido de agua la resistencia también cambia. El sensor consiste en un par de electrodos incrustados en una matriz granular. Se requiere aplicar una corriente es aplicada al sensor para obtener un valor de resistencia. El medidor correlaciona la resistencia directamente a centibares (cb) o kilopascales (kPa) de tensión de agua del suelo. Este sensor está diseñado para ser un sensor permanente, colocado en el suelo para ser monitoreado. Cuenta con un yeso instalado internamente que proporciona compensación para el efecto de los niveles de salinidad encontrados normalmente en los cultivos agrícolas y de jardinería. (IRROMETER, 2020)

Un gran defecto de los sensores resistivos de humedad de suelo es que estos se ven afectados ligeramente por la temperatura y la salinidad, lo que puede hacer variar las mediciones con el tiempo. Requiere de dispositivos externos acondicionadores de señal para poder obtener una señal en tensión o corriente a partir del valor de resistencia registrado y por lo mismo requiere de calibración en campo. Tiene un consumo interno de corriente de 1.5 mA.

A continuación, se presentarán las principales características del sensor de humedad del WATERMARK – MODELO 200SS:

Tabla 17 Características del sensor WATERMARK – MODELO 200SS

PROPIEDADES	WATERMARK – MODELO 200SS
Tipo de sensor	Analógico
Tensión de alimentación	24 V DC (admire entre 3.3 – 30 V DC)
Fondo de escala (rango de humedad)	0 – 239 centibar
Precisión	±0.5 centibar
Exactitud	±1 centibar
Resolución	1 centibar
PRECIO	S/. 150

Nota: Tomado de IRROMETER (2020) <https://www.irrometer.com/>

- **Sensor de humedad del suelo ECH2O MAS - 1 de METER Group**

Este es un sensor capacitivo de humedad volumétrica de suelo desarrollado por METER Group, que es una empresa estadounidense creada en 2016 por la fusión de Decagon Devices INC y UMS AG. (METER Group, 2024)

Figura 39 Sensor de Humedad de Suelo ECH2O MAS - 1.



Nota: Tomado de Enciso, Porter, & Périès (2007).

Es un sensor analógico tipo sonda que mide la constante dieléctrica del suelo para calcular el contenido volumétrico de agua en este. Al contrario de los sensores resistivos, este sensor no se ven afectados por la textura y conductividad eléctrica del suelo.

El sensor emite una señal analógica de 4 – 20 mA como salida, requiere de calibración campo y puede conectarse directamente al controlador.

A continuación, se presentarán las principales características del sensor de humedad del ECH2O MAS - 1:

Tabla 18 Características del sensor ECH2O MAS - 1

PROPIEDADES	ECH2O MAS - 1
Tipo de sensor	Analógico
Tensión de alimentación	24 V DC (tolera entre 12 – 32 V DC)
Fondo de escala (rango de humedad)	0 – 100% HR
Precisión	±0.5% HR ±6% HR
Exactitud	(puede ser menor, pero requiere calibración)
Resolución	0.1% HR
PRECIO	S/. 400

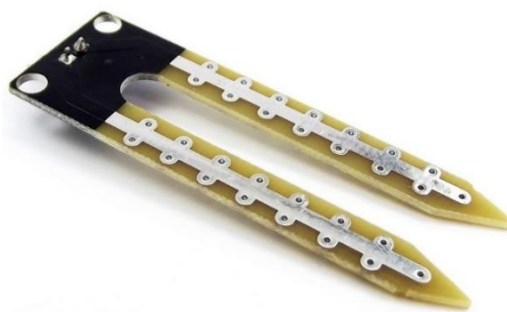
Nota: Tomado de METER Group (2024) <https://www.metergroup.com/>

A continuación, se hará mención sobre algunos de los sensores no industriales comúnmente usados en un sistema de control de invernadero:

- **Sensor de humedad de suelo FC-28**

Es un higrómetro resistivo que consiste en 2 electrodos que pasan corriente a través del suelo, la resistencia entre los electrodos dependerá de la humedad del suelo, para un suelo muy húmedo la resistencia será muy baja y para un suelo muy seco la resistencia será muy alta.

Figura 40 Sensor de Humedad de Suelo FC-28



Nota: Tomado de Naylamp (2023)

Los electrodos van conectados a un acondicionador de señal que entrega una salida digital y otra analógica, la salida digital se activa cuando el nivel de humedad es menor al deseado, este nivel se puede regular con el potenciómetro de la tarjeta, la salida analógica entrega un voltaje de 0 – 5 V DC donde 0 es un suelo muy húmedo y 5 uno muy seco

Es un dispositivo genérico, muy simple y económico, pero es muy susceptible a los cambios en la temperatura y salinidad del suelo; como los electrodos están hechos de materiales económicos, estos se desgastan y corroen fácilmente sobre todo si la hay muchas sales en el suelo.

A continuación, se presentarán las principales características del sensor de humedad del HL-69:

Tabla 19 Características del sensor HL-69

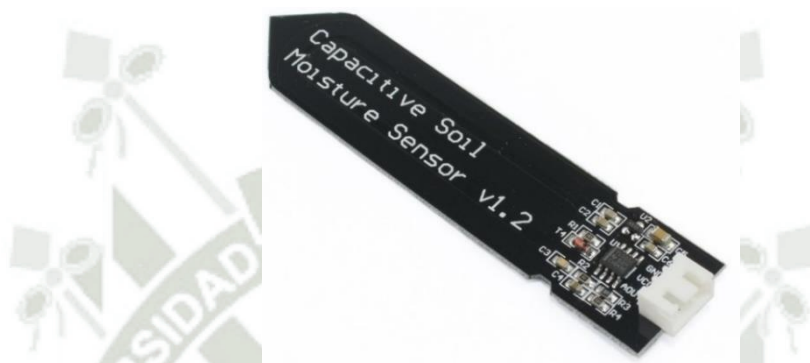
PROPIEDADES	HL-69
Tipo de sensor	Analógico
Tensión de alimentación	5 V DC (tolera entre 3.3 – 5 V DC)
Fondo de escala (rango de humedad)	0 – 100% HR
Precisión	No especifica
Exactitud	±4% HR
Resolución	1% HR
PRECIO	S/. 8

Nota: Tomado de Naylamp (2023)

- **Sensor de humedad de suelo capacitivo**

Es un sensor de humedad de suelo capacitivo analógico que se utiliza para medir la humedad del suelo. El sensor está hecho de un material resistente a la corrosión por lo que tendrá una vida útil considerable.

Figura 41 *Sensor de Humedad Capacitivo.*



Nota: Tomado de Naylamp (2023)

Este sensor viene con la electrónica expuesta, por lo que hay que agregarle un recubrimiento impermeable para proteger los componentes electrónicos. Tiene un consumo interno de 5 mA y emite una señal de salida analógica que va de 0 – 5 V DC. A continuación, se presentarán las principales características del sensor de humedad del sensor:

Tabla 20 *Características del sensor de humedad capacitivo*

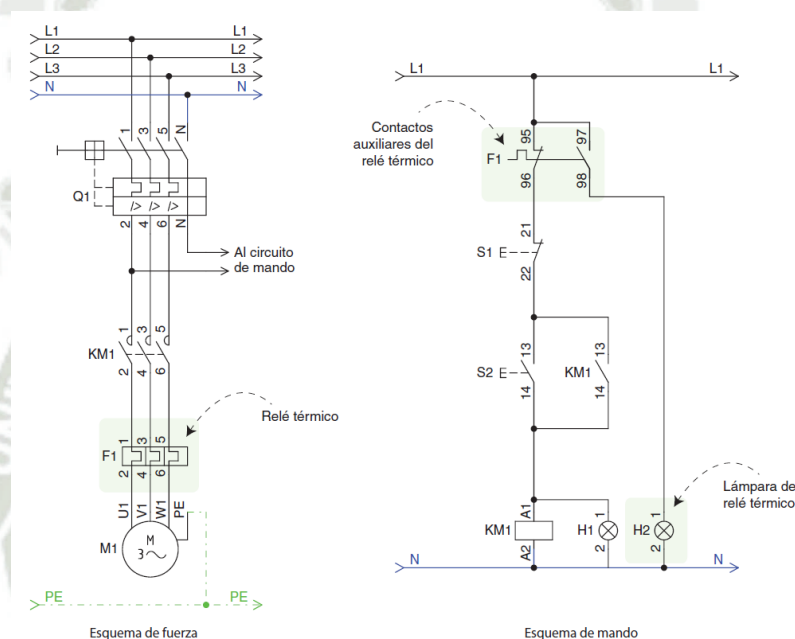
PROPIEDADES	Sensor Capacitivo
Tipo de sensor	Analógico
Tensión de alimentación	5 V DC (tolera entre 3.3 – 5 V DC)
Fondo de escala (rango de humedad)	0 – 100% HR
Precisión	No específica
Exactitud	±2% HR
Resolución	0.1% HR
PRECIO	S/. 10

Nota: Tomado de Naylamp (2023)

2.4.3. Circuitos de mando y de potencia

Antes de implementar un sistema de control es necesario desarrollar el diagrama unifilar, ya que este es una representación gráfica que muestra cómo se conectan los componentes del sistema.

Figura 42 Diagrama de Mando y Potencia.



Nota: Tomado de Suiler Altamirano (2019),
<https://blog.suileraltamirano.com/contenido-03-arranque-directo-de-motor-controlado-por-plc/>

El diagrama unifilar indica la ruta de distribución desde la fuente de alimentación hacia cada uno de los elementos del sistema. Este es un elemento que permite realizar la planificación del cableado eléctrico y distribución de los elementos del sistema, facilita la implementación del sistema, facilita el mantenimiento y permite la estandarización. Proporciona una vista general del sistema eléctrico, sin embargo, no muestra detalles físicos ni dimensiones precisas.

Los diagramas unifilares se elaboran siguiendo la norma IEC 1082-1 que define y fomenta los símbolos gráficos y las reglas numéricas o alfanuméricas que deben utilizarse para identificar los aparatos, diseñar los esquemas y realizar los equipos eléctricos. El uso

de norma elimina todo riesgo de confusión y facilita la puesta en marcha y mantenimiento del sistema.

El diagrama unifilar de un sistema eléctrico se divide en 2: el circuito de mando o control y el circuito de fuerza o potencia. Esta división se realiza para simplificar el diagrama evitando la saturación del mismo y haciéndolo más legible y fácil de entender. Por otro lado, esta división en el diagrama se realiza ya que ambos circuitos cumplen funciones diferentes y operan con rangos de corriente y tensión diferentes por lo que nunca deberían juntarse.

Los circuitos de mando y de potencia son importantes para cualquier sistema eléctrico y ambos dependen uno del otro para que el sistema pueda funcionar. El primero se encarga del control del sistema, que involucra elementos sensores y controladores, mientras que el segundo proporciona la fuerza y la energía necesarias para el funcionamiento de los actuadores del sistema. La comprensión de las funciones y características de ambos tipos de circuitos es fundamental para el diseño, implementación y mantenimiento de sistemas eléctricos eficientes y seguros. (Suiler Altamirano, 2019)

2.5. Estrategias de control comúnmente utilizadas en control de invernaderos

En un primer momento el control de procesos era bastante básico, no existían algoritmos ni estrategias de control. Sin embargo, con forme los procesos y la tecnología avanza, se empezó a exigir un control más preciso y que los procesos se lleven a cabo de manera automática para poder afrontar las exigencias del mercado. Dichas exigencias obligaron a los fabricantes de tecnología al desarrollo de algoritmos, teorías y estudios que permitieran realizar un mejor control de los procesos.

Se descubrió que la mejor manera de controlar un proceso es mediante el análisis de este como un sistema de realimentación o sistema de lazo cerrado. Estos se caracterizan porque proporcionan un control adecuado para procesos continuos.

Para controlar los sistemas se desarrollaron unos dispositivos electrónicos denominados simplemente como controladores, los cuales ejecutan internamente un determinado algoritmo con el objetivo de emitir una señal que permita manipular a la variable de control, la cual actúa directamente sobre el proceso y ocasionara que la variable de proceso alcance el valor establecido por el set point logrando así que el sistema se estabilice. (Mandado Pérez, Marcos Acevedo, Fernández Silva, & Armesto Quiroga, 2009)

Existen diferentes algoritmos matemáticos que tienen como objetivo lograr que la variable de proceso alcance el valor fijado por el set point. Dentro de las clasificaciones de los controladores, se tienen 2 grupos que son los más utilizados:

- **Controladores no lineales**, que se caracterizan porque realizan un algoritmo no lineal y su actuación es del tipo todo-nada.
- **Controladores lineales continuos**, que se caracterizan porque realizan un algoritmo lineal y su actuación es continua en el tiempo.

Actualmente hay una serie de estrategias de control que se aplican a los distintos procesos industriales que existen, a continuación, se hará mención de los más utilizados en la industria y aquellos que tienen aplicaciones directas en el control de cultivos bajo invernadero. (Mandado Pérez, Marcos Acevedo, Fernández Silva, & Armesto Quiroga, 2009)

2.5.1. Control Todo o nada (on/ off)

Es uno de los primeros tipos de control que se desarrollaron y también es el más sencillo, es de naturaleza no lineal por lo que los sistemas que se gobiernan con este controlador no pueden ser analizados mediante el uso de funciones de transferencia. Sin embargo, se utiliza en muchas aplicaciones como el control de temperatura.

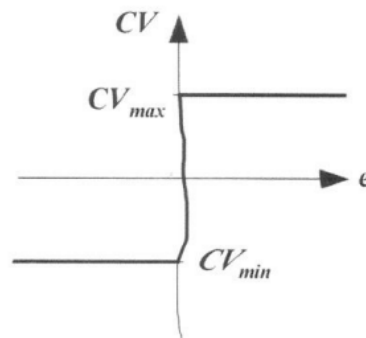
Este tipo de control puede ser útil en sistemas donde la oscilación en la acción correctiva no ocasiona problemas ni al controlador ni al sistema en sí.

Es una estrategia de control en la que el elemento de actuación sólo tiene dos posiciones fijas, que, en muchos casos, son simplemente encendido y apagado. El control de dos posiciones o de encendido y apagado es relativamente simple y barato, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

El controlador todo-nada básico opera únicamente comparando el set point con la variable de proceso recogida por el sensor con el fin de obtener un error. Si el error es diferente de cero, se activará o desactivará el actuador que comanda al sistema.

Este tipo de control todo-nada es simple y solo permite establecer acciones correctivas mínima y máxima, por lo que puede llegar a provocar oscilaciones muy bruscas que, dependiendo del sistema, podría llegar a dañar a los componentes.

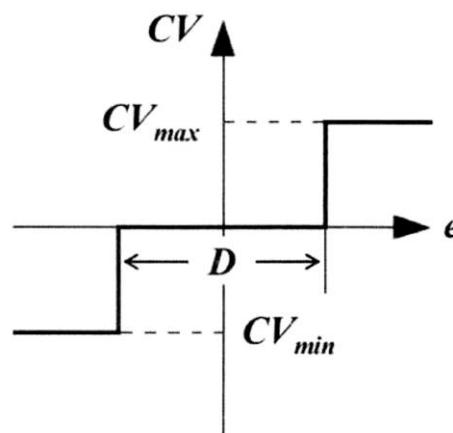
Figura 43 Comportamiento de la Variable de Control en un control todo-nada simple.



Nota: Tomado de (Mandado Pérez, Marcos Acevedo, Fernández Silva, & Armesto Quiroga, 2009).

Para minimizar los inconvenientes del controlador todo-nada básico, se fijan dos set points para obtener un controlador todo-nada de dos posiciones. Esta mejora se puede implementar de dos formas: como un controlador todo-nada con histéresis (al cual se le añade un porcentaje de histéresis al set point para que las oscilaciones no sean tan bruscas) o como un controlador todo-nada con zona muerta (en el cual se fija un set point máximo y uno mínimo). (Mandado Pérez, Marcos Acevedo, Fernández Silva, & Armesto Quiroga, 2009)

Figura 44 Comportamiento de la Variable de Control en un control todo-nada de dos posiciones con zona muerta.



Nota: Tomado de Mandado Pérez, Marcos Acevedo, Fernández Silva, & Armesto Quiroga (2009).

El controlador todo-nada con zona muerta envía una señal cuando el error alcanza el valor máximo o mínimo. Entre ambos extremos existe lo que se denomina zona muerta, dentro de ella el controlador no realizara ninguna acción correctiva.

Ventajas:

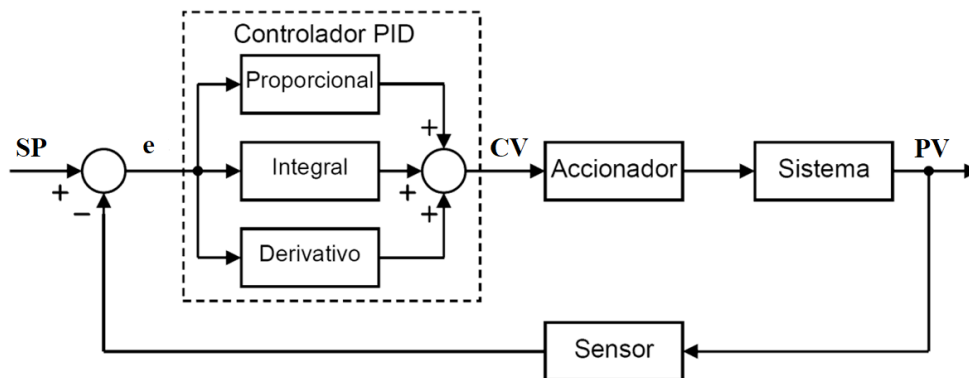
- Es la estrategia de control más simple y fácil de comprender e implementar.
- No demanda de un análisis matemático del sistema para determinar la función de transferencia que gobierna al mismo.
- Al ser de tipo no lineal solo se activa o desactiva cuando la variable de proceso entregada por el sensor alcanza el límite máximo o mínimo, exige menos recursos del controlador físico ya que, dependiendo el sistema, no se requiere un monitoreo constante del sistema.
- Al ser una estrategia de control que demanda pocos recursos del controlador físico como energía y poder de procesamiento, se puede implementar en controladores básicos.
- Únicamente se requiere fijar los set point máximos y mínimos para poder tener una acción de control, no requiere sintonización de ningún tipo por lo que un mismo sistema puede operar en múltiples escenarios.

Desventajas:

- Es un sistema lento cuyas aplicaciones se limitan a aquellas en las que el proceso a controlar es lento, como el control de temperatura.
- Por su naturaleza, no se puede implementar en aplicaciones en las que se requiere altas velocidades de respuesta y altos estándares de precisión.
- Una mala configuración en los niveles máximos y mínimos de set point pueden provocar conmutaciones bruscas que generen problemas en los componentes del sistema.

2.5.2. Control PID

El control PID (Proporcional – Integral - Derivativo), y sus variantes, es la estrategia de control más ampliamente utilizada en los controladores industriales. A pesar que no es una tecnología nueva, ha demostrado una efectividad y adaptabilidad practica para prácticamente todos los procesos desarrollados en la industria por lo que continúa siendo la opción más recurrente al monumento de implementar un sistema de control automatizado.

Figura 45 Diagrama de un Sistema con Controlador PID

Nota: Elaboración Propia

El controlador PID funciona a través de un lazo de retroalimentación calcula constantemente la diferencia entre la variable de proceso y el set point establecido, para corregir el error este controlador modificara los parámetros de la variable de control, que actuara directamente en el proceso, mediante la intervención de una acción proporcional, una acción integral y una acción derivativa. A continuación, se detallará el efecto que tiene cada una de estas 3 acciones:

- **Acción Proporcional:** Este parámetro representa la mayor parte del control, actúa en función del error en el instante actual y es el que impulsa al sistema a alcanzar el set point. Existen controladores proporcionales puros, sin embargo, esta acción pura no asegura que el sistema se estabilice y normalmente tiende a oscilar sin estabilizarse.
- **Acción Integral:** Esta acción depende de la acción proporcional y actúa en función del error pasado para adaptar al sistema y hacer que este llegue al set point deseado. La acción integral es inversamente proporcional a la acción proporcional y mientras más grande sea su valor, más rápido se estabilizará el sistema, pero se tendrá sobreimpulsos más bruscos. Esta acción es la que asegura que el sistema llegue al set point y se suele encontrar con frecuencia sistemas PI puros por ello.
- **Acción Derivativa:** Ésta también es dependiente de la acción proporcional, pero a diferencia de la integral, esta es directamente proporcional a la acción P. Actúa en función del error pasado y actúa para anticiparse al error futuro tomando como referencia la tendencia a los errores pasados. La acción derivativa no se suele utilizar en

aplicaciones que serán afectadas por mucho ruido no constante o impredecible ya que puede provocar que el sistema nunca se estabilice.

Para poder implementar este tipo de control se requiere realizar un análisis matemático del proceso que se desea controlar ya que se necesita conocer la ecuación diferencial que gobierna el comportamiento del proceso. Esto es importante ya que con esta ecuación se realizará una sintonización que dará como resultado las constantes de cada una de las acciones del controlador, el método de sintonización más conocido es el de Ziegler-Nichols.

Ventajas del control PID:

- Es una estrategia de control fácil de entender e implementar.
- Es una estrategia robusta y confiable que funciona bien en una amplia gama de sistemas.
- Es una estrategia eficaz para controlar variables de proceso con diferentes tipos de perturbaciones.

Desventajas del control PID:

- La sintonización de los parámetros es un proceso complejo y requiere un conocimiento del comportamiento del sistema, así como las ecuaciones diferenciales que lo gobiernan.
- La estrategia PID no siempre es efectiva en sistemas con comportamiento no lineal, por ejemplo, en sistemas por lotes.
- Es necesario realizar la sintonización en cada ocasión, incluso si se va a controlar un mismo tipo de proceso, en cada situación las condiciones varían.
- Esta estrategia exige que el controlador tenga una alta capacidad de cómputo para poder realizar los cálculos necesarios para controlar el sistema.
- Es más costosa de implementar ya que se requiere que todos los componentes del sistema tengan una alta confiabilidad ya que el proceso de realimentación se realizara constantemente y se requiere que los instrumentos y controlador tengan alta fiabilidad.

2.5.3. Lógica difusa

La lógica difusa, también conocida como FUZZY, es una estrategia de control que busca el desarrollo de modelos matemáticos que puedan interpretar y procesar la incertidumbre. A diferencia de los modelos de lógica clásica, en los que los datos solo pueden ser interpretados como verdaderos o falsos, si o no, 1 o 0; la lógica difusa permite

que las proposiciones sean parcialmente ciertas o falsas, que es más aproximado a la forma de razonar de los humanos.

En la lógica difusa, se utilizan conjuntos difusos para representar la incertidumbre. Un conjunto difuso es un conjunto que no tiene límites bien definidos, y cada elemento del conjunto tiene un grado de pertenencia al conjunto. El grado de pertenencia puede ser cualquier valor entre 0 y 1, donde 0 indica que el elemento no pertenece al conjunto y 1 indica que el elemento pertenece completamente al conjunto.

La lógica difusa utiliza conceptos lingüísticos para representar valores cuantitativos y se puede utilizar para describir el clima de un invernadero. Los modelos difusos como el modelo Takagi-Sugeno permite representar sistemas no lineales bajo la forma de un modelo lineal. Con esta estrategia, un modelo no lineal puede ser representado por un conjunto de modelos lineales combinados a través de reglas difusas, dando como resultado una mejor resolución de los problemas de control. (Rodríguez, Berenguel, Guzmán, & Ramírez Arias, 2015)

En el caso del control de invernaderos automáticos, que presentan complejos sistemas no lineales, permite derivar un modelo climático del invernadero basado en modelos lineales.

Ventajas de la lógica difusa como estrategia de control

- La lógica difusa es ideal para manejar la incertidumbre que es característica intrínseca del manejo de cualquier cultivo ya que se trata de organismos vivos en los que interactúan una gran cantidad de factores.
- Los sistemas de control basados en lógica difusa son robustos y tienen la capacidad de adaptarse a cambios y perturbaciones del cultivo, las plagas, el ambiente interior y exterior.
- La lógica difusa permite un control preciso de las variables ambientales además de optimizar al máximo el manejo de recursos ya que es como si se tuviera las 24 horas del día a un supervisor analizando el comportamiento del cultivo.

Desventajas de la lógica difusa como estrategia de control

- El diseño e implementación de sistemas de control difuso es complejo y requiere personal con conocimientos altamente especializados.
- Implementar un sistema de control difuso es muy costoso ya que se requiere de una gran cantidad de dispositivos, con un alto grado de confiabilidad y precisión, que permitan al sistema poder realizar un control adecuado.
- Los sistemas de lógica difusa por naturaleza exigen que el controlador tenga una muy elevada capacidad de cómputo y fiabilidad para poder procesar el gran volumen de data que se maneja.

2.6. Análisis de las condiciones de cultivo del invernadero testigo

Como testigo se utilizará un invernadero de 6 metros cuadrados ubicado en la ciudad de Arequipa para realizar las pruebas del sistema de control. Este invernadero no contará inicialmente con ningún tipo de sistema de control y toda la labor se realizará manualmente.

2.6.1. Tipo de cultivo que se llevara

Para este proyecto se tomó como cultivo testigo a la planta de fresa (*Fragaria x ananassa*) variedad San Andreas. Esta es una planta arbustiva de hoja perenne y tamaño pequeño y su la raíz se desarrolla completamente a los 25 cm de profundidad, produce frutos carnosos de alto valor nutritivo y gastronómico.

Figura 46 Plantas de Fresa.



Nota: Tomado de Vergara Cástro (2024).

Esta planta es muy utilizada en proyectos de hidroponía y cultivos en invernadero ya que mediante estas tecnologías se aprovecha el máximo potencial del cultivo ya que se tiene un control meticoloso de la calidad de los frutos porque estos son muy delicados y es fácil que se estropeen o contaminen.

Cuando se la cultiva en el suelo, los frutos al entrar en contacto con la tierra se pueden estropear rápidamente debido a la fricción con las partículas del suelo o por acción de insectos, aves y microorganismos. Todo esto se evita cuando se realizan cultivos tecnificados de hidroponía y cultivo en invernadero ya que los frutos cuelgan de las bandejas y no entran en contacto con el suelo, esto disminuye drásticamente la posibilidad de que el fruto se dañe o contamine con algún patógeno. Las fresas de producción de invernadero tienen mayor calidad son más saludables para el consumo humano.

De acuerdo con Vergara Cástro (2024) la fresa en su etapa vegetativa tiene unas exigencias ambientales de 23 – 28 °C de temperatura ambiental. Por otro lado, en el punto 2.3 se expresó que para la mayoría de los cultivos el rango de humedad ambiental es de 55 – 75% y que la humedad volumétrica del suelo no debe bajar a más de 60% para la mayoría de las plantas susceptibles a la sequía. (Vergara Cástro, 2024)

2.6.2. Tiempo diario que se le dedica

Para este proyecto se utilizó 10 plantas de fresa variedad San Andreas que se ubicaron en 2 bandejas plásticas de 1 metro de largo por 20 cm de ancho y 20 cm de profundidad, separadas equitativamente una de otra cada 20 cm.

La fresa requiere de un sustrato bastante drenante por lo que para este testigo se utilizó cascarilla de arroz que junto con la fibra de coco son los sustratos más comúnmente utilizados. Al tener un sustrato tan drenante, el porcentaje de humedad cae rápidamente por lo que es necesario regar prácticamente todos los días.

Por otro lado, para garantizar que la fresa obtenga el dióxido de carbono necesario para la fotosíntesis, todos los días se tiene que abrir manualmente la ventana de ventilación.

Además, la fresa es una planta que es exigente con el mantenimiento, todos los días se tiene que inspeccionar el cultivo para cortar las hojas secas o dañadas.

Para este invernadero testigo en el que se cuenta con 10 plantas de fresa, realizar todas estas tareas toma aproximadamente 15 minutos, esto involucra realizar la inspección y monitoreo del cultivo, abrir la ventana en las mañanas y cerrarla en las noches, recoger agua para regar manualmente. Pero se tiene que considerar que cuando es día es muy caluroso, el sustrato se seca rápidamente por lo que es necesario realizar las operaciones manuales más de una vez al día. Si tenemos en cuenta que un invernadero familiar común, dependiendo de su configuración, puede ser capaz de albergar hasta más de 400 plantas de fresa, el tiempo que se debe dedicar al cultivo es excesivo por lo que la necesidad de automatizar el proceso se hace evidente. (Vergara Cástro, 2024)

2.7. Costo de implementación de un sistema de control estándar

En el punto 2.6.2 se presentaron los componentes que involucra un sistema de control de un invernadero industrial.

A continuación, detallara los criterios de selección del controlador en los que se compara a los 3 controladores comúnmente utilizados en proyectos de invernaderos industriales:

- **Poder de procesamiento:** un controlador industrial tiene que tener una alta capacidad de computo para poder procesar toda la data que involucra el proceso, teniendo eso en cuenta la opción más indicada es el ¡HORTIMAX GO!, sin embargo, hay que tener en cuenta que este es un paquete que incluye un ordenador que hace la función de controlador y unidad de interfaz gráfica, además de periféricos como sensores y relé.
- **Número de entradas y salidas:** Esto es en gran parte lo que define que controlador se va a utilizar. Un controlador industrial, dependiendo de la aplicación, tiene que tener el suficiente número de entradas y salidas para suplir con las necesidades del proyecto. Teniendo en cuenta esto, la opción ideal es el PLC SIEMENS S7-1200 CPU 1214C ya que cuenta con un mayor número de entradas y salidas sin tener que adicionar módulos de expansión.
- **Versatilidad y flexibilidad:** El controlador debe ser capaz de adaptarse a las necesidades del proyecto teniendo en cuenta el manejo de sensores y actuadores. El controlador debe ser capaz de poder interactuar con una amplia gama de sensores tanto digitales como analógicos, debe además ser capaz de permitir realizar modificaciones en la

configuración del sistema para realizar mejoras y dar mantenimiento. Teniendo en cuenta esto, sin lugar a duda la mejor opción es el PLC SIEMENS S7-1200 CPU 1214C. Si bien el HORTIMAX GO! y el COMANDER EVO son controladores diseñados específicamente para control agrícola, se quedan cortos respecto a la versatilidad y flexibilidad. HORTIMAX GO! es un sistema cerrado que únicamente acepta sensores y actuadores de la propia marca, limitando abruptamente los sensores que se pueden utilizar y encareciendo el costo del proyecto. Por otro lado, el COMANDER EVO si bien tiene flexibilidad respecto a los sensores compatibles, se queda corto respecto al PLC SIEMENS S7-1200 ya que este es un controlador industrial que está diseñado para adaptarse a una amplia gama de sensores con rangos de señal diferentes, como 0-10V, 4-20 mA, etc. Aparte, el PLC SIEMENS S7-1200 cuenta con más protocolos de comunicación que lo hacen más versátil.

- **Facilidad en el uso:** Mientras más fácil sea de utilizar y configurar a un controlador, este será más atractivo para ser seleccionado. Teniendo eso en cuenta la opción más indicada es el ¡HORTIMAX GO! ya que este es un paquete de componentes que incluye una pantalla táctil con una interfaz gráfica intuitiva fácil de configurar. Por otro lado, el COMANDER EVO tiene que ser programado desde un ordenador con un software que requiere capacitación para su uso. Del mismo modo, el PLC SIEMENS S7-1200 requiere ser programado desde un ordenador utilizando mayormente lenguaje LADDER que exige al programador haber llevado capacitación técnica. Con el ¡HORTIMAX GO! el propio agricultor puede realizar toda la configuración, mientras que con las otras opciones se requiere contratar un especialista que haga la programación.
- **Costo:** Al final este es el factor determinante que indicara que controlador se implementara. Si bien el ¡HORTIMAX GO! es un sistema que incluye todo lo necesario para iniciar un proyecto de cultivo, es muy fácil de configuración con lo que el propio agricultor puede programarlo y está diseñado con una arquitectura modular de tal manera que si se quiere expandir el proyecto solo se deben adicionar nuevos módulos; es un producto muy costoso. Es por ello que la opción indicada es el PLC SIEMENS S7-1200.

Teniendo en cuenta estos criterios de selección, queda claro que la opción más viable para el controlador es el PLC SIEMENS S7-1200 CPU 1214C ya que, si bien es necesario contratar a un especialista que realice la conexión y programación, a diferencia de las otras opciones este es más versátil, más flexible y más económico. Lo cual era de esperarse porque

si bien los otros controladores están diseñados específicamente para proyectos de cultivos agrícolas, se quedan cortos respecto al PLC ya que este es un dispositivo diseñado específicamente para adaptarse a las necesidades de cualquier proceso industrial.

Habiendo seleccionado el controlador, se procederá a realizar una tabla en la que se incluyen los componentes de un sistema de control industrial básico para la automatización de un invernadero. En este presupuesto tentativo se incluirá únicamente los elementos que componen el sistema de control que son los sensores, el controlador, la bomba de agua, válvulas, componentes del tablero eléctrico y motor para abrir la ventana de ventilación. (SIEMENS, 2018)

Tabla 21 Presupuesto tentativo de un sistema de control industrial básico.

COMPONENTE	OBSERVACIÓN	CANTIDAD	PRECIO C/U	PRECIO TOTAL
PLC SIEMENS S7-1200 CPU 1214C		1	S/. 1700	S/. 1700
Thies CLIMA 1.1005.54.241	Termo-Higrómetro ambiental	2	S/. 350	S/. 700
ECH2O MAS - 1	Sensor de humedad de suelo capacitivo	1	S/. 400	S/. 400
Electro válvula Rain Bird 1"	24 VAC 0.5Amp	2	S/. 130	S/. 260
Bomba Eléctrica ½ HP	1.75 Amp	1	S/. 160	S/. 160
Motorreductor para abrir la ventana	12 VDC 45W	1	S/. 400	S/. 400
Tablero Eléctrico	-	1	S/. 80	S/. 80
Pulsadores	-	3	S/. 8	S/. 24
Riel DIN	-	1 metro	S/. 8	S/. 8
Cable AWG 18	-	1 rollo	S/.100	S/. 100
Electro nivel	-	1	S/. 80	S/. 80
Llave Termomagnética monofásica de 16A	-	1	S/. 35	S/. 35

RELE 220AC de 10A	Para el motor, los relay del PLC soportan 2 A como máximo	1	S/.22	S/. 22
Fuente de alimentación	24 VDC 15 A	1	S/.50	S/. 50

TOTAL

S/. 4019

Nota: Los costos únicamente incluyen los elementos básicos del sistema de control.



CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

3.1. Consideraciones previas para el diseño del sistema

Antes de iniciar con la planificación y los diseños del proyecto, es necesario tomar en cuenta los requerimientos propios del proceso a controlar. A continuación, se presentan las consideraciones necesarias para el control de un cultivo bajo invernadero orientado a agricultura familiar:

- Los principales parámetros que afectan a un cultivo son la temperatura ambiental, la humedad ambiental y la humedad de suelo. Considerar algún otro no es justificable ya que su efecto en un cultivo pequeño, como lo es un invernadero de agricultura familiar, es mínimo y no es redituable ya que el costo de implementación de mecanismos de control es superior a las ganancias que se podría conseguir.
- Las variaciones de temperatura ambiental, humedad ambiental y humedad de suelo son lentas en comparación con otras magnitudes como la velocidad. Esto se debe a que la variación de estas es paulatina en el tiempo, no ocurren cambios repentinos y abruptos. Esto permitirá aprovechar sensores más económicos sin comprometer el control del sistema.
- El cultivo bajo invernadero orientado a agricultura familiar, es un proceso que no demanda una elevada exactitud y precisión en los sensores. Esto se debe a que las propias plantas tienen tolerancia a pequeñas variaciones de temperatura y humedad, si la temperatura variara 1 o 2 grados no supondría una consecuencia catastrófica para el cultivo, por lo que se tiene más holgura respecto a la exactitud y precisión, pudiendo así aprovechar el uso de sensores más económicos.
- Si se espera que el sistema opere en una situación real y no un ambiente controlado de laboratorio, no se pueden producir desconexiones ni falsos contactos en los conductores. Se debe asegurar conexiones firmes que aseguren que los cables no se desconecten fácilmente.
- Se debe evitar conmutaciones intempestivas y falsos disparos provocados por estática, corrientes y capacitancias parasitas en los componentes electrónicos.

Se debe considerar circuitos de protección que aseguren que estos inconvenientes no ocurran.

- Todo el sistema debe ser capaz de operar correctamente durante todo el cultivo, por es necesario asegurar que los elementos del mismo no fallen intempestivamente. Teniendo en cuenta que se trabajara con una placa Arduino y otros componentes que no son de grado industrial ni tienen certificación, es necesario evitar llevarlos al máximo de sus capacidades. De hecho, lo mejor sería hacer que los componentes funcionen al mínimo y bajo condiciones óptimas de acuerdo a sus data sheet.
- El sistema está dirigido para agricultura familiar, por lo que, debe ser de fácil acceso para el agricultor, se debe permitir que se manipulen los set point de los parámetros de control para que el sistema se adapte a varios cultivos. Por otro lado, debe permitir una instalación y manejo simple además de permitir la modificación del proyecto (el controlador debería tener una cantidad de entradas y salidas que permita cierto grado de ampliación).

El sistema constará de la estructura existente del invernadero (se busca comprobar la posibilidad de automatización con un sistema económico, por lo que no se considera la estructura del invernadero), un tablero eléctrico, 1 tanque de agua, una bomba de agua, electroválvulas que al activarse se podrá retirar agua del tanque para el riego o bien para la aspersión, tuberías, nebulizadores de agua, sensores de humedad ambiental, sensores de temperatura ambiental, sensores de humedad de sustrato, extractor eléctrico para la ventilación.

El funcionamiento es el siguiente:

1. La ventana de ventilación se abrirá a una determinada hora de la mañana para permitir la renovación de aire y que ingresen insectos polinizadores. La ventana se cerrará a una determinada hora de la tarde para evitar que la temperatura dentro del invernadero caiga, manteniendo así un clima estable.
2. Si el sensor de humedad ambiental detecta que esta se encuentra por encima del set point establecido, se activará el extractor, si por el contrario se encuentra por debajo del set point se accionará la electroválvula de aspersión y la bomba de agua para nebulizar el ambiente y subir el porcentaje de humedad.

3. Si el sensor de temperatura ambiental detecta que esta se encuentra por encima del set point, accionara la electroválvula de aspersión y la bomba de agua para nebulizar el ambiente y bajar la temperatura con el agua. Si en caso la humedad ambiental este por encima del set point, entonces se activara el extractor.
4. Cuando el sensor de humedad de suelo detecte que la humedad del sustrato este por debajo del set point establecido, se accionara la electroválvula del tanque de riego, la bomba de agua, la electroválvula general y la de la línea de riego para regar las plantas.
5. Cuando el sensor de humedad ambiental detecte que a pesar de haber enviado la orden para accionar los nebulizadores y la humedad siga estando debajo del set point, se enviara una señal para activar la alarma y así el agricultor pueda darse cuenta de que hay un problema y proceda a hacer una inspección.

Los sensores no estarán accionados constantemente ya que no es necesario porque la temperatura no varía tan rápidamente, por ello cada cierto tiempo estos se activarán para hacer mediciones y realizar acciones. Luego de que su tarea ha terminado o si los niveles ambientales están dentro de los rangos establecidos, los sensores volverán a desactivarse. Esta acción se realiza además para ahorrar energía y prolongar el funcionamiento de los instrumentos, como la mayoría de estos no son de calidad industrial pueden deteriorarse más rápido por lo que es conveniente ampliar su vida útil lo más que se pueda.

3.2. Selección del controlador

En el punto 2.6.2 se presentaron los 3 controladores más ampliamente utilizadas en proyectos no industriales.

A continuación, detallara los criterios de selección del controlador en los que se compara a los 3 controladores mencionadas:

- **Poder de procesamiento:** De los 3 mencionados, el que tiene un poder de procesamiento mayor es la Raspberry Pi y por mucho, incluso si la comparamos con el PLC SIEMENS S7-1200, esta tiene más poder de computo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la Raspberry Pi no es un controlador, sino que es un micro ordenador. Esta placa está diseñada para realizar procesamiento de imágenes y video, comunicación con otros dispositivos e internet de las cosas, y procesamiento de complejos códigos de software. Por todo ello, esta placa es más parecida un computador común que un controlador en

sí. Si bien tiene salidas y entradas digitales que le dan la capacidad de controlar actuadores, no cuenta con entradas analógicas y su función no está orientada al control sino al procesamiento pesado de computo. De hecho, al funcionar con un sistema operativo, esta resulta más lenta ya que primero debe arrancar el sistema operativo y después recién comenzara a interactuar con sus periféricos. A diferencia de las otras dos placas que interactúan inmediatamente con los periféricos conectados. Teniendo eso en cuenta, la opción más viable sería la ESP32 DEVKIT V1 ya que cuenta con mayor poder de procesamiento que el Arduino MEGA 2560.

- **Número de entradas y salidas:** Para este criterio de selección, la opción ganadora es el Arduino MEGA 2560 ya que cuenta con 54 entradas/salidas digitales y 16 entradas analógicas, bastante superior a las únicas 40 entradas/salidas digitales de la Raspberry Pi y las 34 entradas/salidas digitales y 16 analógicas del ESP32 DEVKIT V1.
- **Versatilidad y flexibilidad:** Nuevamente el Arduino MEGA 2560 es la opción más adecuada. Si las otras placas son superiores respecto a comunicación, esta es con otros dispositivos y lo que se busca es una eficiente conexión con sensores (discretos, digitales y analógicos) y actuadores. La placa Arduino MEGA 2560 está diseñada para trabajar con una tensión de 5V, la cual es la tensión de trabajo de la mayoría de los sensores que se encuentran en el mercado, las otras dos placas trabajan con 3.3V que es una tensión poco versátil ya que para conectarse sensores de 5V requieren dispositivos o circuitos externos.
- **Facilidad en el uso:** Nuevamente el Arduino MEGA 2560 es la opción más adecuada. Si bien el ESP32 DEVKIT V1 puede programarse en el IDE de Arduino, al ser una placa relativamente nueva no cuenta con la comunidad de desarrollo que tiene Arduino por lo que las funciones, librerías y demás recursos que cuenta Arduino no los cuenta la ESP 32. Por otro lado, para manipular la ESP32 se requiere tener conocimientos más profundos de hardware y software para poder utilizarla correctamente, a diferencia de Arduino que una persona si ningún conocimiento de electrónica, hardware o software puede fácilmente empezar a desarrollar proyectos. La Raspberry Pi quedo descartada pues para manipularla y que tener conocimiento de su sistema operativo, además que la programación es más compleja. El Arduino MEGA 2560 tiene la capacidad de interactuar con sensores y actuadores y controlarlos de manera directa y sencilla.

- **Costo:** La Raspberry Pi se descartó primero pues no es un dispositivo de hardware libre, por lo que sí o sí hay que adquirir el dispositivo original, el cual resulta costoso. El Arduino MEGA 2560 cuenta con hardware libre por lo que cualquier fabricante puede realizar replicas idénticas a menores precios, sin embargo, el más económico es el ESP32 DEVKIT V1.

Habiendo analizado los criterios de selección anteriormente expuestos se tomó la decisión de utilizar al Arduino MEGA 2560 como controlador del sistema de control. La Raspberry Pi se descartó pues esta no es una placa diseñada para el control sino para procesamiento de datos de cómputo e interconexión con dispositivos. Si bien el ESP32 tiene mejor poder de cómputo y comunicación que el Arduino y se puede programar en el IDE de este, tiene menos entradas y salidas, al ser relativamente nuevo no cuenta con los recursos que si tiene comunidad de Arduino, al operar con 3.3V necesita dispositivos y/o circuitos externos que le permitan interactuar con componentes que trabajan con 5V que son la mayoría del mercado, requiere tener conocimientos más amplios de hardware y software para utilizarla que con Arduino. (ARDUINO, 2024)

3.3. Parámetros de control para el cultivo

En el punto 2.3.1 se mencionó que existen una gran variedad de parámetros que influyen en el desarrollo de los cultivos. Estos pueden influir en mayor o menor medida, sin embargo, la selección de estos debe realizarse teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Un parámetro de control tiene un efecto directo con el desarrollo de la planta, este presenta un rango de valores dentro del cual, dependiendo de la especie, la planta se desarrolla óptimamente, sin embargo, un mal manejo de este repercute en consecuencias negativas para el cultivo.
- Para seleccionar a un parámetro de cultivo, es necesario que se justifique la consideración del mismo dentro del control, los beneficio que el control del parámetro aportar al proyecto debe ser superior al costo y esfuerzo que demanda controlar al mismo.
- Hay parámetros de cultivo cuyo efecto en el cultivo únicamente es apreciable cuando se realiza la actividad de manera extensiva, ya que en pequeñas muestras su acción es insignificante.

Teniendo esto presente salta a la luz que los parámetros que tienen una alta relevancia y son indispensables para el cultivo son:

- Temperatura ambiental.
- Humedad ambiental.
- Humedad de suelo.

Estos son los parámetros que tienen un efecto inmediato en el cultivo y su control es importante para el desarrollo de las plantas. La acción de control de estos 3 parámetros es necesaria y se justifica porque sin un control adecuado de ellos, la planta no se desarrolla adecuadamente e inclusive puede morir.

No se consideran los demás parámetros ya que su efecto en el cultivo solo es apreciable en proyectos de grandes envergaduras debido a las dimensiones. Para un invernadero de agricultura familiar, su efecto es tan pequeño que pasa desapercibido.

El control de otros parámetros no estaría justificado ya que, para un cultivo pequeño, los beneficios que aportaría la acción de control de estos son mucho menor que el costo que representaría implementar el control. Por ello, para un invernadero orientado a agricultura familiar no es conveniente considerar otro parámetro de control además de los 3 mencionados.

Teniendo en cuenta que se utilizara un cultivo testigo con plantas de fresa, se tiene que los rangos óptimos son: temperatura ambiental 23 – 28 °C, humedad ambiental 55 – 75% y humedad del suelo no debe bajar del 60%.

Estos rangos permitirán fijar los set point para cada uno de estos parámetros, con lo que se tendría lo siguiente:

- Para la temperatura ambiental, el set point alto será 28 °C y el set point bajo será 23 °C.
- Para la humedad ambiental, el set point alto será 55% y el set point bajo será 75%.
- Para la humedad del suelo, el set point alto será 100 % y el set point bajo será 60 %.

3.4. Selección de sensores

Se realizó la comparación de los grupos de sensores no industriales que se presentaron en el punto 2.6.2 y a continuación se detallará los criterios de selección para los sensores del sistema de control:

- **Sensor temperatura ambiental:** De las 3 opciones propuestas (LM35, DS18B20 & DHT22) se consideró como criterio de selección al precio, tensión de alimentación, tipo de sensor, rango de medición, precisión, exactitud y resolución.
 - Evaluando primeramente la tensión de alimentación, los 3 sensores operan con 5VDC.
 - Evaluando el tipo de sensor, resaltan el DS18B20 y el DHT22 porque son digitales y no requieren de calibración como si ocurre con el LM35 que es analógico.
 - Al evaluar la precisión, se tiene que tanto el DS18B20 como el DHT22 tienen una precisión de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$. Siendo superiores al LM32 que tiene una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.
 - Respecto a la exactitud, nuevamente el DS18B20 y el DHT22 tienen una misma exactitud de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ superando ambos al LM32 que tiene una exactitud de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.
 - Respecto a la resolución, el DHT22 es el más sensible con una resolución de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, seguido del DS18B20 con una resolución de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
 - Al evaluar el rango de temperatura que pueden medir, se tiene que el DS18B20 tiene un rango más amplio ya que puede medir de -55°C hasta 125°C . Un cultivo bajo invernadero nunca alcanzaría temperaturas tan extremas por lo que es más adecuado el LM35 y el DHT22 que tienen un rango entre 0°C y 100°C .
 - Evaluando el costo del sensor, el más económico es el LM35 con un costo de S/.10 seguido de DS18B20 con S/.11 y finalmente el más costoso es el DHT22 con S/.30.

En lo que respecta a especificaciones técnicas, el sensor DHT22 es el que tiene mejores prestaciones, sin embargo, también es el más costoso. El DS18B20 es más económico y sus características son similares, por otro lado, a comparación con el DHT22 el rango de medición está fuera de lo necesario siendo el DHT22 más puntual. La resolución del

DHT22 es mayor, puede conectarse a 20 metros de distancia y su comunicación con Arduino es más simple y eficiente porque se tiene librerías de trabajo. Por otro lado, el DHT22 es un termo-higrómetro por lo que se tienen 2 sensores en 1.

Debido a ello, finalmente se tomó la decisión de seleccionar al sensor DHT22.

- **Sensor humedad ambiental:** De las opciones propuestas (HS1101 & DHT22) se consideró como criterio de selección al precio, tensión de alimentación, tipo de sensor, rango de medición, precisión, exactitud y resolución.
 - Evaluando primeramente la tensión de alimentación, los 2 sensores operan con 5VDC.
 - Evaluando el tipo de sensor, resalta el DHT22 porque es digitales y no requiere de calibración como si ocurre con el HS1101 que es analógico y requiere un circuito externo de acondicionamiento de señal.
 - Al evaluar la precisión, el DHT22 tiene una precisión de $\pm 0.2\%$, siendo superior al HS1101 que tiene una precisión de $\pm 1.5\%$.
 - Respecto a la exactitud, nuevamente el DHT22 es superior ya que tiene una exactitud de $\pm 2\%$, superando al HS1101 que tiene una exactitud de $\pm 5\%$.
 - Respecto a la resolución, ambos tienen una resolución de $\pm 0.1\%$.
 - Al evaluar el rango de humedad que pueden medir, se tiene tanto el DHT22 como el HS1101 tienen el mismo rango de 0-99%.
 - Evaluando el costo del sensor, el más económico es el HS1101 con un costo de S/.25 seguido del DHT22 con S/.30.

En lo que respecta a especificaciones técnicas, el sensor DHT22 es el que tiene mejores prestaciones. Por otro lado, el DHT22 es un termo-higrómetro por lo que se tienen 2 sensores en 1.

Debido a ello, finalmente se tomó la decisión de seleccionar al sensor DHT22.

- **Sensor humedad de suelo:** De las opciones propuestas (resistivo & capacitivo) se consideró como criterio de selección al precio, tensión de alimentación, tipo de sensor, rango de medición, robustez, exactitud y resolución.
 - Evaluando primeramente la tensión de alimentación, los 2 sensores operan con 5VDC.
 - Evaluando el tipo de sensor, ambos son analógicos y requieren una calibración mediante software.
 - Al evaluar la exactitud, el capacitivo tiene una exactitud de $\pm 2\%$, siendo superior al resistivo que tiene una exactitud de $\pm 4\%$.
 - Respecto a la resolución, el más sensible es el sensor capacitivo una resolución de $\pm 0.1\%$ siendo superior al resistivo con $\pm 1\%$.
 - Al evaluar el rango de humedad que pueden medir, se ambos tienen el mismo rango de 0-99%.
 - Evaluando el costo del sensor, el más económico es el resistivo con un costo de S/.8 seguido del resistivo con S/.10.
 - Finalmente, al evaluar la robustez se tiene que el sensor resistivo es vulnerable a la oxidación, corrosión y salinidad del suelo; con lo que progresivamente se vuelve más inexacto con el tiempo. Por otro lado, el capacitivo cuenta con protección aislante por lo que la oxidación y salinidad del suelo no lo afectan.

Debido a ello, finalmente se tomó la decisión de seleccionar al sensor capacitivo.

3.5. Selección de la estrategia de control

Para elegir la estrategia de control adecuada que se implementara en el sistema a desarrollar se consideró, en primer lugar, que el núcleo del controlador será una placa Arduino, la cual no es un dispositivo de grado industrial por lo que no es recomendable llevarla al límite de sus capacidades, de hecho, lo ideal es procurar que la placa se esfuerce lo mínimo posible para que opere continuamente sin problemas y prolongando la vida útil. Por otro lado, tenemos que el proceso a controlar es un proceso lento, la temperatura y humedad no son variables que cambian rápidamente, sino que hay un periodo de tiempo que transcurre para que se manifieste el cambio en dichas variables físicas, por lo que no es necesario realizar un censo de las variables constantemente.

Para seleccionar la estrategia de control más adecuada se consideró los siguientes criterios de selección:

- Las variaciones de temperatura ambiental, humedad ambiental y humedad de sustrato son relativamente lentas. Por lo tanto, se puede utilizar una estrategia más simple que tienen una acción de control lenta.
- Se busca aliviar al máximo posible el esfuerzo que el controlador debe ejercer porque la placa Arduino y los sensores no son dispositivos industriales por lo que es conveniente que se fuercen lo menos posible.
- El sistema solo trabaja con set point altos y set point bajos para los parámetros de control.
- El sistema debe poder adaptarse a otros cultivos e invernaderos por lo que debe ser simple, fácil de instalar y fácil de mantener.

Considerando lo anteriormente descrito se procedió a analizar las estrategias de control propuestas para determinar cuál es la más apropiada para este proyecto.

- Al analizar la lógica difusa se encontró que esta exige muchos recursos del controlador. Utilizar esta estrategia en una placa Arduino, que se espera que funcione por periodos de tiempo prologado, no es lo ideal ya que se estará llevando al límite la capacidad del mismo. Si bien se sabe que la placa Arduino puede ejecutar tareas de control con esta estrategia, en la mayoría de trabajos solo se prueba el funcionamiento del sistema por periodos de tiempo cortos y en condiciones controladas de laboratorio, utilizar una estrategia que demanda

tantos recursos de computo puede provocar que a la larga la placa sea propensa a fallar. Por otro lado, para implementar un sistema de lógica difusa es más complicado y costoso.

- Respecto a la estrategia de control con PID, se tiene que esta es la más ampliamente usada en la industria y hay varias referencias de su uso en este tipo de proyectos. Pero se tiene que tener en cuenta que al usar un control con PID el Arduino estará procesando información constantemente, realizando censado, interpretación y cálculo de las variables físicas. Si bien existen antecedentes de proyectos con control PID con Arduino, estos siempre se realizan en condiciones de laboratorio y no con periodos de trabajo ininterrumpidos. Por otro lado, es necesario conocer el modelo matemático del sistema y si se quiere implementar este sistema de control a otros invernaderos es necesario realizar la sintonización de los parámetros PID para todos y cada uno de los invernaderos en los que se quisiera implementar el sistema.
- Finalmente, se evaluó la estrategia de control ON/OFF de dos posiciones con zona muerta. Esta estrategia de control es la más simple de todas las estrategias de control en lazo cerrado, no se requiere conocer el modelo matemático del sistema ya que únicamente se estará trabajando con límites máximos y mínimos. Su acción de control solo es activar o desactivar actuadores, no realiza procesamiento importante de información recopilada por los sensores, por lo que alivia mucho esfuerzo de computo al procesador. Si bien actualmente ya no es muy común encontrarlo en aplicaciones industriales, sigue siendo una muy buena opción cuando se trata de sistemas simples y de respuesta lenta, como la variación de temperatura.

Habiendo realizado este análisis, se llegó a la conclusión de que la estrategia de control apropiada para este proyecto es el control ON/OFF de dos posiciones con zona muerta. Esta decisión se justifica bajo lo siguiente:

- La estrategia de control ON/OFF garantizará que el Arduino y sensores trabajen lo mínimo posible; debido a que únicamente se realizan acciones correctivas cuando se supera un set point, esto alivia mucho esfuerzo de computo para el controlador. Tanto la lógica difusa como el control PID demandan de muchos recursos de computo al controlador.

- Las variaciones de los parámetros de control: temperatura ambiental y humedad ambiental y humedad de sustrato; son naturaleza lentos, no es necesario que constantemente se esté realizando el censado porque la variación no ocurre en tiempos cortos, por lo que se puede programar que el censado se realice cada cierto tiempo lo que supone un ahorro de energía y esfuerzo computacional de los dispositivos, teniendo en cuenta que se está utilizando componentes no industriales, mientras más se los proteja más se prolongara la vida útil de los mismos y se disminuye la probabilidad de que fallen.
- El sistema a controlar no exige una alta precisión y exactitud por lo que se tiene mas tolerancia respecto a las especificaciones de dispositivos a utilizar, así como la estrategia de control. El control ON/OFF es recomendado para aplicaciones en las que la precisión y exactitud no necesitan ser tan altas y en aquellos proyectos donde la velocidad en las acciones de control tiene que ser elevada.
- La estrategia de control ON/OFF de dos posiciones con zona muerta no requiere de ningún análisis matemático, sintonización o estructura delimitación de reglas de control, por lo que a diferencia del control PID y la lógica difusa es muy fácil de implementar.
- A diferencia del control PID y la lógica difusa, el control ON/OFF es fácilmente implementable porque solo se tiene que fijar los set point máximos y mínimos de los parámetros de control. Esto permite que el sistema de control se pueda adaptar fácilmente a cualquier invernadero.

3.6. Diseño del módulo de control

El controlador estará constituido por la placa Arduino y un módulo de expansión que se acople a la placa y permita que esta tenga acceso a entradas digitales y salidas a relé. Las entradas digitales discretas contarán con resistencias PULL DOWN que asegure una correcta lectura y las salidas a relé contarán aislamiento de protección para separar los circuitos de mando y de potencia.

El módulo contará además con una unidad de reloj en tiempo real RTC compatible con Arduino para tener control del tiempo.

Todas las entradas y salidas contarán con borneras que aseguran que las conexiones sean confiables.

Con esto se busca que placa Arduino sea más robusta y pueda trabajar en entornos fuera de laboratorio, emulando a los controladores industriales PLC para así poder implementar un sistema de control que permita realizar la automatización de un invernadero, asegurando que no habrá falsos contactos, desconexiones y demás defectos que evitan que la placa Arduino pueda ser utilizada en ambientes semi industriales más hostiles y que funcione adecuadamente. Este controlador irá montado dentro de un tablero eléctrico junto con todos los elementos necesarios. (ARDUINO, 2024)

3.6.1. Alimentación

Para alimentar el Arduino, el fabricante indica que se puede alimentar a la placa por 3 medios: por el puerto USB, por el pin de alimentación Vin y por el Jack de alimentación. De acuerdo a la información proporcionada por la comunidad de desarrollo, la mejor forma de alimentar el Arduino es mediante el Jack de alimentación ya que es la única forma de garantizar una alimentación constante a la placa.

No es recomendable realizar la alimentación por el puerto USB ni por el pin de alimentación Vin ya que estos medios de alimentación no cuentan con mecanismos de protección ante irregularidades en la tensión de alimentación, lo que podría provocar daños en el circuito de la placa.

Por otro lado, el Jack de alimentación cuenta con un regulador de tensión que asegura que el Arduino cuente siempre con un suministro de tensión adecuado constantemente.

Según las especificaciones del fabricante, cuando se alimenta por el Jack se recomienda aplicar una tensión de alimentación de 7 V porque el regulador de voltaje interno NCP1117 regula idealmente de 7 a 5 VDC, el resto lo disipa en forma de calor. Suministrar más de 7 V provocaría que el regulador regule la entrada a 5 V disipando el resto de la energía en forma de calor; suministrar menos de 7V puede provocar que el regulador no entregue los 5 V de tensión requerida y podría provocar daños en el circuito.

Teniendo esto en consideración se concluye que la mejor forma de alimentar la placa es por medio del Jack de alimentación, con una tensión de 7 VDC. Pero, ésta es solo la alimentación de la placa, para alimentar a los componentes del módulo de expansión y demás

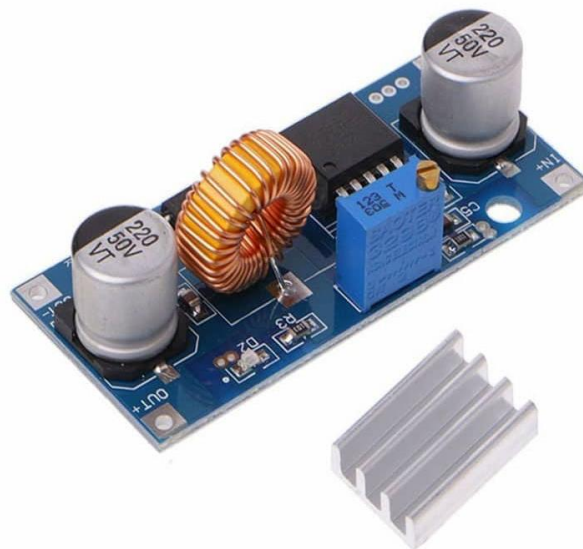
componentes del sistema de control que trabajen con 5 voltios se requiere una alimentación aparte.

Por lo anteriormente descrito se decidió que la alimentación del controlador y el sistema de control se realizara de la siguiente manera:

- Para alimentar todo el circuito de mando del sistema se utilizará una fuente de alimentación que convierta 220VAC a 12VDC con capacidad de 10 A.
- Para alimentar el Arduino se requiere un regulador que convierta los 12VDC en 7VDC.
- Para alimentar los componentes del controlador y el resto de dispositivos del sistema de control se requiere un regulador que convierta los 12VDC en 5VDC.

Para suplir con las necesidades del proyecto se planteó el diseño de una PCB que reciba 12V de la fuente de alimentación y suministre 2 salidas de tensión, una de 7 V y otra de 5 V. Para tal motivo, se utilizó 2 módulos XL4015 que es un módulo regulador Step-Down que lleva como núcleo al integrado XL4015 que es un regulador de tensión que admite entradas entre los 4 a 36V y lo regula a un voltaje de salida entre 1.25V a 32V con capacidad de 5 A. (El resto de especificaciones se puede encontrar en el ANEXO 1)

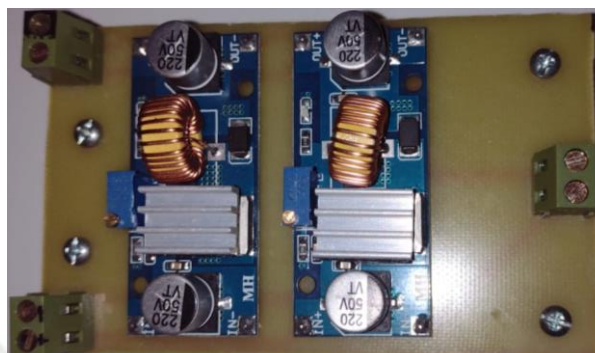
Figura 47 Módulo Regulador de Tensión Step-Down DC - DC XL4015



Nota: Tomado de <https://uelectronics.com/>

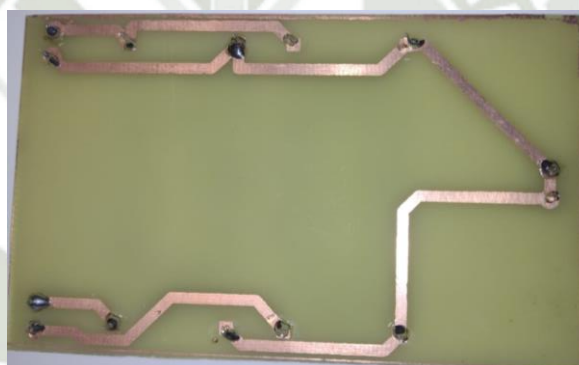
Los dos módulos XL4015 serán incorporados en una misma placa PCB que contara con borneras para asegurar la conexión. (Para ver a detalle el plano de la PCB ver anexo 2).

Figura 48 *Vista Superior de la PCB de Alimentación.*



Nota: Elaboracion Propia.

Figura 49 *Vista Inferior de la PCB de Alimentación.*



Nota: Elaboracion Propia.

Se incorporo una carcasa y un adaptador a riel DIN a la placa PCB para poder montarla en un tablero eléctrico.

Figura 50 Carcasa de la PCB de Alimentación con Adaptador para riel DIN.



Nota: Elaboración Propia.

3.6.2. Entradas digitales

Para el diseño de las entradas digitales, aparte de incluir borneras, se tomó en cuenta que en las entradas digitales para sensores no es necesario incorporar ningún circuito intermedio ya que los sensores seleccionados ya cuentan con todos los elementos necesarios y la conexión con la placa Arduino es directa, únicamente hay que separar la alimentación del Arduino y la alimentación para los sensores y demás componentes del módulo de expansión.

Por otro lado, las entradas digitales discretas que recibirán la señal de pulsadores y sensores binarios si requieren de un circuito de protección de señal intermedio. Esto es debido a que los elementos semiconductores, como los transistores, por su propia composición son susceptibles a conmutaciones intempestivas o falsos contactos, debido a las siguientes razones.

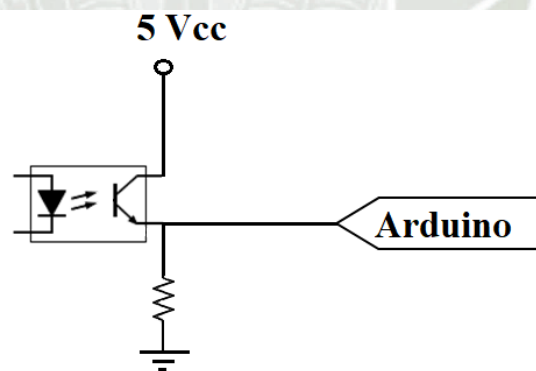
- Los elementos semiconductores como transistores y compuertas lógicas requieren de un voltaje mínimo en las entradas para que se interprete como un 1 lógico y se realice la conmutación, por la propia naturaleza de estos elementos se tiene presente un umbral en el que la mínima variación de voltaje puede provocar conmutaciones intempestivas porque se está entrando en el voltaje mínimo de conmutación.
- Los elementos semiconductores son susceptibles al ruido electrónico, que puede ser ocasionado por muchas fuentes como la estática.

- Capacitancias parasitas, que se provocan porque los terminales de un transistor actúan como capacitor y el aire entre ellos como dieléctrico, que pueden ser provocadas por una diversidad de factores como la sola presencia y agrupación de otros componentes eléctricos y electrónicos.
- En todos los elementos eléctricos y electrónicos se presentan pequeñas fugas de corriente que pueden provocar conmutaciones intempestivas.

Para tener un control adecuado no es concebible que se presenten estas conmutaciones intempestivas, por lo que, para solucionar este problema se debe incorporar un arreglo de resistencias denominado PULL DOWN.

Este arreglo consiste en conectar una resistencia de un valor alto entre la salida del elemento semiconductor y tierra. En este caso, se conectará una resistencia entre en emisor de los optoacopladores y tierra. Con esto nos aseguramos que en la entrada al Arduino siempre tengamos un 0 lógico constante y únicamente cuando se tenga una conmutación de 5V el Arduino detectará un 1 lógico.

Figura 51 Arreglo de Resistencia PULL DOWN.



Nota: Elaboración Propia.

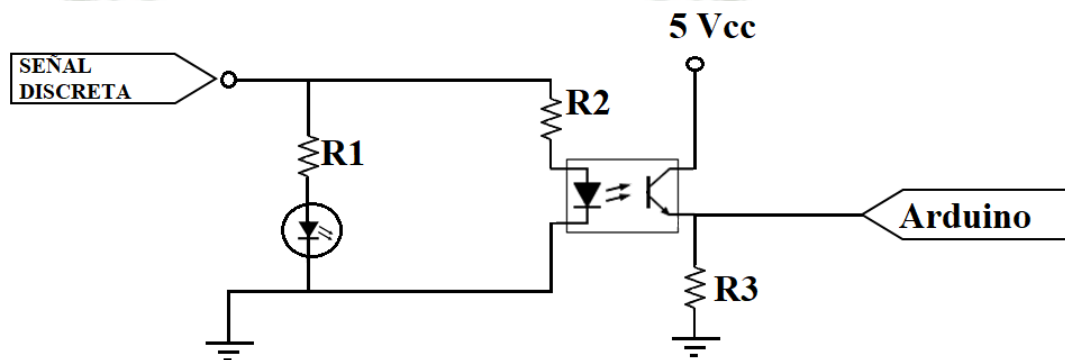
La función de la resistencia PULL DOWN es asegurar que al Arduino este ingresando un 0 lógico constantemente y solamente cuando se conmute el optoacoplador se enviara un 1 lógico. La presencia de esta resistencia no debe afectar de ninguna forma el funcionamiento del circuito, para tal motivo se debe utilizar un valor de resistencia lo suficientemente alto para minimizar el consumo de corriente, pero lo suficientemente bajo para asegurarse que funcione el concepto de resistencia PULL DOWN. Típicamente se suelen utilizar

resistencias con un valor óhmico de $10\text{k}\Omega$, el cual asegura que el arreglo funcione tal y como se espera.

$$R_3 = 10\text{ k}\Omega$$

En la figura 21 se presenta el circuito que llevara cada una de las entradas digitales discretas. Este se compone de un optoacoplador PC817, un led que servirá como indicador de la conmutación y resistencias que limitaran la corriente.

Figura 52 Circuito para las Entradas Digitales Discretas.



Nota: Elaboración Propia.

El optoacoplador PC817 es un integrado que encapsula un arreglo de un fotodiodo y un fototransistor, cuando el fotodiodo recibe una señal emite un haz de luz que conmutará al fototransistor. Este es un dispositivo muy utilizado en electrónica ya que permite un aislamiento óptico entre circuitos con voltajes de operación diferente.

En este caso se está utilizando al PC817 como dispositivo de protección de las entradas digitales del Arduino ya que, al separar la conmutación de los sensores discretos y las entradas de la placa, se protege a la misma de algún exceso de voltaje de entrada que pueda surgir y en el peor de los casos lo que se dañara es el optoacoplador y no todo el controlador.

Adicionalmente se está incorporando un led que sirve como indicador de que la conmutación se ha realizado, el voltaje del led es de 3 V y su consumo es de 2.2mA .

A continuación, se presentarán los cálculos realizados para seleccionar las resistencias utilizadas en este circuito, los datos del optoacoplador se obtuvieron de la hoja de datos del mismo (ver Anexo 3):

$$V_D = 1.2 V$$

$$I_f = 5 mA$$

$$V_L = 3 V$$

$$I_L = 2.2 mA$$

Donde:

V_D : Voltaje del diodo del optoacoplador.

I_f : Corriente del diodo del optoacoplador.

V_L : Voltaje del led indicador.

I_L : Corriente del led indicador.

Con estos datos y aplicando la ley de ohm se procede a calcular las resistencias R1 y R2, recordemos que R3 tiene un valor de 10k Ω :

$$R_2 = \frac{V_{cc} - V_D}{I_f}$$

$$R_2 = \frac{5 - 1.2}{0.005} = 760 \Omega$$

Para seleccionar la resistencia a un valor óhmico comercial se redondea el valor al inmediato superior que es 820 Ω , por lo tanto:

$$R_2 = 820 \Omega$$

Para calcular la resistencia del led se aplica igualmente la ley de ohm, como el led y el optoacoplador están en paralelo, el voltaje de alimentación es mismo:

$$R_1 = \frac{V_{cc} - V_L}{I_L}$$

$$R_1 = \frac{5 - 3}{0.0022} = 909.09 \Omega$$

De igual manera que en el optoacoplador, para seleccionar la resistencia se la llevo a un valor óhmico comercial redondeando el valor al inmediato superior que es $1k\Omega$ con lo que la corriente será suficiente para accionar el led indicador, por lo tanto:

$$R_1 = 1 k\Omega$$

Este circuito se implementará en las PCB del controlador para todas las entradas digitales discretas.

3.6.3. Salidas digitales

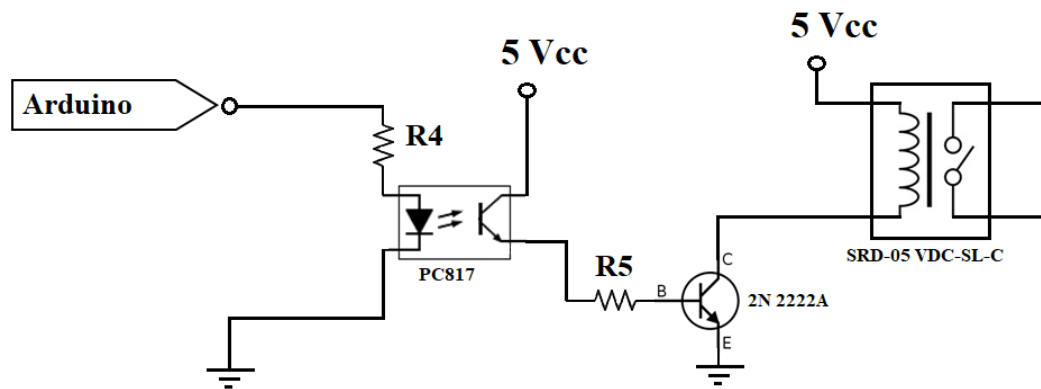
En el caso de las salidas digitales hay que tener más precaución puesto que para que un controlador opere satisfactoriamente, este (dependiendo de la configuración) debe poder accionar una gran cantidad de dispositivos por lo que debe poder operar tanto en corriente continua como alterna y bajo una gran variedad de voltajes.

Las salidas digitales del Arduino tienen una corriente máxima de salida muy limitada y no cuentan con ningún tipo de protección por lo que la placa es vulnerable, pudiendo dañarse por la propia acción de la corriente de salida, una contracorriente, picos de tensión, etc.

Para solucionar este problema es necesario incorporar relés en las salidas del controlador, como ocurre en controladores industriales. Sin embargo, la propia conmutación de los relés puede llegar a dañar la placa Arduino ya que como se dijo antes esta es muy vulnerable y la corriente de salida está muy limitada. Es por ello que se tiene que aplicar un mecanismo de protección extra, en este caso se utilizará nuevamente al optoacoplador PC817 con lo que se garantiza que los componentes del Arduino estén protegidos, la corriente de salida nunca excederá el límite máximo ya que la alimentación del optoacoplador y el relé son independientes, el Arduino podrá controlar dispositivos tanto de corriente alterna como continua con una amplia gama de tensiones.

En la figura 22 se aprecia el circuito que se implementara para cada una de las salidas digitales del controlador a diseñar.

Figura 53 Diagrama del Circuito de las Salidas Digitales.



Nota: Elaboración Propia.

Así como en las entradas digitales, en las salidas se estará utilizando una resistencia $R4 = 1k\Omega$. Esto es debido a que como el Arduino suministra una tensión de 5 V en las salidas, los parámetros de operación son los mismos.

Se tuvo que incluir un transistor 2N 2222 A, porque la corriente de accionamiento de la bobina del relé era superior a la corriente máxima que puede suministrar el optoacoplador PC817. Los valores de los componentes que se utilizarán en el circuito de salidas digitales son los siguientes (ver Anexo 3, Anexo 4 y Anexo 5):

Para el optoacoplador PC817 (ver Anexo 3):

$$I_{C \max} = 50 \text{ mA}$$

$$V_{CE (PC817)} = 5 \text{ V}$$

Para el transistor 2N 2222 A para condiciones de saturación (ver Anexo 5):

$$I_{B \text{ sat}} = 15 \text{ mA}$$

$$V_{BE(sat)} = 0.6 \text{ V}$$

$$I_{C (sat)} = 150 \text{ mA}$$

$$\beta = 10$$

Para el relé SRD – 05 VDC – SL-C (ver Anexo 4):

$$V_{coil} = 5 \text{ V}$$

$$I_{coil} = 71.4 \text{ mA}$$

$$V_{DC(\text{max})} = 30 \text{ VDC}$$

$$V_{AC(\text{max})} = 250 \text{ VAC}$$

$$I_{max} = 10 \text{ A}$$

Donde:

$I_{C \text{ max}}$: corriente máxima de salida del optoacoplador.

$V_{CE(PC817)}$: voltaje de colector-emisor del optoacoplador.

$I_{B \text{ sat}}$: corriente de base en saturación del tránsito.

$V_{BE(\text{sat})}$: voltaje base-emisor del transistor.

$I_{C(\text{sat})}$: corriente de colector en saturación del transistor.

β : ganancia, también llamado h_{fe} .

V_{coil} : voltaje de la bobina de accionamiento del relé.

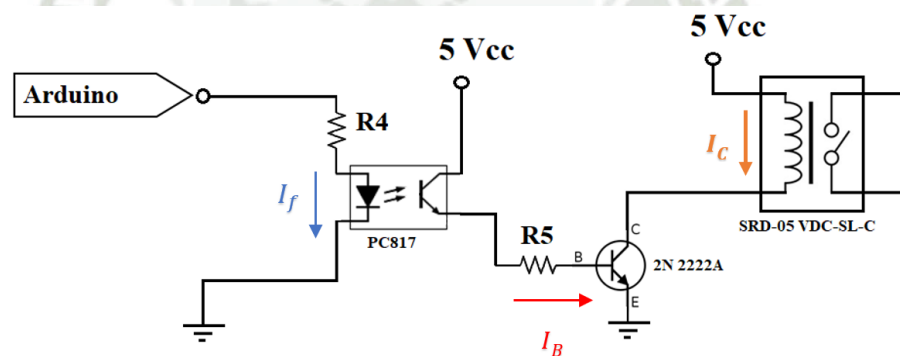
I_{coil} : corriente de la bobina de accionamiento del relé.

$V_{DC(\text{max})}$: voltaje de trabajo en DC máximo.

$V_{AC(\text{max})}$: voltaje de trabajo en AC máximo.

I_{max} : corriente de trabajo máxima.

Figura 54 Distribución de Corrientes del Circuito de Salidas Digitales.



Nota: Elaboración Propia.

Se tiene que, para la saturación la corriente mínima de base para una corriente de saturación de 150 mA es de 15 mA por lo que la ganancia es 10.

$$\beta = \frac{I_{C(\text{sat})}}{I_{B(\text{sat})}} = \frac{150}{15} = 10$$

Para conmutar el relé solo necesitamos 71.4 mA de corriente en el colector del transistor, por lo que la corriente de base requerida es:

$$I_B = \frac{I_{coil}}{\beta} = \frac{71.4}{10} = 7.14 \text{ mA}$$

Con la corriente de base del transistor requerida, procedemos a calcular la resistencia de base del transistor R5, con ayuda de la figura 23 podemos visualizar como actúan las corrientes:

$$R_5 = \frac{V_{CE(PC817)} - V_{BE(sat)}}{I_B} = \frac{5 - 0.6}{0.00714} = 616.25 \Omega$$

Para seleccionar la resistencia se la llevo a un valor óhmico comercial redondeando el valor al inmediato superior que es 680Ω con lo que la corriente será suficiente para accionar el led indicador, por lo tanto:

$$R_5 = 680 \Omega$$

La elección de un rele en las salidas en lugar de otros dispositivos como MOSFET o transistores se basa en primera instancia por la propia configuración de los PLC industriales. En estos controladores se pueden encontrar salidas protegidas tanto por transistores como por relés, siendo estos últimos los más utilizados en aplicaciones donde se requiere manejar un rango más amplio de corriente y voltaje, aplicaciones donde no se vayan a realizar muchas conmutaciones al día, los relés son elementos más simples y económicos, aplicaciones donde no se requiera alta velocidad de conmutación.

Si bien la vida útil de un rele suele limitarse a 100,000 conmutaciones; son componentes simples, económicos y robustos que permiten trabajar con potencias considerables. Son ideales para aplicaciones donde la velocidad de conmutación y la cantidad de conmutaciones al día no son factores críticos.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, además que para un proyecto como este en donde la cantidad de conmutaciones al día no es numerosa, el uso de un relé es una alternativa simple y funcional; pudiendo tener una vida útil de varios años.

3.6.4. Diseño e implementación de las placas PCB del controlador

El controlador consiste en 3 placas unidas mediante conectores tipo Header (espadín) que permitirá que todo el conjunto sea desmontable. Las 3 placas son: el Arduino MEGA 2560 que será el primer nivel de las placas, el segundo nivel de las placas será la PCB que recibe la tensión de alimentación y la deriva a todos los componentes además de contener los circuitos que separan el control de la potencia, finalmente se tiene el tercer nivel que contiene los circuitos de accionamiento de los relés y los leds indicadores.

El diseño del controlador se realizó de esta manera con la visión de que sea fácil desmontar y montar las placas para poder realizar reparaciones fácilmente, así como sucede con la arquitectura de un PLC industrial.

a. Primer nivel: Placa Arduino Mega 2560

Este nivel consta únicamente de la placa Arduino, esta se podrá montar y desmontar de la segunda placa. La elección de que la placa Arduino sea desmontable y no fija se realizó tomando en cuenta que esta no tiene grado industrial y que a pesar de las protecciones que se van a incorporar siempre existe una posibilidad de que algún elemento falle. En caso ocurra algún fallo con la placa Arduino, será posible reemplazarla fácilmente ya que se podrá desmontar y además estas placas son económicas.

b. Segundo nivel: Protección de la placa Arduino y distribución eléctrica

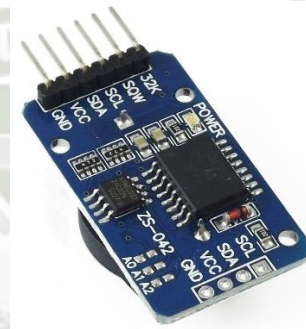
Este segundo nivel, que también es desmontable, se diseñó con la idea de que el Arduino pueda ser removible fácilmente, además de que la placa superior de los relés también se pueda desmontar. Esto se realizó considerando que el mantenimiento y/o reparación ante alguna falla pueda llevarse a cabo fácilmente y la identificación de la misma sea más simple.

Esta placa incorpora todos los optoacopladores tanto de las entradas como las salidas digitales, las borneras de alimentación y distribución eléctrica, las borneras de las entradas analógicas y entradas digitales de sensores, la bornera para la comunicación I2C y el módulo del RTC DS3231.

El módulo de reloj en tiempo real (RTC) DS3231 es una placa que incorpora el integrado DS3231 que es un reloj digital de alta precisión que cuenta con cristal oscilador

compensador de temperatura, lo que permite que a tenga muy pocos segundos de margen de error anual. El módulo integra además una memoria EEPROM que guarda la hora y una pila que evita que se pierdan los datos. El RTC DS3231 es un integrado que se comunica mediante el protocolo de comunicación del bus I2C. La conexión con el Arduino es directa, solo se tiene que conectar la alimentación, la tierra y los pines correspondientes del protocolo de comunicación del bus que son los pines SDA y SCL. Este módulo cuenta con una librería que permite una manipulación simple y directa. (Para más detalle, ver Anexo 9)

Figura 55 Modulo RTC DS3231



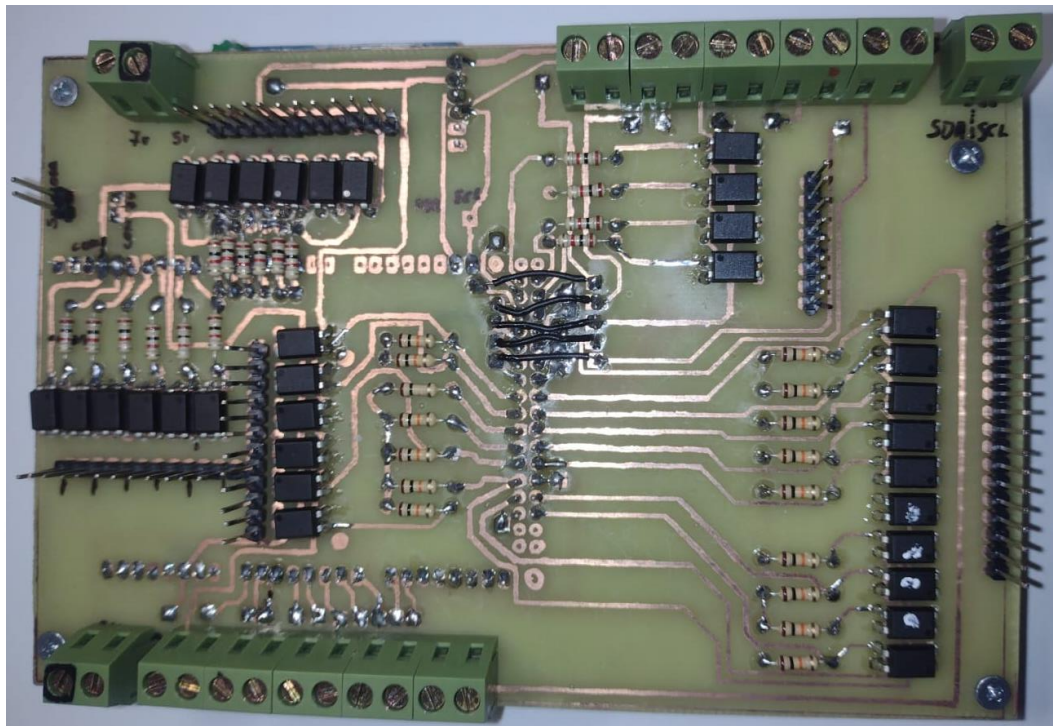
Nota: Tomado de <https://naylampmechatronics.com/>

Esta PCB recibe la tensión de 7 V para alimentar al Arduino y la tensión de 5 V de la fuente de alimentación y la distribuye a todos los elementos del controlador, esto con el objetivo de separar circuitos de control y potencia, además de garantizar que el Arduino no será el que suministre corriente. Para ver más a detalle la configuración de la placa **ver Anexo 6, Anexo 7, Anexo 8 y Anexo14.**

La fabricación de esta placa se realizó de forma manual utilizando el método del planchado que es el más común en el desarrollo de proyectos de electrónica. Este método consiste en imprimir el patrón de las pistas de cobre sobre papel couche, luego con la aplicación de calor se traspa el patrón de las pistas a una placa de fibra de vidrio con cobre virgen en ambas caras de la placa, seguidamente se elimina el papel mojándolo y retirándolo cuidadosamente para luego sumergir la placa en cloruro férrico que disolverá todo el cobre que no esté protegido por el patrón, revelando así las pistas.

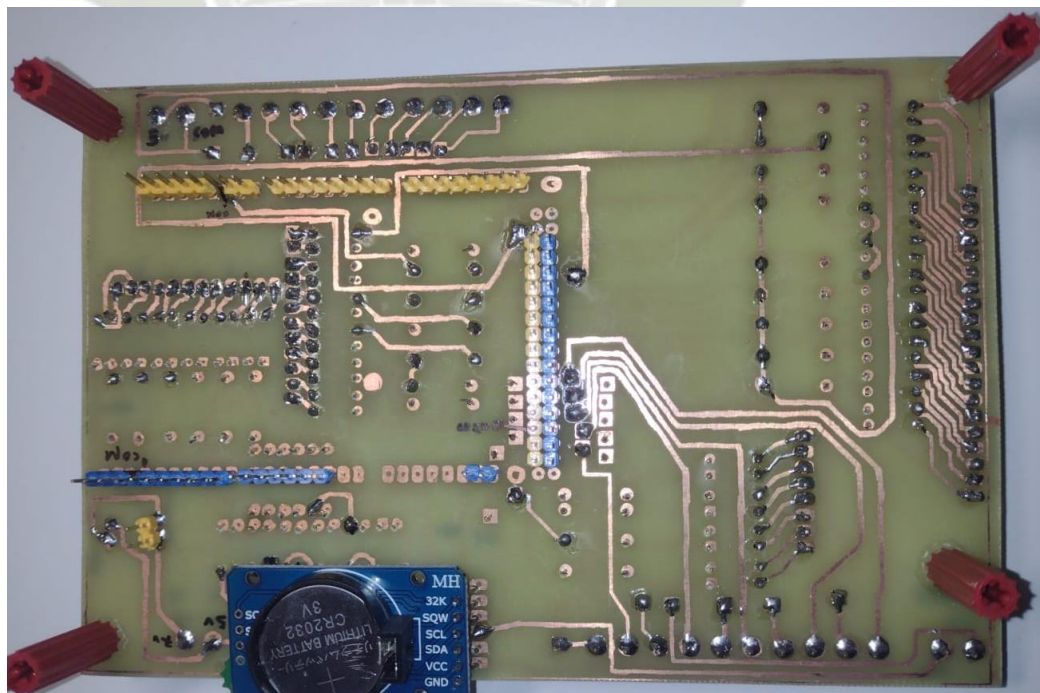
Por último, se perforaron todos los orificios y se soldaron los componentes. En las figuras 25 y 26 se puede apreciar la PCB del segundo nivel con el patrón de las pistas ya revelado y todos los elementos de los circuitos soldados.

Figura 56 Vista Superior de la PCB del Segundo Nivel.



Nota: Se pueden apreciar todos los componentes ya soldados. Elaboración propia.

Figura 57 Vista Inferior de la PCB del Segundo Nivel.

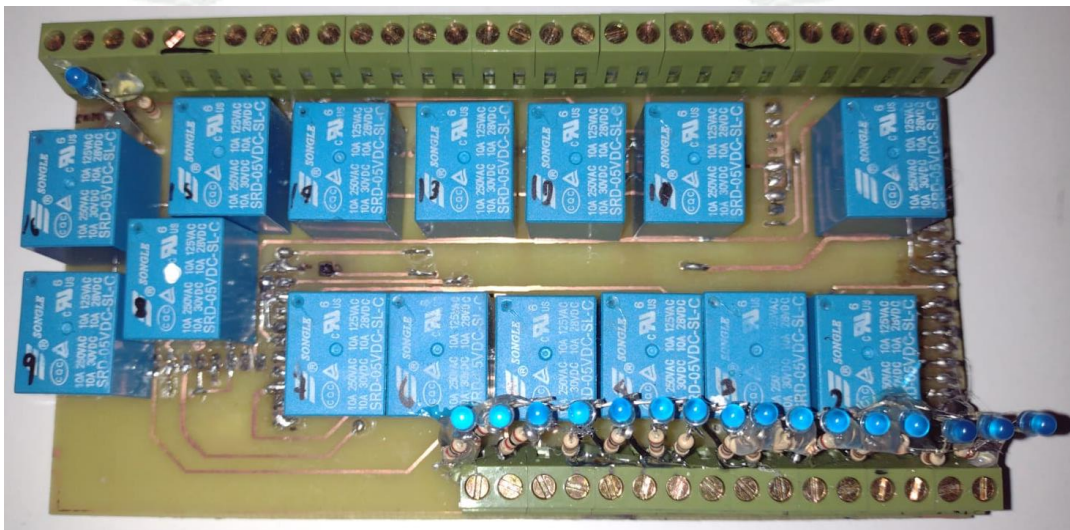


Nota: Se aprecia el módulo RTC DS3231 incorporado. Elaboración propia.

c. Tercer nivel: Circuitos de potencia con relés, entradas y salidas digitales.

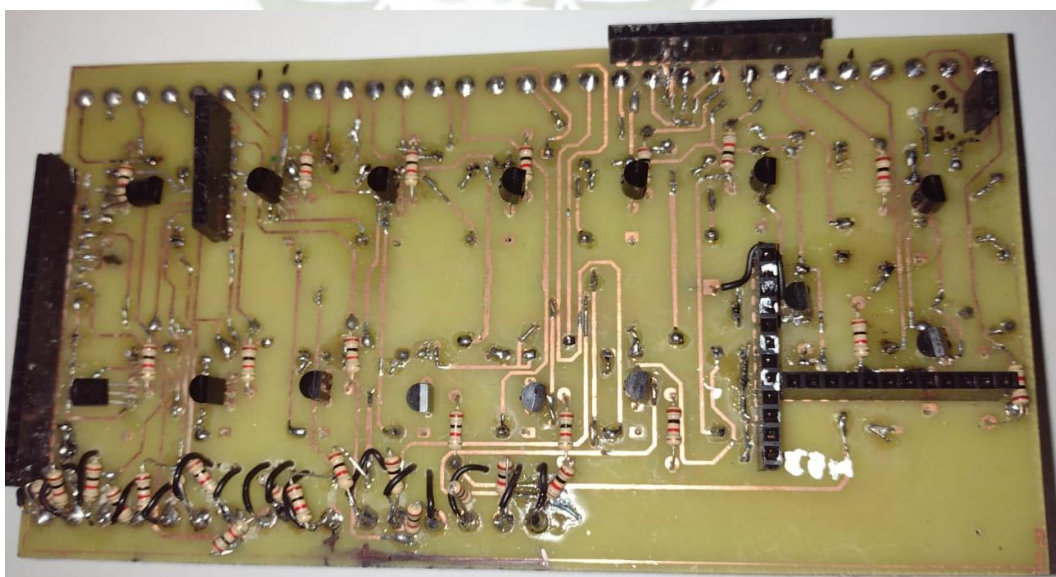
Este tercer nivel, también desmontable, se diseñó para contener todos los circuitos de la etapa de potencia del controlador. Esta PCB contiene los transistores y relés de las salidas digitales, además de los leds indicadores de las entradas digitales discretas y las borneras de dichas entradas y las salidas digitales. Para más información ver **Anexo 10**, **Anexo 11**, **Anexo 12** y **Anexo 15**.

Figura 58 Vista Superior de la PCB del Tercer Nivel



Nota: El led de la esquina superior izquierda indica el encendido del controlador.
Elaboración propia.

Figura 59 Vista Inferior de la PCB del Tercer Nivel.



Nota: Elaboración propia.

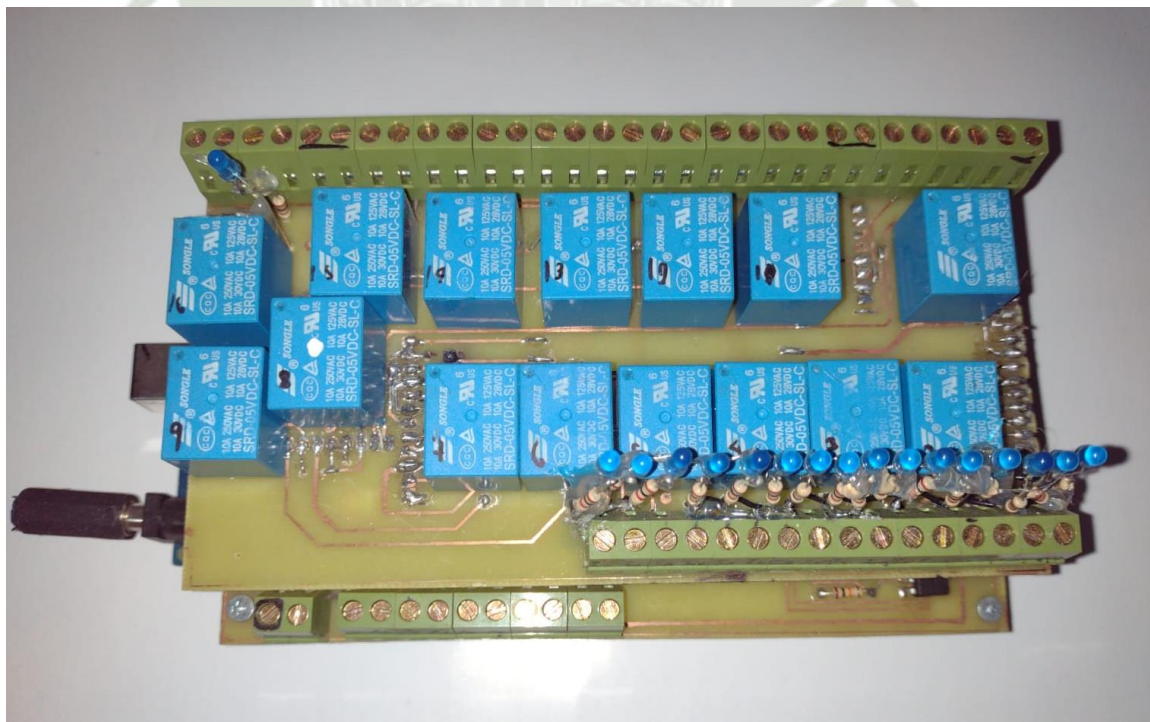
d. Ensamble del controlador

Una vez que se tuvieron listas las placas PCB del controlador con todos los componentes soldados se procedió a realizar el montaje de los 3 niveles de placas. Las placas se fabricaron con el mismo método, transferencia del patrón con papel couche con calor y revelado con cloruro férrico.

En las figuras 29, 30 y 31 se puede apreciar la distribución de los 3 niveles de las placas del controlador. En el primer nivel tenemos a la placa Arduino MEGA 2560 siendo alimentada por el Jack. En el segundo nivel tenemos la PCB con los elementos de protección, las entradas analógicas, entradas digitales de sensores, borneras de distribución eléctrica y borneras de comunicación I2C. Por último, en el tercer nivel tenemos los circuitos de potencia de los relés para las salidas digitales, las borneras de las entradas digitales, las borneras de las salidas digitales a relé y los leds indicadores.

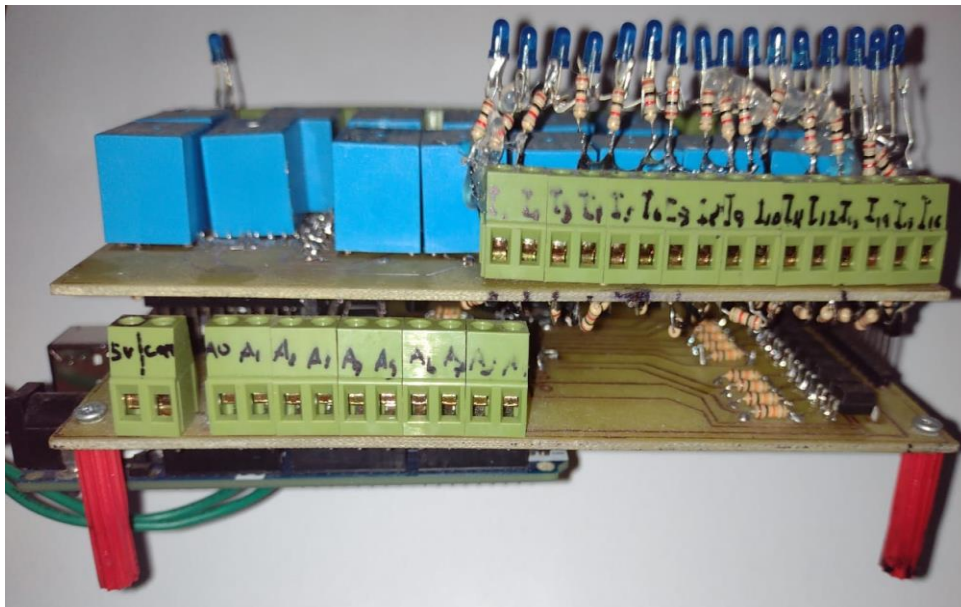
Todas las placas son desmontables, esto facilitara su mantenimiento y/o reparación en caso de ser necesario.

Figura 60 Vista Superior del Controlador con sus 3 Niveles ya Ensamblados.



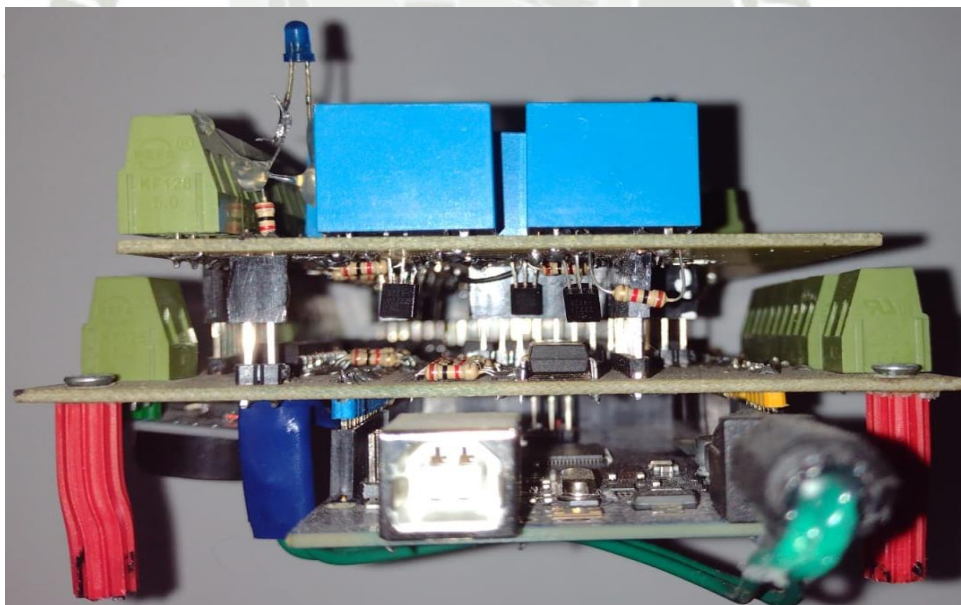
Nota: Elaboración propia.

Figura 61 Vista Frontal del Controlador con sus 3 Niveles ya Ensamblados.



Nota: Elaboración propia.

Figura 62 Vista Lateral del Controlador con sus 3 Niveles ya Ensamblados.



Nota: Se puede apreciar la distribución de los 3 niveles del controlador. Elaboración propia.

Por último, se adiciono una carcasa simple que consiste en una caja de PVC que contendrá al controlador para facilitar la manipulación. Adicionalmente se montó adaptadores a riel DIN con el objetivo de que el controlador pueda ser instalado dentro de un tablero eléctrico.

Figura 63 Carcasa del Controlador con los Adaptadores para Riel DIN ya Montados.

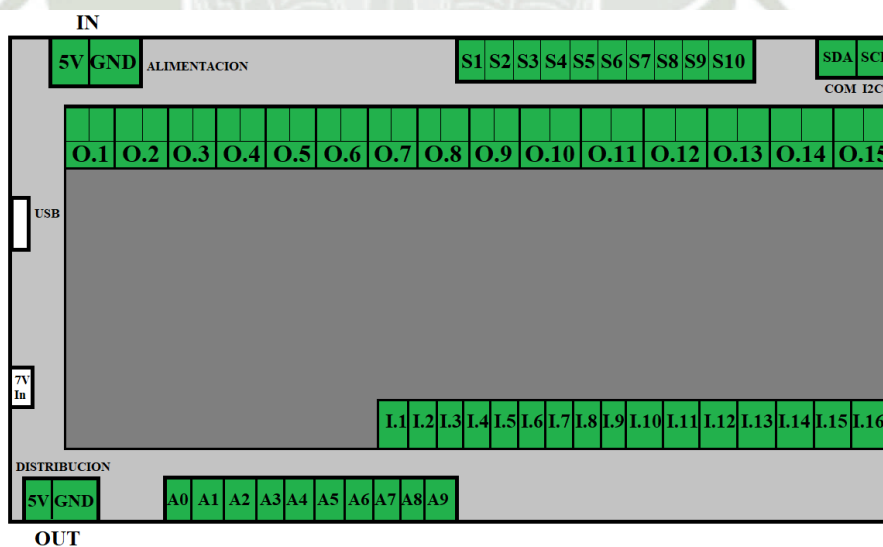


Nota: Elaboración propia.

e. Distribución de las entradas y salidas del controlador

En la figura 33 se puede apreciar cómo es que las borneras del controlador están distribuidas, cada segmento representa un único borne a excepción de las salidas digitales (de O.1 hasta O.15) ya que como son salidas a relé estos requieren de 2 bornes por cada relé.

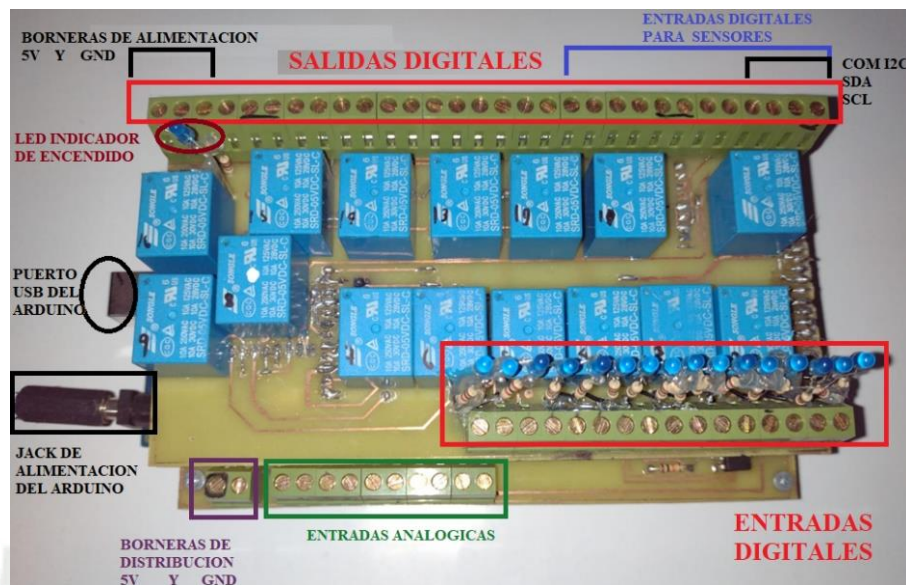
Figura 64 Diagrama de la Distribución de las Borneras del Controlador.



Nota: Elaboración propia.

En la figura 34 se puede apreciar como se ve físicamente la distribución de borneras del controlador.

Figura 65 Distribución de las Entradas y Salidas del Controlador Ensamblado.



Nota: Elaboración propia.

Cada uno de los bornes de las entradas y salidas representa un pin del Arduino, con excepción de las salidas digitales que involucra a dos bornes por salida como se mencionó anteriormente. A continuación, se presentan las tablas 22, 23, 24, 25 y 26 en las que se detalla los bornes del controlador y su equivalencia en pines del Arduino:

Tabla 22 Relación Entre las Entradas Digitales del Controlador y los Pines del Arduino.

ENTRADA DIGITAL	ARDUINO PIN
I.1	47
I.2	36
I.3	38
I.4	40
I.5	42
I.6	44
I.7	39
I.8	37
I.9	43
I.10	41
I.11	46
I.12	45

I.13	49
I.14	48
I.15	51
I.16	50

Tabla 23 *Relación Entre las Salidas Digitales del Controlador y los Pines del Arduino.*

SALIDAS DIGITAL	ARDUINO PIN
O.1	7
O.2	13
O.3	12
O.4	6
O.5	10
O.6	5
O.7	11
O.8	4
O.9	9
O.10	3
O.11	22
O.12	2
O.13	24
O.14	23
O.15	8

Tabla 24 *Relación Entre las Entradas Digitales de Sensores del Controlador y los Pines del Arduino*

SALIDAS DIGITAL <i>(Sensores)</i>	ARDUINO PIN
S1	26
S2	27
S3	28
S4	29
S5	30
S6	31
S7	32
S8	33
S9	34
S10	35

Tabla 25 *Relación Entre las Entradas Analógicas del Controlador y los Pines del Arduino.*

ENTRADAS ANALÓGICAS	ARDUINO PIN
A0	A0
A1	A1
A2	A2
A3	A3
A4	A4
A5	A5
A6	A6
A7	A7
A8	A8
A9	A9

Tabla 26 *Relación entre las Borneras del Bus de Comunicación I2C del Controlador y los Pines del Arduino.*

BUS I2C	ARDUINO PIN
SDA	20
SCL	21

Se seleccionaron los pines del Arduino MEGA 2560 teniendo en cuenta la recomendación del fabricante acerca de la función de cada pin. Si un pin de la placa Arduino se recomienda utilizarlo como salida o entrada, entonces en la construcción del controlador se respetará esta configuración para cada pin. Para así disminuir la posibilidad de que se produzca alguna falla.

Por otro lado, la relación entre las borneras del controlador y los pines de la placa Arduino se realizó de la forma expuesta en las tablas anteriores es por la facilidad al momento de realizar las pistas en las placas PCB.

3.7. Implementación del tablero eléctrico

El controlador se diseñó bajo el criterio de que pueda ser montado en un tablero eléctrico, como ocurriría con un PLC en un sistema industrial. Esto facilitará el cableado de todos los elementos del sistema con lo que se tendrá un orden en las conexiones.

Como se tendrá una etapa de mando y una de potencia, por la bomba y las válvulas, se consideró una llave termomagnética como dispositivo de protección. Cabe resaltar que la fuente de donde se obtendrá la energía ya cuenta con un tablero con llaves termomagnéticas y diferenciales.

En la figura 35 se puede apreciar al controlador, el regulador de tensión y la llave termomagnética montados sobre rieles DIN en un tablero eléctrico, simulando así las condiciones de un sistema de control industrial.

*Figura 66 Montaje del Controlador y el Modulo Regulador de Tension en un
Tablero Electrico.*

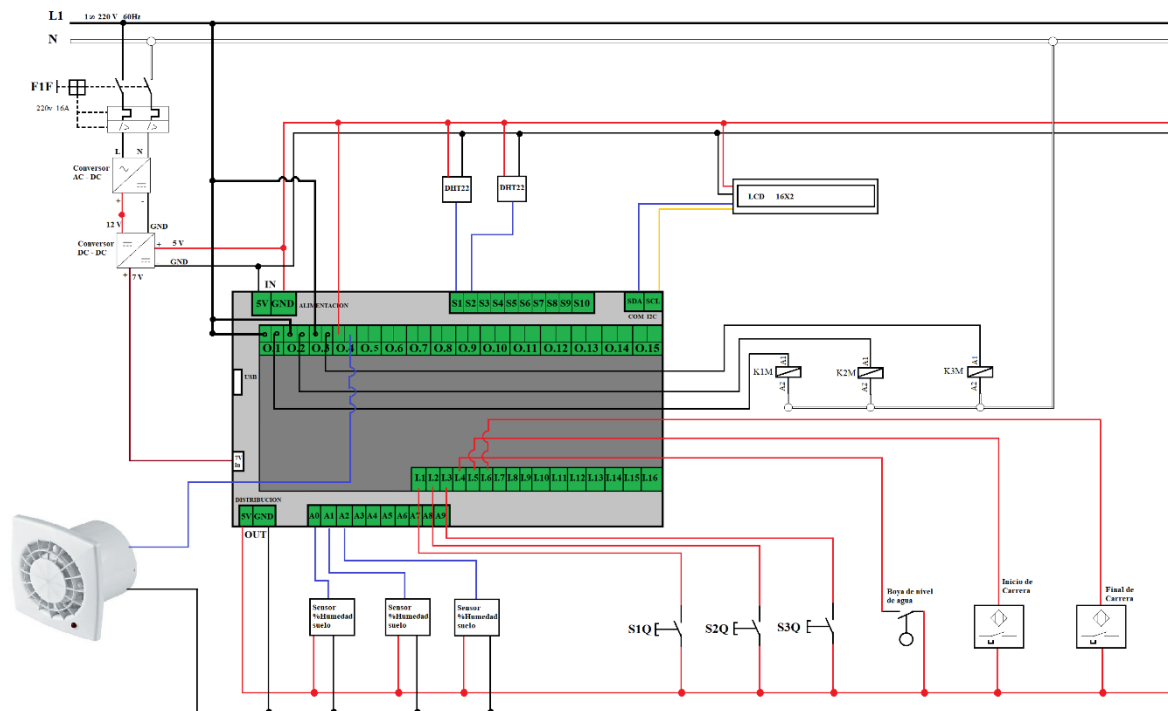


Nota: Elaboración propia.

3.7.1. Circuito de Mando

A continuación, se presenta el circuito de mando o control, el cual engloba toda la red de sensores y el controlador:

Figura 67 Circuito de Mando del Sistema de Control.

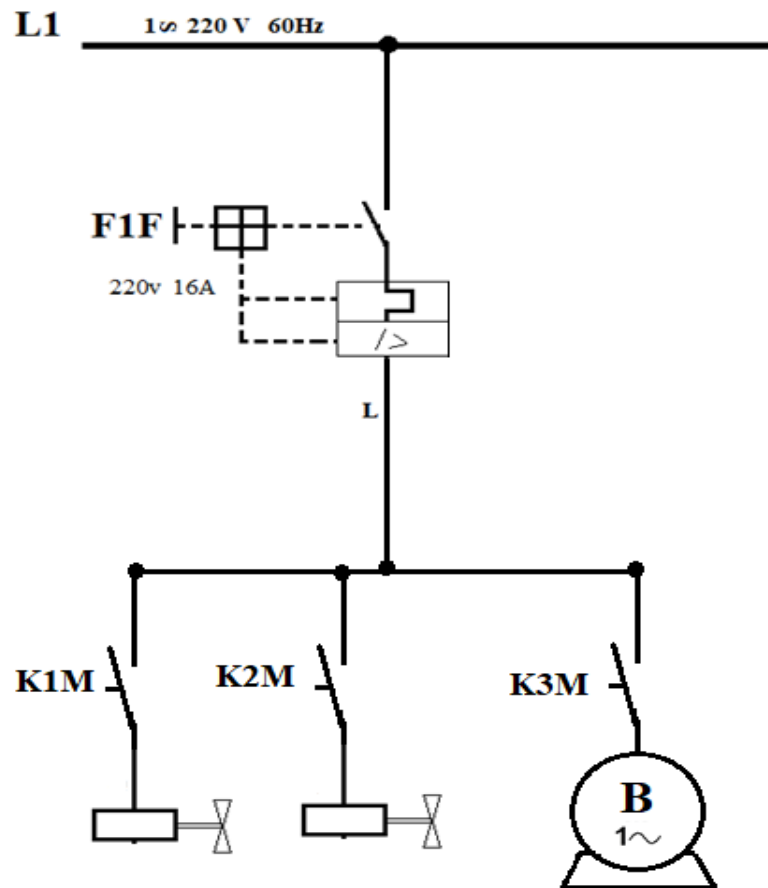


Nota: Elaboración propia.

3.7.2. Circuito de Potencia

Seguidamente se presenta el circuito de fuerza o potencia, el cual engloba todos los actuadores:

Figura 68 Circuito de Fuerza del Sistema.

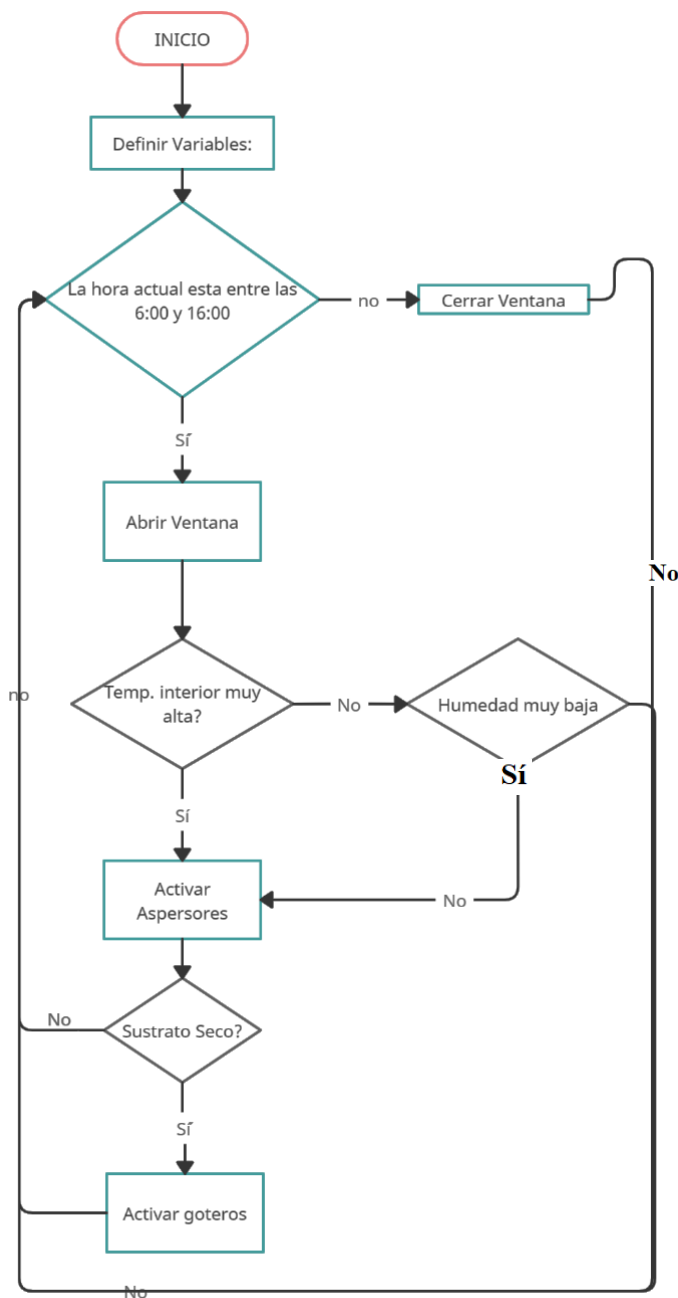


Nota: Elaboración propia.

3.8. Diseño de código para el sistema de control

3.8.1. Diagrama de flujo

Para realizar la programación primero hay que hacer un diagrama de flujo que sirva de guía de la lógica de código a crear para cumplir los objetivos del proyecto.



Con el diagrama de flujo definido se puede proceder a realizar la programación, incluyendo restricciones y demás elementos necesarios para programar el controlador.

3.8.2. Codificación

Tomando de guía el diagrama de flujo se procede a realizar la programación en el entorno GUI de Arduino. Para hacer el código que hará que el controlador opere correctamente se consideró los siguientes puntos:

- Como interfaz gráfica se tendrá un display LCD de 16x2 con un módulo que permita comunicarse mediante el protocolo I2C.
- Al igual que el LCD, el módulo RTC DS3231 trabaja mediante el protocolo I2C pero este ya está embebido en el controlador.
- La temperatura ambiental interior máxima será de 25°C, si la temperatura interior supera este valor se activarán los aspersores por un breve periodo de tiempo para bajar la temperatura.
- La temperatura ambiental mínima será de 15°C, si la temperatura en el día es menor a ese valor se cerrará la ventana para conservar el calor.
- El porcentaje de humedad ambiental máximo será de 85%, si se supera este límite los aspersores se apagarán.
- El porcentaje de humedad ambiental mínimo será de 55%, si la humedad cae más debajo de este valor se encenderán los aspersores.
- El porcentaje de humedad de suelo máximo será de 80%, si se supera este límite no se realizará el riego.
- El porcentaje de humedad de suelo mínimo será de 55%, si la humedad cae más debajo de este valor se iniciará el riego.
- El riego y la aspersión solo se realizará durante el día, entre las 6:00 y las 16:00.
- La ventana estará abierta durante el día entre las 6:00 y las 16:00, fuera de ese horario la ventana permanecerá cerrada.
- Cuando el sensor de nivel mínimo del tanque se active se enviará una alarma por el LCD.

Se inicia la programación incluyendo las librerías necesarias para el proyecto, estas son la librería para controlar el LCD con protocolo I2C, la librería para controlar el módulo RTC con protocolo I2C y las librerías para controlar el sensor de humedad DHT22.

```
//-----INCLUYENDO LIBRERIAS NECESARIAS-----  
#include <LiquidCrystal_I2C.h>/**LIBRERIA LCD COMUNICACION I2C**/  
#include <RTCLib.h>/**LIBRERIA MODULO RTC DS3231**/  
#include <DHT.h>/**LIBRERIAS SENSOR DHT22**/
```

```
#include <DHT_U.h>//*****LIBRERIAS SENSOR DHT22*****
//-----
```

Seguidamente se procede a declarar las variables, a continuación, se presentarán las principales variables del código. Primero declaramos las variables para la habilitación de las entradas digitales discretas:

```
//-----ENTRADAS DIGITALES-----
const byte I_1 = 47;
const byte I_2 = 36;
const byte I_3 = 38;
const byte I_4 = 40;
const byte I_5 = 42;
    const byte I_6 = 44;
```

Seguidamente, declaramos las variables para la habilitación de las salidas a relé:

```
// -----SALIDAS DIGITALES A RELE -----
const byte O_1 = 7;
const byte O_2 = 13;
const byte O_3 = 12;
const byte O_14 = 23;
const byte O_15 = 8;
```

A continuación, se declaran las variables para habilitar las entradas digitales de los sensores DHT22:

```
//-----ENTRADAS SENSORES DIGITALES-----
int S_1 = 26;
int S_2 = 27;
```

Luego, se declaran las variables para habilitar las entradas analógicas:

```
//-----ENTRADAS ANALOGICAS-----
const int A_0=A0;
const int A_1=A1;
const int A_2=A2;
```

Por último, se declaran las variables los valores máximos y mínimos para el control del invernadero:

```
//-----VARIABLES DE TRABAJO-----
int Tmax=25;//*****CONSTANTE TEMPERATURA AMBIENTAL INTERIOR MAXIMA*****
```

```
int Tmin=15; //*****CONSTANTE TEMPERATURA AMBIENTAL INTERIOR MINIMA*****  
int Hmax_in=85; //*****CONSTANTE %H AMBIENTAL INTERIOR MAXIMA*****  
int Hmin_in=55; //*****CONSTANTE %H AMBIENTAL INTERIOR MINIMA*****  
int Hsoil_max=80; //*****CONSTANTE %HUMEDAD DE SUELO MAXIMA*****  
int Hsoil_min=40; //*****CONSTANTE %HUMEDAD DE SUELO MINIMA*****
```

Estas fueron las variables más importantes para la funcionalidad del código, no se presentaron la totalidad de las variables como contadores y booleanos para que no se extienda demasiado este apartado. Para ver a detalle el código, **revisar Anexo 13**.

Una vez que se tuvieron declaradas las variables que se usarán el código, se procede a crear objetos de trabajo. Dentro del GUI de Arduino, una variable tipo objeto es aquella que almacena datos e información relevante sobre un objeto físico con el que se va a interactuar.

```
//-----Creación de objetos-----  
RTC_DS3231 rtc; //***** Crea un objeto del tipo RTC_DS3231*****  
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); //*****Crea un objeto del tipo LCD 16x2*****  
DHT dht1(S_1, DHT22); //*****Crea un objeto DHT22*****  
DHT dht2(S_2, DHT22); //*****Crea un objeto DHT22*****
```

Habiendo hecho esto, ya se tienen todos los elementos necesarios para desarrollar la lógica de programación para programar el controlador.

A continuación, se presentarán las funciones que se utilizaron en el código. Una función es un bloque de código que realiza una función en específico, las funciones se invocan desde el código principal cuando se cumple una condición. Cuando se invoca una función se envía información del código principal a la misma para realizar una tarea específica, una vez que se ha completado la tarea se sale de la función y se regresa al código principal. Las funciones tienen la función de aligerar el código al segmentarlo, el programa principal se hace más legible ya que cuando se requiere hacer alguna tarea en específico solo se tiene que invocar a la función sin necesidad de saturar el código, las funciones son reutilizables lo que evita repetir las instrucciones varias veces y además facilitan el mantenimiento del código.

A continuación, se presenta el segmento del código donde se agrupan las funciones, los códigos de las mismas se han comprimido para que no se extienda demasiado este apartado, para revisar a más detalle el código **ver Anexo 13**.

```
//-----FUNCION QUE PERMITE NAVEGAR EN EL MENU PRINCIPAL-----
void navegar(){...
}
//-----

//-----FUNCION QUE LIMITA LA NAVEGACION DEL MENU A 7 OPCIONES-----
void Limitar_Menu(){...
}
//-----

//-----FUNCION QUE PERMITE NAVEGAR EN EL MENU CONFIGURACION-----
void Limitar_Menu_Config(){...
}
//-----

//-----FUNCION QUE PERMITE LIMITAR LA CONFIGURACION DE PARAMETROS AMBIENTALES-----
void Limitar_Scroll(){...
}
//-----

//-----FUNCION QUE PERMITE CONTROLAR LA SELECCION DE OPCIONES-----
void retardo(){...
}
//-----
```

Habiendo definido las funciones, damos pase a la inicialización del programa mediante el void setup(). Dentro de este bloque de código se inicializan las variables de entrada y salida definiendo el estado de cada una de estas, también se inicializa la interfaz gráfica con la pantalla LCD y los demás módulos físicos conectados al Arduino.

```
void setup() {
//-----CONFIGURACION DE PINES DIGITALES (ENTRADAS/SALIDAS) -----
pinMode(O_1, OUTPUT);
pinMode(I_1, INPUT);
pinMode(O_2, OUTPUT);
pinMode(I_2, INPUT);
pinMode(O_3, OUTPUT);
pinMode(O_15, OUTPUT);
pinMode(I_3, INPUT);
//-----

//-----INICIALIZACION DEL MODULO LCD-----
lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.clear();
//-----

rtc.begin();//*****INICIALIZACION DEL MODULO RTC DS3231*****
dht1.begin();//*****INICIALIZACION DEL SENSOR DHT22 (1)*****
dht2.begin();//*****INICIALIZACION DEL SENSOR DHT22 (2)*****
Serial.begin(9600);// *****INICIALIZA COMUNICACION SERIAL*****
}
```

A continuación, se presentará el void loop () que contiene el programa principal que se grabara en el controlador. En un primer bloque tenemos una estructura que realizara el censado y actualizara los datos de las variables físicas con las que se trabaja, luego se tiene un condicional que permitirá navegar por el menú principal:

```
void loop() {
//-----INSTRUCCION QUE ACTUALIZARA LOS DATOS DE TODOS LOS SENSORES Y MODULOS CADA MINUTO-----
//-----MENU PRINCIPAL-----
if((digitalRead(I_1) == HIGH) || (digitalRead(I_2) == HIGH ||(digitalRead(I_3) == HIGH))){
    if(cont_Menu==1){ ...
    }
    if(cont_Menu==2){ ...
    }
    if(cont_Menu==3){ ...
    }
    if(cont_Menu==4){ ...
    }
    if(cont_Menu==5){ ...
    }
    if(cont_Menu==6){ ...
    }
}
//*****MENU CONFIGURACION*****
```

Nuevamente se ha comprimido el código para que esta sección no sea demasiado extensa, para ver a más detalle el código revisar el Anexo 13.

Después de este bloque, tenemos la estructura que lleva el código para la configuración manual de las condiciones máximas y mínimas del invernadero.

```
//*****MENU CONFIGURACION*****
//*****CONFIGURACION DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTAL MAXIMA Y MINIMA*****
| | | | | if(cont_Menu==1){ ...
| | | | | }
//*****
//*****CONFIGURACION HUMEDAD DE SUELO MAXIMA Y MINIMA*****
| | | | | if(cont_Menu==2){ ...
| | | | | }
//*****
```

En este bloque se selecciona la opción 1 o la opción 2 se podrá realizar la configuración de la humedad y temperatura ambiente o la humedad del suelo.

Seguidamente tenemos el tercer bloque que es el encargado de realizar el control de la temperatura y humedad ambiental por medio del extractor y la aspersión de agua; y el control de la humedad del suelo por medio del riego.

CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. Funcionamiento del controlador

Una vez se tuvo ensamblado el controlador se procedió a conectar la alimentación del mismo a los convertidores DC - DC y a la fuente de alimentación externa. Se utilizó una fuente de alimentación de 12 Voltios y 10 Amperios ya que el extractor tiene un consumo de 3 A y la bomba de agua tiene un consumo de 1.75 A. Esta fuente externa recibe la tensión de 220V de la red y la transforma en 12V de corriente continua rectificada.

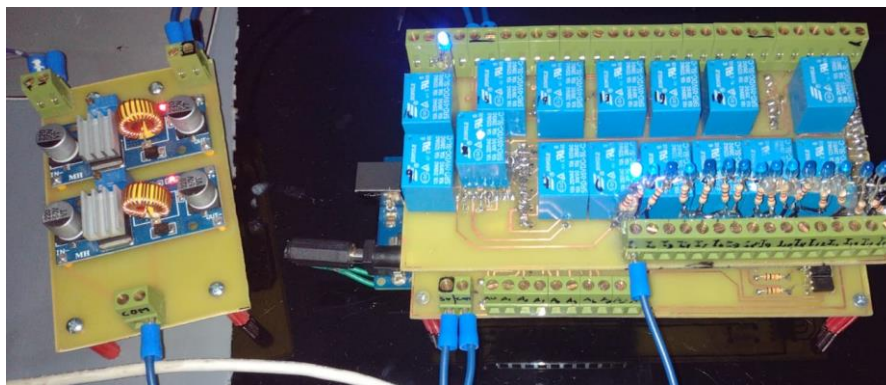
Figura 69 Fuente de Alimentación Externa de 12V y 10A.



Nota: Elaboración propia.

Se comprobó que la placa se energice como se había diseñado y se midieron los valores de los parámetros de funcionamiento de las partes que constituyen al controlador, se verificó que los contactos estén en buen estado y que no se produzcan cortocircuitos.

Figura 70 Controlador Energizado y en Funcionamiento.

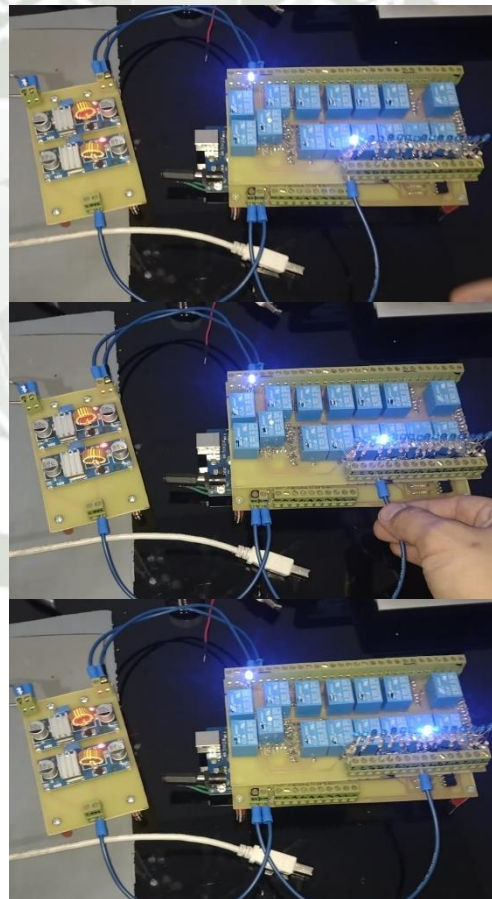


Nota: Elaboración propia.

Luego de que se verifico que el controlador se energiza correctamente y no se produjeron fallos se procedió a comprobar la activación y correcto funcionamiento de los elementos del mismo.

Para ello, se elaboró y cargó un código de prueba en el controlador con el que se comprobó el correcto funcionamiento de las entradas y salidas del mismo. En las siguientes figuras se puede apreciar cómo se activan los leds indicadores de las entradas digitales, lo que comprueba el funcionamiento correcto de los circuitos de protección. El funcionamiento de las salidas se comprobó al activar los relés de cada una de estas y midiendo con el multímetro la continuidad en los bornes de cada salida al activarse.

Figura 71 Prueba de las Entradas y Salidas del Controlador.



Nota: Se puede apreciar cómo se van encendiendo los leds a medida que se simula una entrada digital. Elaboración propia.

Se realizó, además, pruebas individuales con cada uno de los elementos del sistema de control por separado y se comprobó que el comportamiento es el que se esperaba.

4.2. Funcionamiento del sistema de control

Una vez que se realizaron satisfactoriamente las pruebas individuales de los componentes del sistema de control, se procedió a realizar la instalación del sistema de control en el invernadero.

Primero se realizó el montaje de los elementos del tablero de control y sus conexiones correspondientes, para ello se etiquetaron todos los cables y se los agrupó con precintos:

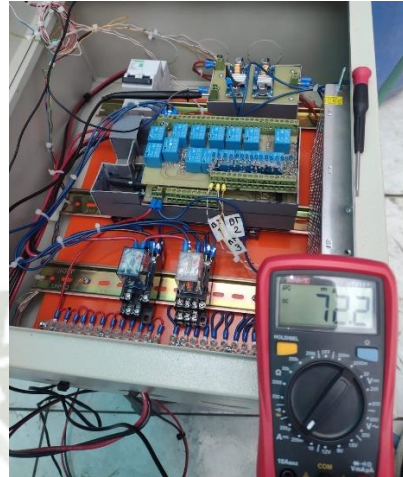
Figura 72 *Implementación del Tablero de Control.*



Nota: Esta implementación se realizó siguiendo la estructura de los circuitos de mando y fuerza. Se adicióno un relé extra para realizar pruebas de funcionamiento. Además, se incluyó una llave termomagnética de 16 A como elemento de protección. Elaboración propia.

Se comprobó el funcionamiento en vacío de los elementos del tablero eléctrico y se procedió a medir el consumo de corriente:

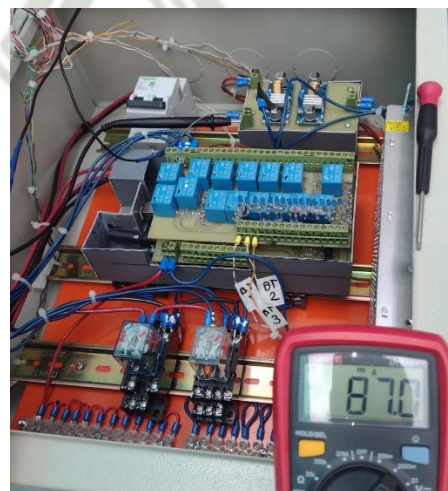
Figura 73 *Medición del Consumo de Corriente Interna del Sistema.*



Nota: El multímetro nos indica que se tiene un consumo de corriente interno de 72.2 mA, este valor se debe al propio consumo del Arduino, los leds indicadores, el módulo RTC y a los componentes internos de las placas del controlador, los convertidores DC – DC y la fuente de alimentación externa. Elaboración propia.

Seguidamente se conectó la pantalla LCD y los pulsadores para volver a realizar la medición del consumo de corriente. Este valor será el consumo del propio sistema sin considerar sensores ni actuadores.

Figura 74 *Medición del Consumo de Corriente Interna del Sistema Incluyendo el display LCD y Pulsadores.*



Nota: El multímetro nos indica que se tiene un consumo de corriente interno de 87.0mA. Elaboración propia.

Una vez ya implementado el tablero eléctrico, con todos los elementos y conexiones necesarias, se instalaron los sensores en el invernadero y se posiciono al tablero con el controlador en su ubicación destinada. Seguidamente se procedió a instalar las tuberías y mangueras de riego, junto con las válvulas y la bomba.

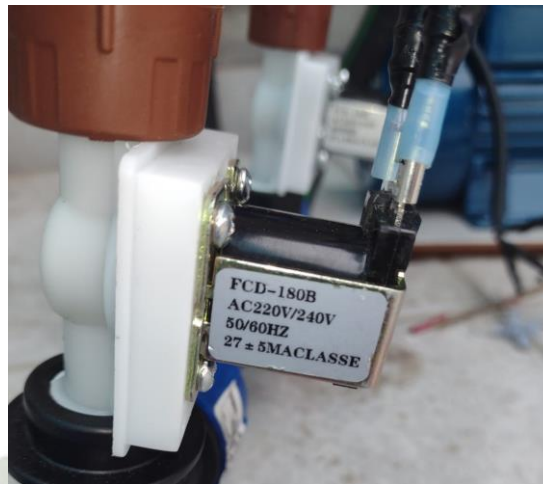
Figura 75 *Tablero de Control, Vista externa.*



Nota: Se aprecia la parte exterior del tablero de control, destacando la pantalla LCD y los pulsadores. Elaboración propia.

Para este proyecto se utilizaron válvulas solenoide de 1/2" que tienen un consumo de 27 ± 5 mA y operan con corriente alterna monofásica.

Figura 76 Válvula Solenoide de 1/2" Instalada e el Sistema de Riego.



Nota: Se utilizaron 2 válvulas, una para la aspersión de agua al ambiente y otra para el riego por goteo. Elaboración propia.

Se utilizo una bomba de agua eléctrica de ½ HP que tiene un consumo de 1.74 Amperios.

Figura 77 Bomba Eléctrica de 1/2 HP.



Nota: Elaboración propia.

Se realizaron pruebas en vacío para comprobar que todo el sistema funcione según lo previsto. Seguidamente se realizaron las conexiones del circuito de fuerza que involucra las válvulas solenoide y la bomba eléctrica para dar paso a las pruebas de funcionamiento con corriente alterna.

Figura 78 Pruebas de Funcionamiento del Circuito de Fuerza.



Nota: Se puede apreciar el circuito de fuerza (las válvulas y la bomba) y la red de distribución de agua. Elaboración propia.

Los resultados de las pruebas de funcionamiento del circuito de fuerza fueron satisfactorios, comprobando así que el sistema diseñado esté operando de la manera prevista.

Finalmente se cargó el programa definitivo al controlador que se indicó en el punto 3.5.2 y que está más detallado en el Anexo 13.

Se energizó el sistema y se comprobó el funcionamiento de todo el conjunto, a continuación, se muestra en la siguiente figura los parámetros de funcionamiento que indica el display LCD y prueba el funcionamiento correcto del sistema:

Figura 79 Pruebas de los Parámetros de Funcionamiento del Sistema - 1.



Nota: Se puede apreciar que tenemos una temperatura interior de 26°C y un % de humedad del 50%, por lo que en ese momento se encendió el aspersor.
Elaboración propia.

Figura 80 Pruebas de los Parámetros de Funcionamiento del Sistema - 2.



Nota: Se puede apreciar los % de humedad del suelo. Elaboración propia.

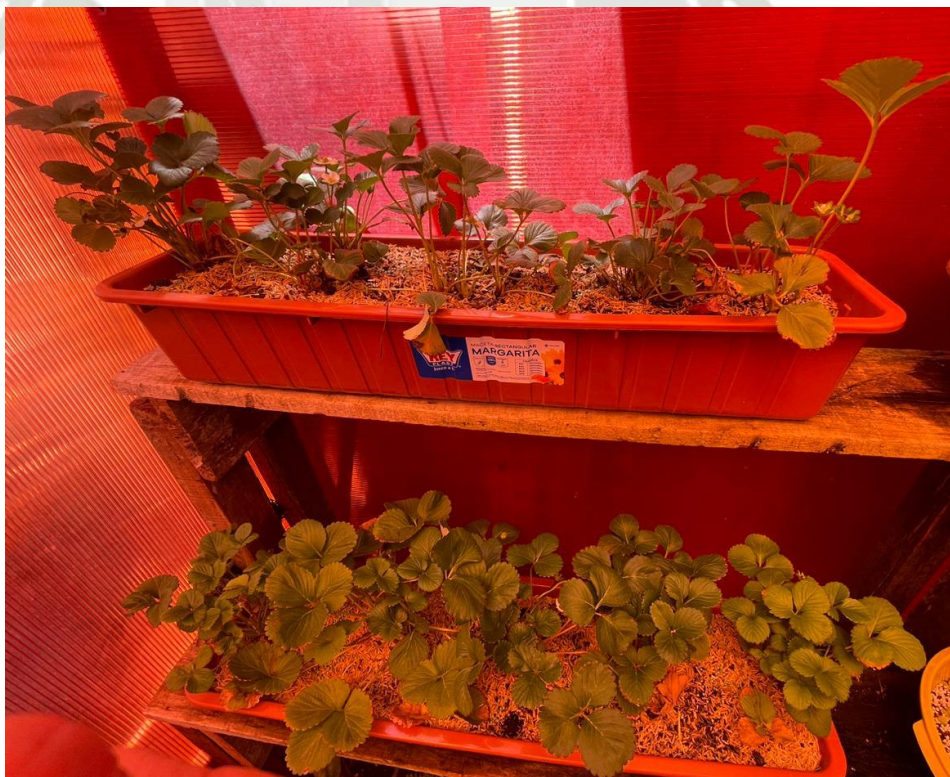
El sistema funciona de acuerdo con lo previsto en el diseño, las protecciones que se le añadieron al Arduino permitieron que este pueda operar en un entorno fuera de laboratorio, interactuando con la red de sensores y pudiendo pilotar dispositivos de potencia como las válvulas solenoide y la bomba eléctrica.

4.3. Respuesta del cultivo al sistema implementado

Luego de haber trasplantado las plantas de fresa a las bandejas de cultivo y posicionarlas dentro del invernadero con el sistema de control implementado, se dejó en funcionamiento el sistema para comprobar su respuesta ante un régimen de operación permanente.

La fresa es una planta que es resistente y vigorosa cuando tiene las condiciones de cultivo necesarias. Conforme avanzaban los días, se podía apreciar como las plantas recuperaban vigor después de haber sido trasplantadas.

Figura 81 *Plantas de Fresa Creciendo Dentro del Invernadero con el Sistema de Control Implementado.*



Nota: Después de los 5 primeros días las plantas comenzaron a recuperar vigor.
Elaboración propia.

Tras haber transcurrido 2 semanas, las plantas se recuperaron completamente y comenzaron a desarrollarse, emitiendo nuevas hojas y los primeros frutos. La fresa es un cultivo que tras haber sido plantada puede empezar a producir después de un mes, en este caso al finalizar la segunda semana ya se tenían las primeras flores y frutos.

Figura 82 *Primeras Flores y Frutos del Cultivo.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 83 *Progreso en el cultivo de las plantas de fresa.*



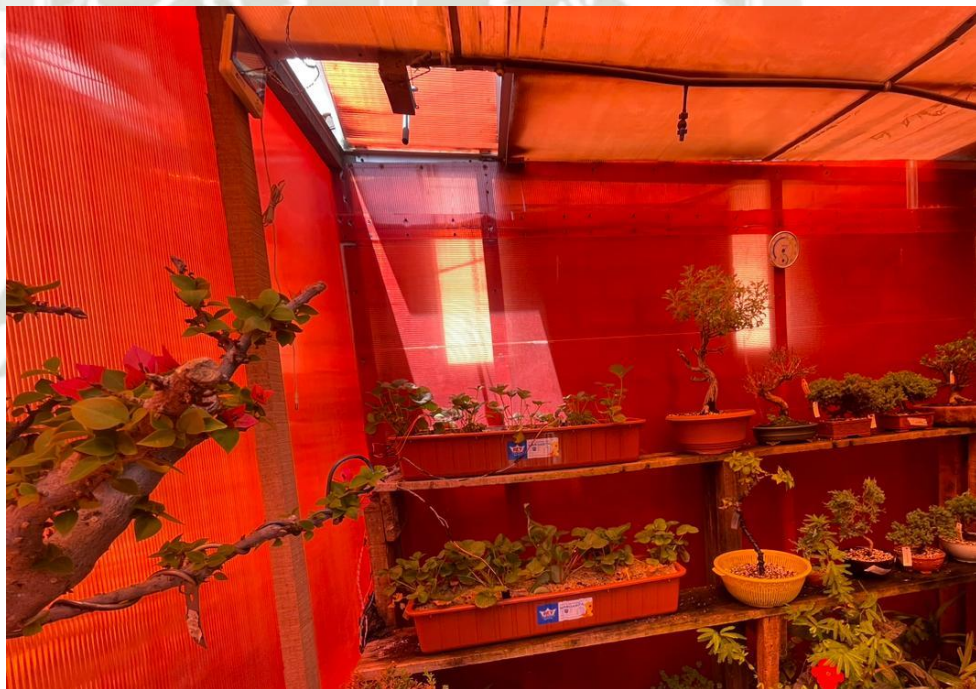
Nota: Elaboración propia.

Las primeras flores y frutos después del trasplante siempre se descartan ya que como la planta está recién trasplantada esta producirá frutos defectuosos.

Es por ello que es recomendado retirar todos los frutos y flores antes del segundo mes de trasplante porque estos no serán comerciales y además consumirán energía que la planta necesita disponer para su desarrollo en esta etapa.

El sistema de control opero continuamente con forme a lo previsto, permitiendo así que el cultivo se desarrolle normalmente. Las únicas intervenciones que se realizaron fueron inspecciones y monitoreo del estado del cultivo, el sistema opero autónomamente sin ninguna complicación.

Figura 84 *Vista Interior del invernadero después de la automatización.*



Nota: Se puede apreciar el cultivo, los sensores y las mangueras del sistema de riego. Elaboración propia.

Figura 85 Vista Exterior del invernadero después de la automatización.



Nota: Se puede apreciar la estructura del invernadero, el extractor y el tablero de control. Elaboración propia.

4.4. Análisis de las condiciones operativas del invernadero antes y después de la automatización

Antes de realizar la automatización cuando se realizaban las actividades manualmente, como abrir la ventana, regar las plantas, monitorear e inspeccionar; se tardaba 15 al día ya que se tiene que realizar una inspección en la mañana y una en la tarde mínimo.

Además, cuando hace mucho calor, es necesario realizar estas operaciones más de una vez ya que no se tiene ningún medio de control y aun así el cultivo demanda de un monitoreo constante ya que al no tener control este es muy vulnerable a que se presenten problemas.

Luego de realizar la implementación del sistema de control, el tiempo se redujo a menos de 5 minutos al día ya que la única intervención que se tuvo que realizar es una inspección y monitoreo en la mañana y revisar que la ventana este cerrada en las tardes. El resto del trabajo que en un primer momento se hacía manualmente, se realizaba de forma automática gracias al sistema de control.

4.5. Análisis del costo de implementación y comparación con un sistema industrial

A continuación, se presentará una tabla en la que se detalla el costo total del sistema de control implementado:

Tabla 27 Costo de los Componentes del Controlador.

COMPONENTES DEL CONTROLADOR Y SU ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA					
ITEM	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	Precio C/U	CANTIDA D	Precio TOTAL
1	Arduino Mega 2560	-	S/ 110.00	1	S/ 110.00
2	Módulo de Reloj en tiempo real RTC	RTC DS3231	S/ 12.00	1	S/ 12.00
3	Optoacoplador	PC817	S/ 1.00	32	S/ 32.00
4	Pin tipo HEADER hembra (espadín)	CON SIL	S/ 0.08	66	S/ 5.28
5	Pin tipo HEADER macho (espadín)	CON SIL	S/ 0.01	152	S/ 1.52
6	Relay 5VDC a 220VAC - 10A	SRD-05DVC- SL-C	S/ 2.50	16	S/ 40.00
7	Fuente 12V 10A	-	S/ 45.00	1	S/ 45.00
8	Transistor	2N 2222A	S/ 0.50	16	S/ 8.00
9	Convertor DC-DC 5A	XL4015	S/ 10.00	2	S/ 20.00
10	Resistencia de 1K	-	S/ 0.10	65	S/ 6.50
11	Resistencia de 10K	-	S/ 0.10	16	S/ 1.60
12	Placa de fibra de vidrio - Cobre dos caras	-	S/ 10.00	3	S/ 30.00
13	Cloruro férrico (para fabricar las PCB)	-	S/ 20.00	1	S/ 20.00
14	Tiner (para fabricar las PCB)	-	S/ 8.00	1	S/ 8.00
15	Carcasa PVC	-	S/ 20.00	1	S/ 20.00
16	Adaptador Riel DIN	-	S/ 2.50	3	S/ 7.50
17	Grasa para soldar	-	S/ 7.00	1	S/ 7.00
18	Estaño	-	S/ 18.00	1	S/ 18.00
19	Conector tipo JACK macho para Arduino	-	S/ 1.00	1	S/ 1.00
21	Bornera para PCB de 2 bornes	-	S/ 0.80	39	S/ 31.20
22	LED de 3V	-	S/ 0.20	17	S/ 3.40
TOTAL					S/ 428.00

Tabla 28 Costo de los Elementos del Sistema de Control.

COMPONENTES ELÉCTRICOS Y SENSORES							
ITEM	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	Precio C/U	CANTIDAD	Precio TOTAL		
23	Cable AWG 12	-	S/ 50.00	1	S/	50.00	
24	Cable AWG 22	-	S/ 70.00	1	S/	70.00	
25	Manga termocontraible	-	S/ 5.00	1	S/	5.00	
26	Extractor 36W	-	S/ 50.00	1	S/	50.00	
27	Llave termomagnética monofásica x10A	-	S/ 35.00	1	S/	35.00	
28	Bomba 1 HP	-	S/ 160.00	1	S/	160.00	
29	Electroválvula 220V AC 1/2"	-	S/ 22.00	2	S/	44.00	
30	Base para relé 8pines	-	S/ 7.00	2	S/	14.00	
31	Relé AC -AC monofásico 8 pines 10A	-	S/ 15.00	2	S/	30.00	
32	Riel DIN x1m	-	S/ 8.00	1	S/	8.00	
33	Tablero eléctrico metálico 30x40	-	S/ 65.00	1	S/	65.00	
34	Clavija para toma monofásica	-	S/ 2.00	1	S/	2.00	
35	Perneria	-	S/ 5.00	1	S/	5.00	
36	Terminal tipo pin AWG 22 x paquete 100und	-	S/ 5.50	1	S/	5.50	
37	Terminal tipo pin AWG 12 x paquete 100und	-	S/ 7.50	1	S/	7.50	
38	Sensor de humedad y temperatura ambiental	DHT22	S/ 30.00	2	S/	60.00	
39	Sensor capacitivo de humedad de suelo V2.2	-	S/ 10.00	3	S/	30.00	
40	Sensor de nivel de agua tipo flotador	-	S/ 12.00	1	S/	12.00	
41	Canaleta organizadora de cables	-	S/ 10.00	2	S/	20.00	
42	Bornera tipo regleta x 6A (12 und)	-	S/ 2.50	2	S/	5.00	
43	Pantalla LCD 16x2	-	S/ 12.00	1	S/	12.00	
44	Modulo I2C para pantalla LCD 16x2	-	S/ 7.00	1	S/	7.00	
45	Pulsador con rosca	-	S/ 2.50	3	S/	7.50	
46	Precintos x 100und	-	S/ 5.00	1	S/	5.00	
47	Cinta aislante	-	S/ 6.00	1	S/	6.00	
48	Terminal tipo horquilla (uña)	-	S/ 0.40	8	S/	3.20	
TOTAL					S/	718.70	

Tabla 29 Costo de los Elementos del Circuito de Agua y Riego.

COMPONENTES DEL CIRCUITO DE RIEGO						
ITEM	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	Precio C/U	CANTIDAD	Precio TOTAL	
49	Tanque de agua x200L	-	S/ 80.00	1	S/	80.00
50	Adaptador Tanque 1"	-	S/ 14.00	1	S/	14.00
51	Machón 1"x1 SENKRON	-	S/ 1.95	4	S/	7.80
52	Válvula de bola hembra 1"x1 SENKRON	-	S/ 11.00	1	S/	11.00
53	Niple polipropileno roscado 1"x15cm	-	S/ 5.20	1	S/	5.20
54	Universal de polipropileno roscado de 1"	-	S/ 7.90	1	S/	7.90
55	TEE H/H de 1" de polipropileno roscado	-	S/ 6.90	1	S/	6.90
56	Tapón macho de 1" de polipropileno roscado	-	S/ 1.90	1	S/	1.90
57	Bushing de polipropileno roscado de 1" a 1/2"	-	S/ 3.00	1	S/	3.00
58	Enlace rosca macho de 20x1/2" PN16 SENKRON	-	S/ 4.00	3	S/	12.00
59	Derivación TEE PE R/HEMBRA 20 mm 1/2" 20 mm NTP SAB	-	S/ 4.20	2	S/	8.40
60	Tapón final 20PN 16 SENKRON	-	S/ 3.20	1	S/	3.20
61	Unión H/H 1/2" de polipropileno roscado	-	S/ 0.90	2	S/	1.80
62	Terminal de línea de tubo de 20mm	-	S/ 0.70	2	S/	1.40
63	Gotero CLICKTIF CL de 4LPH antidrenante y autocompensado	-	S/ 0.56	4	S/	2.24
64	Nebulizador SUPER FOGGER de 4 salidas y 20.8 LPH	-	S/ 19.54	1	S/	19.54
65	Codo PE 90° 20mm portagomas	-	S/ 0.90	4	S/	3.60
66	Multisalida ampliable tipo T	-	S/ 0.58	4	S/	2.32
67	Estaca riego por goteo	-	S/ 0.40	8	S/	3.20
68	Manguera PEBD de 20mm (por metro)	-	S/ 1.20	10	S/	12.00
TOTAL						S/ 207.40

El costo de fabricación del controlador fue de S/ 418, que es un precio más accesible que su contra parte industria el PLC S7 1200 de Siemens que tiene un costo de S/ 1700.

La implementación de todo el sistema de control incluyendo toda la red de sensores, actuadores y el circuito de riego fue de S/ 1354.10. Si lo comparamos con el costo de implementación de un sistema de control industrial se puede apreciar que hay un ahorro considerable ya que un sistema industrial básico que cumpla con los mismos requisitos tendría un costo de S/. 4019.

CONCLUSIONES

- Se determinó que los parámetros de control necesarios para el cultivo son la temperatura ambiental, humedad ambiental y humedad de suelo. Para el cultivo testigo de fresa se fijaron los rangos de parámetros como: temperatura ambiental 23 – 28 °C, humedad ambiental 55 – 75% y humedad del suelo no debe bajar del 60%. Estos rangos pueden ser modificados con el menú interactivo del sistema para adaptarlos a otros tipos de cultivo. Se determinó, además, que para una muestra de 10 plantas, antes de la automatización, se tiene que dedicar al menos 15 minutos al día y en días más calurosos este tiempo aumenta porque se tienen monitorear el cultivo varias veces al día para ventilar y bajar la temperatura manualmente.
- Se realizó el diseño e implementación de un módulo compuesto por 2 placas PCB que se acoplan al Arduino; las placas cuentan con mecanismos de protección que hizo más robusta a la placa, imitando el comportamiento en las entradas y salidas digitales discretas de un PLC. Esto permitió que la placa Arduino pueda utilizarse en un cultivo en invernadero bajo condiciones reales, con ello fue posible desarrollar un sistema de control funcional utilizando componentes económicos que pudo automatizar el cultivo del invernadero; esto permite tener una alternativa de solución a la falta de automatización en invernaderos por el alto costo de los sistemas de control industriales.
- Se realizó la selección de los sensores del sistema siguiendo las necesidades del proyecto; para el control de temperatura y humedad ambiental se eligió el sensor DHT22, esto es debido a que: es compatible con Arduino, integra en un mismo dispositivo a un termómetro y un higrómetro; es un sensor económico; respecto a las especificaciones técnicas, es el que tiene mejores prestaciones; es un sensor digital que no requiere calibración ni acondicionamiento de señal; es más versátil y su manejo es más simple. Para el control de humedad de suelo se seleccionó el sensor capacitivo, esto debido a que: es compatible con Arduino, es un sensor económico; respecto a las especificaciones técnicas, es el que tiene mejores prestaciones y es más robusto que el sensor resistivo ya que no es vulnerable a la humedad, oxidación, corrosión y salinidad del suelo.

- Se programo al controlador diseñado para ejecutar la estrategia de control ON/OFF de dos posiciones y zona muerta. Fue la estrategia que mejor se adaptó al sistema ya es muy simple y económica de implementar, ejerce muy poco esfuerzo al controlador y trabaja bien para procesos lentos que no requieren una alta exactitud y precisión. La programación utilizando esta estrategia de control fue suficiente para ejecutar el control del cultivo bajo invernadero de forma simple ya que únicamente se tiene que setear los set point de los parámetros de control en el menú interactivo.
- Se realizo el monitoreo, con termómetros e higrómetro, del funcionamiento del sistema de control implementado por 4 semanas en las que se evaluó la respuesta del cultivo a la automatización, durante las cuales el sistema mantuvo los parámetros óptimos de cultivo: la temperatura ambiental 23 – 28 °C, humedad ambiental 55 – 75% y humedad del suelo no debe bajar del 60%. Además, el monitoreo diario únicamente consumía un tiempo menor a 5 minutos y solo era necesario realizar una inspección al día. Las plantas de fresa respondieron positivamente a la automatización, desarrollándose y a partir de la segunda semana empezaron a producir los primeros frutos.
- Se pudo comprobar que con el diseño e implementación de un sistema de control basado en Arduino es posible realizar la automatización de invernaderos orientados a la agricultura familiar, reduciendo el tiempo y esfuerzo que se debe dedicar al cultivo además que supone una posible alternativa económica ya que el costo total de la implementación total fue de S/ 1354.10; un sistema de control con componentes industriales que cumpla con las mismas tareas tendría un costo estimado de S/. 4019.

RECOMENDACIONES

- Implementar este sistema de control en un invernadero con una densidad de plantas mayor y analizar el progreso del cultivo para evaluar el comportamiento y rendimiento del controlador y el sistema implementado.
- Tercerizar la fabricación de las placas PCB del controlador a una empresa especializada, además de implementar una carcasa protectora para el controlador y su modulo conversor DC - DC.
- Implementar el código de control en lenguaje LADDER para aproximar el sistema de control aún más a la estandarización, además que se facilitará la interpretación, mantenimiento y modificación del código.
- Implementar una pantalla HMI como medio de interfaz gráfica ya que es un dispositivo con mejores prestaciones que el display LCD.
- Implementar el sistema en otros cultivos y en otros métodos de cultivo agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2022). The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0. *Smart Agricultural Technology*, Volume 2.
- AOSONG. (1 de febrero de 2020). *Temperature and humidity module AM2302 Product Manual*. Obtenido de <https://www.aosong.com>
- ARDUINO. (12 de enero de 2024). *What is Arduino*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/>
- Bolton, W. (2006). *Programmable Logic Controllers* (Cuarta ed.). Elsevier Newnes.
- Enciso, J. M., Porter, D., & Périès, X. (Agosto de 2007). *Uso de Sensores de Humedad del Suelo Para Eficientizar el Riego*. Texas, Estados Unidos de Norte America: Cooperativa de Texas EXTENSIÓN, Sistema Universitario Texas A&M.
- Espressif Systems. (4 de enero de 2024). *Your Complete AIoT Solution Provider*. Obtenido de <https://www.espressif.com>
- GRAINGER. (13 de enero de 2024). *Temperature Probe: RTD, 3-Wire Pt100, 3/16 in x 3 in Probe, Bare Wire, 3 ft Cable*. Obtenido de <https://www.grainger.com/>
- Higginson, A., & Brooks, K. (2022). A bioreactor system remote laboratory for teaching process control. *IFAC-Papers OnLine*, Volume 55, Issue 17.
- HUMIDREL. (2022). *HS1101 Relative Humidity Sensor DATASHEET*. Obtenido de <http://www.humirel.com>
- Irritec. (2019). *Catálogo de automatización y fertirrigación*. España.
- IRROMETER. (12 de abril de 2020). *Sensor de humedad del suelo Watermark – Modelo 200SS*. Obtenido de <https://www.irrometer.com/>

- Kvalsund, A. S., & Winkler, D. (2023). Development of an Arduino-based, open-control interface for hardware in the loop applications. *HardwareX*, Volume 16.
- Lenskak, M. P., & Iglesias, N. (2019). *INVERNADEROS*, Tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino. Argentina: INTA ediciones. Colección Investigación, Desarrollo e Innovación.
- Lowenfels, J. (2013). *Teaming With Nutrients*. TIMBER PRESS.
- Mandado Pérez, E., Marcos Acevedo, J., Fernández Silva, C., & Armesto Quiroga, J. I. (2009). *Autómatas Programables y Sistemas de Automatización*. Barcelona, España: Marcombo.
- Maroto Borrego, J. (2008). *Elementos de Horticultura General*. Madrid-España: Mundi Prensa, 3ra Edición.
- Martin, E. C. (2017). *Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo?* Tucson, Arizona, Estados Unidos de Norte America: Arizona Cooperative Extension. University of Arizona.
- Maxim Integrated. (Julio de 2019). *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. Obtenido de <https://www.maximintegrated.com>
- METER Group. (2 de febrero de 2024). *METER ECH2O MAS-1 4-20 Milliamps Soil Moisture Sensor*. Obtenido de <https://www.metergroup.com/>
- MIDAGRI; INEI. (2022). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2022 Principales resultados Pequeñas y Medianas Unidades Agropecuarias*. Lima, Perú.
- MINAGRI. (2015). *Estrategia Nacional de Agricultura Familiar 2015 - 2021*. Perú.
- Naylamp Mechatronics SAC. (2023). *Sensores-temperatura-y-humedad*. Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/47-sensor-de-humedad-de-suelo-fc-28.html,%20Sensor%20de%20Humedad%20de%20Suelo%20FC-28>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, Quinta Edición.

- Palomino Masco, J. F. (2022). Development and Validation of a Less Expensive and Portable PLC Module for Students Training in Industrial Automation. *Electronics*, Volume 26 NO 2.
- Perdigones, A., Peralta, I., Nalasco, J., Muñoz, M. A., & Pascual, V. (Septiembre de 2004). Sensores Para el Control Climatico en Invernadero. *Revista Hortiuctura*.
- Perez Cari, M., & Tellez Garrido, I. (20 de Febrero de 2020). Producción y Comercialización con Sistema Hidropónico NFT de Lechuga y Tomate Cherry, en la Ciudad de Arequipa. Lima, Peru: Universidad ESAN.
- Poblete Manzano, Ó. (2023). Diseño e implementación de un sistema tecnológico para invernaderos en la comunidad José Painecura Hueñalihuen. Santiago de Chile, Chile: Repositorio de la Universidad de Chile.
- Raspberry Foundation. (23 de febrero de 2024). *With 2–3× the speed of the previous generation, and featuring silicon designed in-house for the best possible performance, we've redefined the Raspberry Pi experience*. Obtenido de <https://www.raspberrypi.com>
- Ridder. (2021). HortiMax-GO! Guia de Instalación.
- Rivera Vargas , J. L., Paucar Alcantara, L. M., & Chafloque Moreno, A. J. (2019). Controlador lógico programable de salida tipo relé, basado en Arduino para transmisión de datos entre etapas de procesos industriales. Callao, Perú: Repositorio Universidad Nacional del Callao.
- Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J., & Ramírez Arias, A. (2015). Modeling an Control of Greenhouse Crop Growth. Springer.
- Rojas Marroquin, N. (20 de Setiembre de 2021). *Invernaderos peruanos producen 5 veces más y son la alternativa para pequeños productores*. Obtenido de Agro Negocios Perú: <https://agronegociosperu.org/2021/09/20/invernaderos-peruanos-producen-5-veces-mas-y-son-la-alternativa-para-pequenos-productores/>

Salazar Aguilar, N. E. (Febrero de 2020). Diseño de un Sistema Inteligente para el Control Automatizado de Invernaderos. Cuernavaca, Morelos, México: Repositorio de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS.

Sánchez-Guerrero, M. C., Lorenzo, P., Fernández, P., & Medrano, E. (Abril de 2022). Uso de Sensores de Clima un Cultivos Bajo Invernadero . Almeria, España: JUNTA DE ANDALUCÍA. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible.

Schneider Electric. (4 de enero de 2024). *Telemecanique - Telesquemario Manual Electrotécnico*. Obtenido de <https://www.um.es/docencia/mmc/pdf/telesquemario.pdf>

SIEMENS. (2014). SIMATIC S7 1200. *Manual*. Alemania.

SIEMENS. (04 de Octubre de 2018). *Control de invernaderos con SIMATIC S7-1200*. Obtenido de <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109757060/control-de-invernaderos-con-simatic-s7-1200?dti=0&lc=es-SV>

SRC Especialistas en Regulación y Control de Temperatura. (25 de enero de 2024). *WALL TYPE T&H Transmitter MTH100 DATASHEET*. Obtenido de <https://srsl.com/>

Suiler Altamirano. (2019). *Arranque directo de motor controlado por PLC*. Obtenido de <https://blog.suileraltamirano.com/contenido-03-arranque-directo-de-motor-controlado-por-plc/>

TC Medida y Control de Temperatura, S.A. (diciembre de 2023). *Termopar Tipo T – Datos Técnicos*. Obtenido de <https://www.tc-sa.es/>

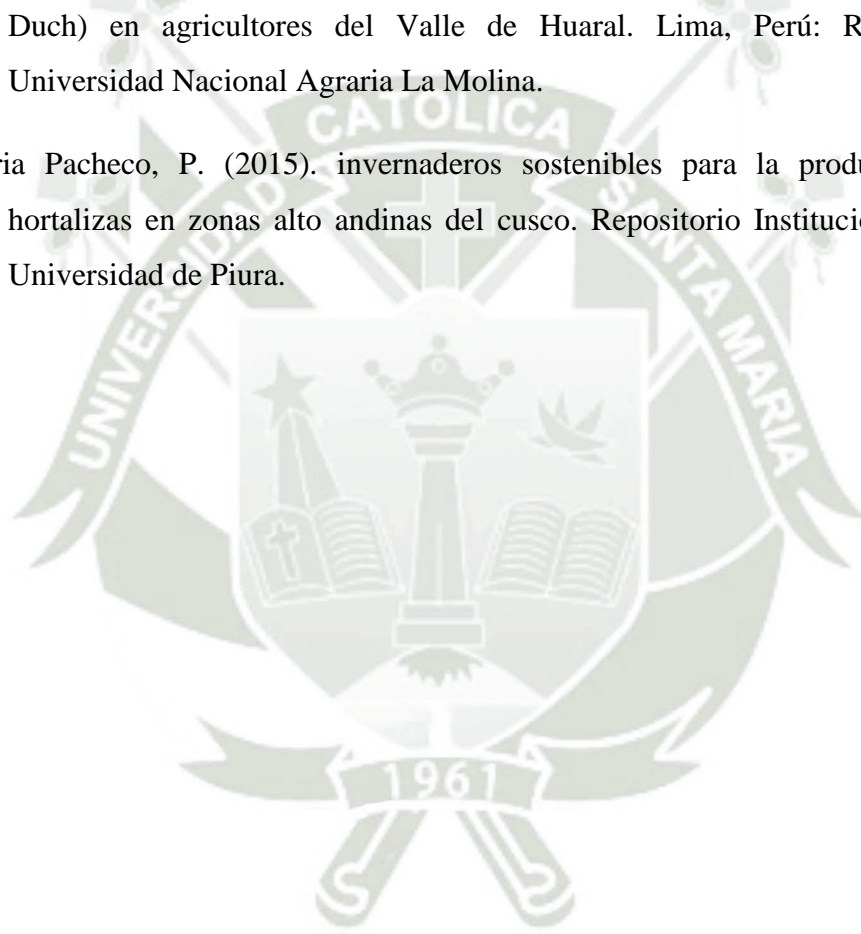
Texas Instruments. (Agosto de 1999). LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors, datasheet. Revisado en 2017.

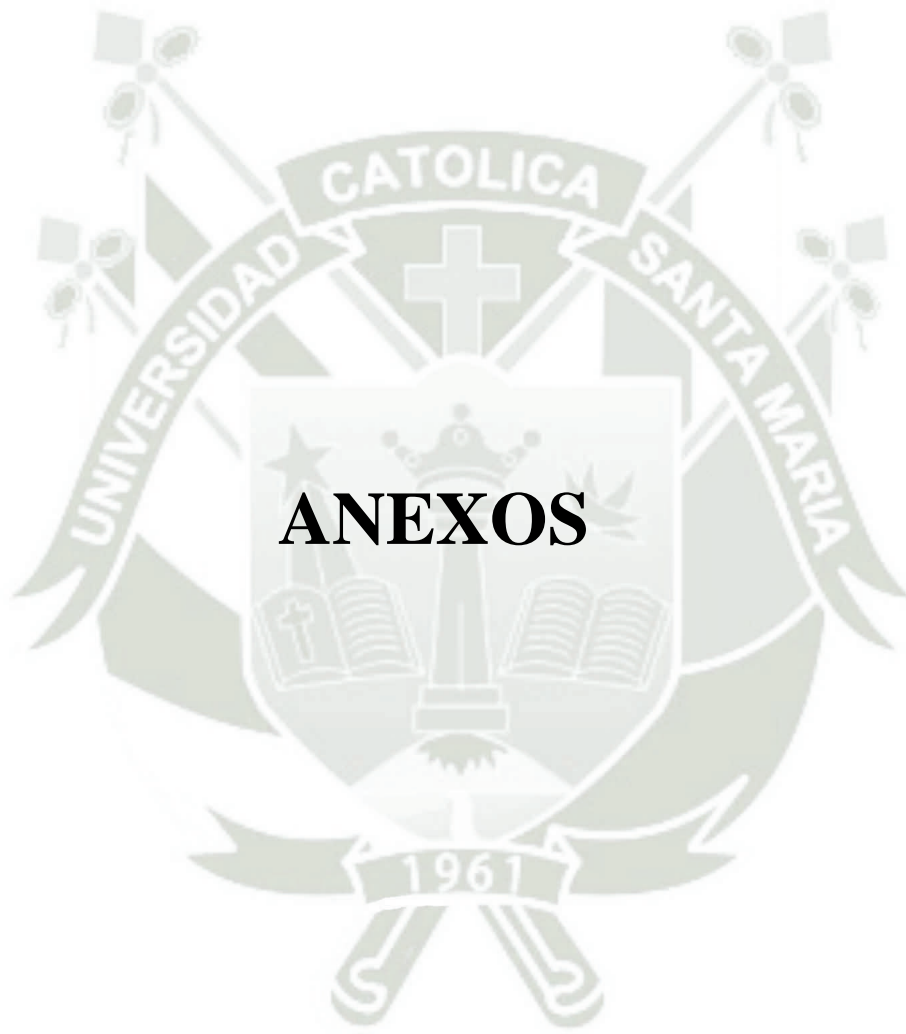
Thies Clima. (12 de noviembre de 2023). *Medición de la humedad del aire Transmisor higrotérmico compact 1.1005.54.241 DATASHEET*. Obtenido de <https://www.thiesclima.com/>

Valera, D., Molina, F., & Álvarez, A. (Abril de 2008). *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos*. Madrid, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

Vergara Cástro, R. A. (2024). *Tecnificación de riego para fresa (Fragaria × ananassa Duch) en agricultores del Valle de Huaral*. Lima, Perú: Repositorio Universidad Nacional Agraria La Molina.

Zanabria Pacheco, P. (2015). *invernaderos sostenibles para la producción de hortalizas en zonas alto andinas del cusco*. Repositorio Institucional de la Universidad de Piura.





ANEXOS

Anexo 1 Regulador DC - DC XL4015

XLSEMI

Datasheet

5A 180KHz 36V Buck DC to DC Converter

XL4015

Features

- Wide 8V to 36V Input Voltage Range
- Output Adjustable from 1.25V to 32V
- Maximum Duty Cycle 100%
- Minimum Drop Out 0.3V
- Fixed 180KHz Switching Frequency
- 5A Constant Output Current Capability
- Internal Optimize Power MOSFET
- High efficiency up to 96%
- Excellent line and load regulation
- Built in thermal shutdown function
- Built in current limit function
- Built in output short protection function
- Available in TO263-5L package

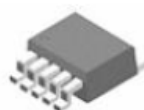
Applications

- LCD Monitor and LCD TV
- Portable instrument power supply
- Telecom / Networking Equipment

General Description

The XL4015 is a 180 KHz fixed frequency PWM buck (step-down) DC/DC converter, capable of driving a 5A load with high efficiency, low ripple and excellent line and load regulation. Requiring a minimum number of external components, the regulator is simple to use and include internal frequency compensation and a fixed-frequency oscillator.

The PWM control circuit is able to adjust the duty ratio linearly from 0 to 100%. An over current protection function is built inside. When short protection function happens, the operation frequency will be reduced from 180KHz to 48KHz. An internal compensation block is built in to minimize external component count.



TO263-5L

Figure1. Package Type of XL4015

Function Block

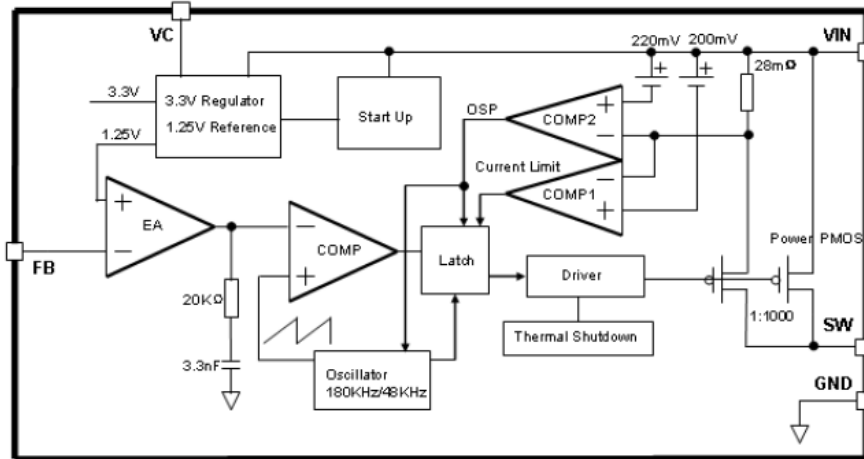
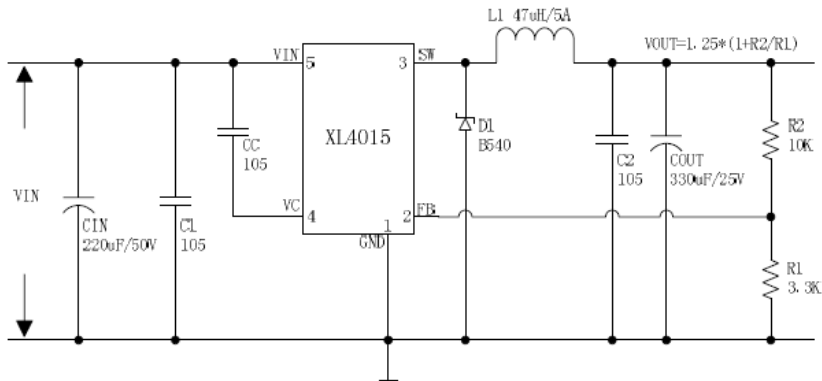
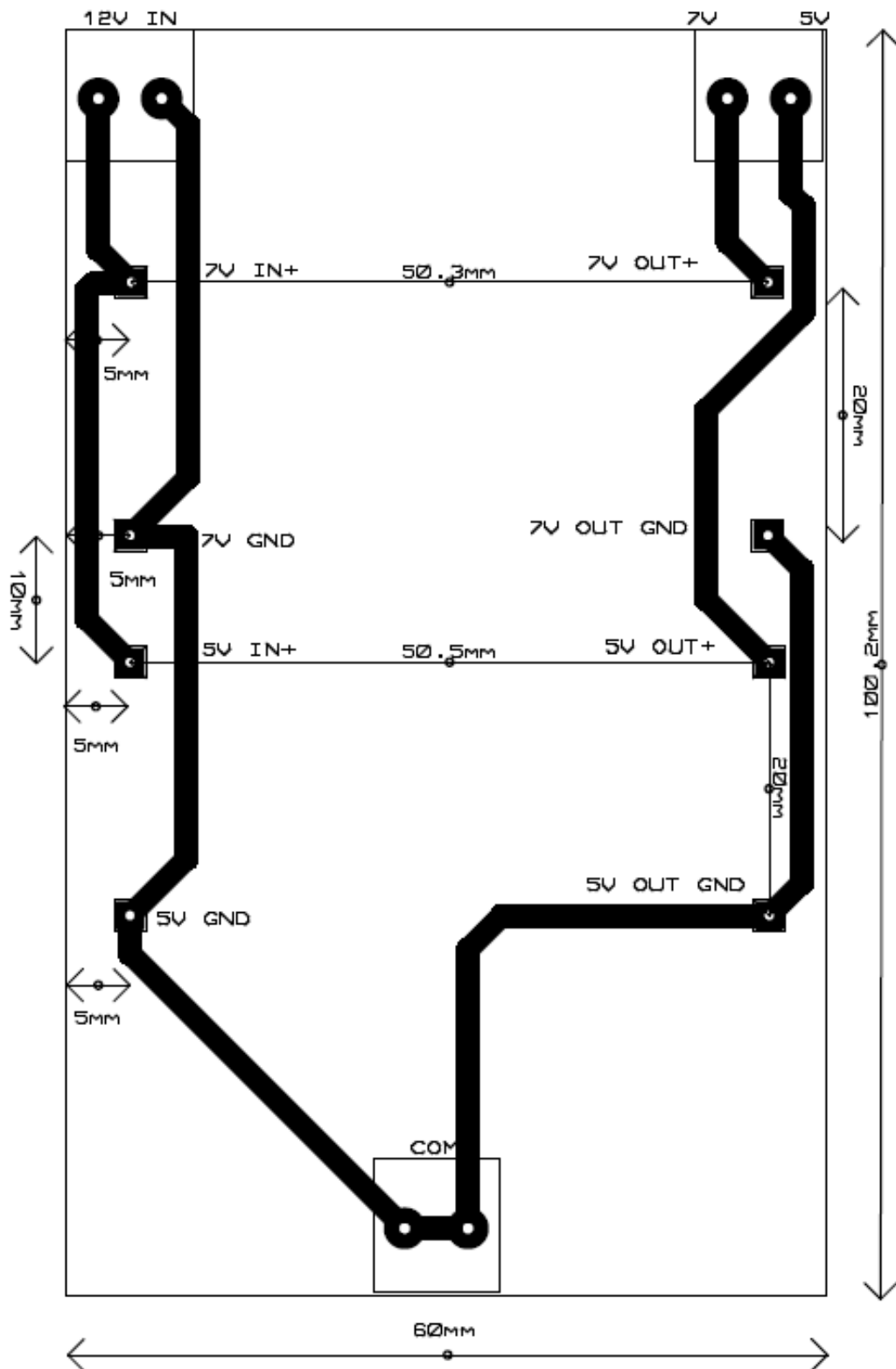


Figure3. Function Block Diagram of XL4015

Typical Application Circuit



Anexo 2 Plano PCB de la Alimentación del Circuito de Mando



PC817 Series

High Density Mounting Type Photocoupler

- Lead forming type (I type) and taping reel type (P type) are also available. (PC817I/PC817P)
- TÜV (VDE0884) approved type is also available as an option.

■ Features

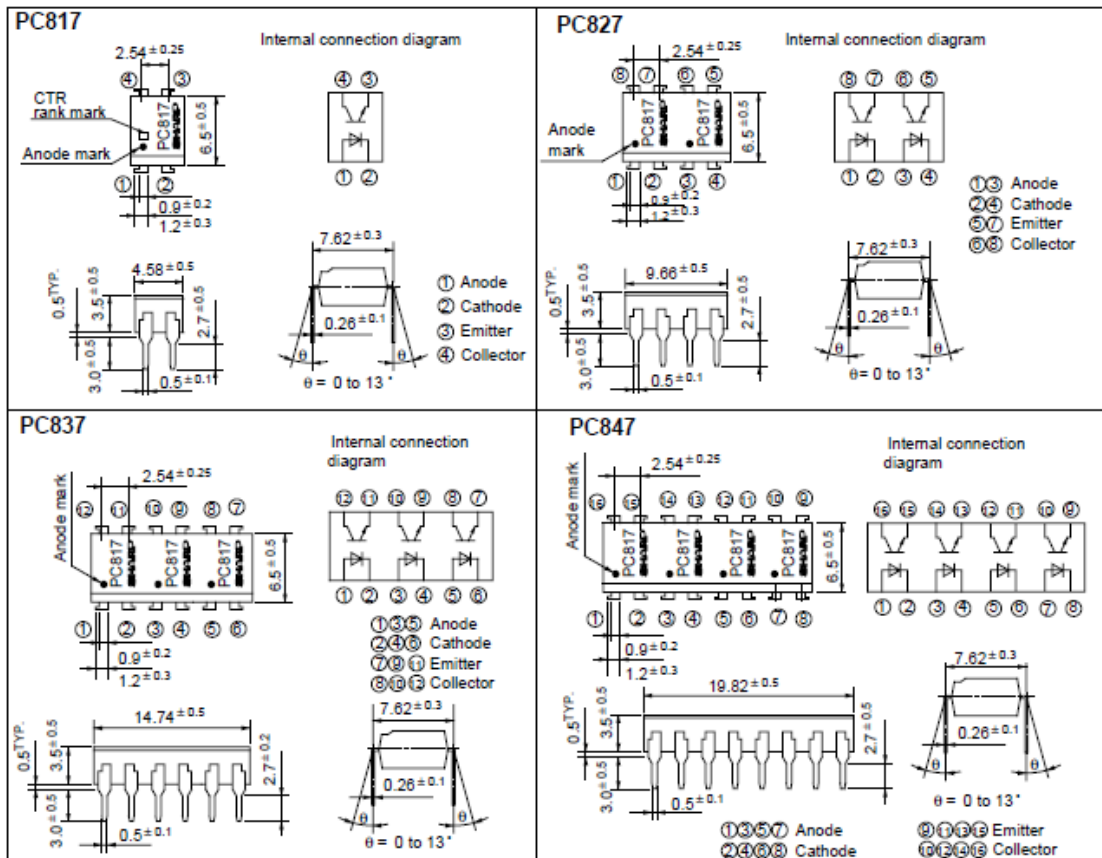
1. Current transfer ratio
(CTR: MIN. 50% at $I_F = 5\text{mA}$, $V_{CE} = 5\text{V}$)
2. High isolation voltage between input and output ($V_{iso} : 5\,000\text{V}_{rms}$)
3. Compact dual-in-line package
 PC817 : 1-channel type
 PC827 : 2-channel type
 PC837 : 3-channel type
 PC847 : 4-channel type
4. Recognized by UL, file No. E64380

■ Applications

1. Computer terminals
2. System appliances, measuring instruments
3. Registers, copiers, automatic vending machines
4. Electric home appliances, such as fan heaters, etc.
5. Signal transmission between circuits of different potentials and impedances

■ Outline Dimensions

(Unit : mm)



* In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that occur in equipment using any of SHARP's devices, shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest version of the device specification sheets before using any SHARP's device.*

Absolute Maximum Ratings

(Ta = 25°C)

Parameter		Symbol	Rating	Unit
Input	Forward current	I_F	50	mA
	*1 Peak forward current	I_{FM}	1	A
	Reverse voltage	V_R	6	V
	Power dissipation	P	70	mW
Output	Collector-emitter voltage	V_{CEO}	35	V
	Emitter-collector voltage	V_{ECO}	6	V
	Collector current	I_C	50	mA
	Collector power dissipation	P_C	150	mW
	Total power dissipation	P_{tot}	200	mW
*2 Isolation voltage		V_{iso}	5 000	V_{rms}
Operating temperature		T_{opr}	- 30 to + 100	°C
Storage temperature		T_{stg}	- 55 to + 125	°C
*3 Soldering temperature		T_{sol}	260	°C

*1 Pulse width $\leq 100\mu s$, Duty ratio : 0.001

*2 40 to 60% RH, AC for 1 minute

*3 For 10 seconds

Electro-optical Characteristics

(Ta = 25°C)

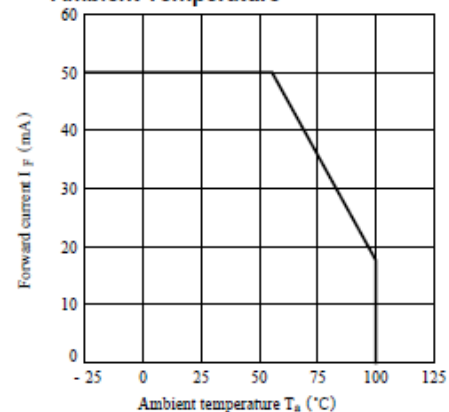
Parameter		Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Input	Forward voltage	V_F	$I_F = 20mA$	-	1.2	1.4	V
	Peak forward voltage	V_{FM}	$I_{FM} = 0.5A$	-	-	3.0	V
	Reverse current	I_R	$V_R = 4V$	-	-	10	μA
	Terminal capacitance	C_t	$V = 0, f = 1kHz$	-	30	250	pF
Output	Collector dark current	I_{CEO}	$V_{CE} = 20V$	-	-	10^{-7}	A
Transfer characteristics	*4 Current transfer ratio	CTR	$I_F = 5mA, V_{CE} = 5V$	50	-	600	%
	Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_F = 20mA, I_C = 1mA$	-	0.1	0.2	V
	Isolation resistance	R_{ISO}	DC500V, 40 to 60% RH	5×10^{10}	10^{11}	-	Ω
	Floating capacitance	C_f	$V = 0, f = 1MHz$	-	0.6	1.0	pF
	Cut-off frequency	f_c	$V_{CE} = 5V, I_C = 2mA, R_L = 100\Omega, -3dB$	-	80	-	kHz
Response time	Rise time	t_r	$V_{CE} = 2V, I_C = 2mA, R_L = 100\Omega$	-	4	18	μs
	Fall time	t_f		-	3	18	μs

*4 Classification table of current transfer ratio is shown below.

Model No.	Rank mark	CTR (%)
PC817A	A	80 to 160
PC817B	B	130 to 260
PC817C	C	200 to 400
PC817D	D	300 to 600
PC8*7AB	A or B	80 to 260
PC8*7BC	B or C	130 to 400
PC8*7CD	C or D	200 to 600
PC8*7AC	A, B or C	80 to 400
PC8*7BD	B, C or D	130 to 600
PC8*7AD	A, B, C or D	80 to 600
PC8*7	A, B, C, D or No mark	50 to 600

* : 1 or 2 or 3 or 4

Fig. 1 Forward Current vs. Ambient Temperature



SONGLE RELAY

	RELAY ISO9002	SRD
---	---------------	------------



1. MAIN FEATURES

- Switching capacity available by 10A in spite of small size design for highdensity P.C. board mounting technique.
- UL,CUL,TUV recognized.
- Selection of plastic material for high temperature and better chemical solution performance.
- Sealed types available.
- Simple relay magnetic circuit to meet low cost of mass production.

2. APPLICATIONS

- Domestic appliance, office machine, audio, equipment, automobile, etc.
(Remote control TV receiver, monitor display, audio equipment high rushing current use application.)

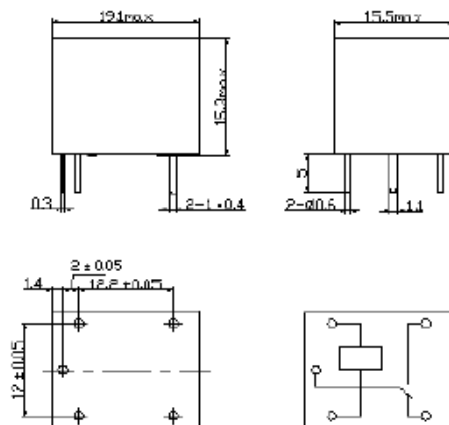
3. ORDERING INFORMATION

SRD	XX VDC	S	L	C
Model of relay	Nominal coil voltage	Structure	Coil sensitivity	Contact form
SRD	03、05、06、09、12、24、48VDC	S:Sealed type	L:0.36W	A:1 form A
		F:Flux free type	D:0.45W	B:1 form B C:1 form C

4. RATING

CCC	FILE NUMBER:CH0052885-2000	7A/240VDC
CCC	FILE NUMBER:CH0036746-99	10A/250VDC
UL/CUL	FILE NUMBER: E167996	10A/125VAC 28VDC
TUV	FILE NUMBER: R9933789	10A/240VAC 28VDC

5. DIMENSION (unit:mm) DRILLING (unit:mm) WIRING DIAGRAM



6. COIL DATA CHART (AT20°C)

Coil Sensitivity	Coil Voltage Code	Nominal Voltage (VDC)	Nominal Current (mA)	Coil Resistance (Ω) $\pm 10\%$	Power Consumption (W)	Pull-In Voltage (VDC)	Drop-Out Voltage (VDC)	Max-Allowable Voltage (VDC)
SRD (High Sensitivity)	03	03	120	25	abt. 0.36W	75%Max.	10% Min.	120%
	05	05	71.4	70				
	06	06	60	100				
	09	09	40	225				
	12	12	30	400				
	24	24	15	1600				
SRD (Standard)	48	48	7.5	6400	abt. 0.45W	75% Max.	10% Min.	110%
	03	03	150	20				
	05	05	89.3	55				
	06	06	75	80				
	09	09	50	180				
	12	12	37.5	320				
	24	24	18.7	1280	abt. 0.51W			
	48	48	10	4500				

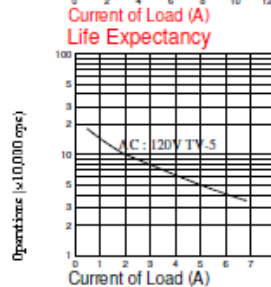
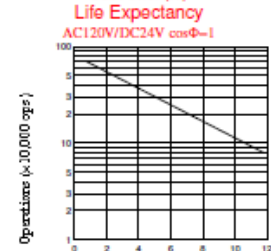
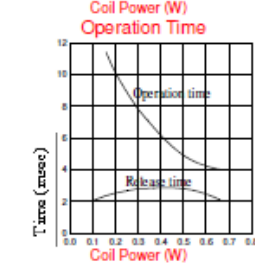
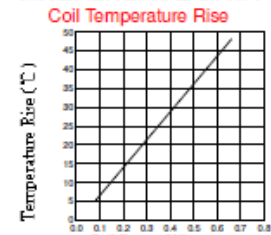
7. CONTACT RATING

Item	Type	SRD	
		FORM C	FORM A
Contact Capacity		7A 28VDC	10A 28VDC
Resistive Load ($\cos\phi=1$)		10A 125VAC 7A 240VAC	10A 240VAC
Inductive Load ($\cos\phi=0.4$ L/R=7msec)		3A 120VAC 3A 28VDC	5A 120VAC 5A 28VDC
Max. Allowable Voltage		250VAC/110VDC	250VAC/110VDC
Max. Allowable Power Force		800VAC/240W	1200VA/300W
Contact Material		AgCdO	AgCdO

8. PERFORMANCE (at initial value)

Item	Type	SRD
Contact Resistance		100m Ω Max.
Operation Time		10msec Max.
Release Time		5msec Max.
Dielectric Strength	Between coil & contact	1500VAC 50/60HZ (1 minute)
	Between contacts	1000VAC 50/60HZ (1 minute)
Insulation Resistance		100 M Ω Min. (500VDC)
Max. ON/OFF Switching		
Mechanically		300 operation/min
Electrically		30 operation/min
Ambient Temperature		-25°C to +70°C
Operating Humidity		45 to 85% RH
Vibration		
Endurance		10 to 55Hz Double Amplitude 1.5mm
Error Operation		10 to 55Hz Double Amplitude 1.5mm
Shock		
Endurance		100G Min.
Error Operation		10G Min.
Life Expectancy		
Mechanically		10 ⁷ operations. Min. (no load)
Electrically		10 ⁵ operations. Min. (at rated coil voltage)
Weight		abt. 10grs.

9. REFERENCE DATA



Anexo 5 Datasheet del Transistor 2N 2222A.

2N2222 / 2N2222A

NPN Silicon Epitaxial Planar Transistor

for switching and AF amplifier applications.

The transistor is subdivided into one group according to its DC current gain.

On special request, these transistors can be manufactured in different pin configurations.



1. Emitter 2. Base 3. Collector
TO-92 Plastic Package

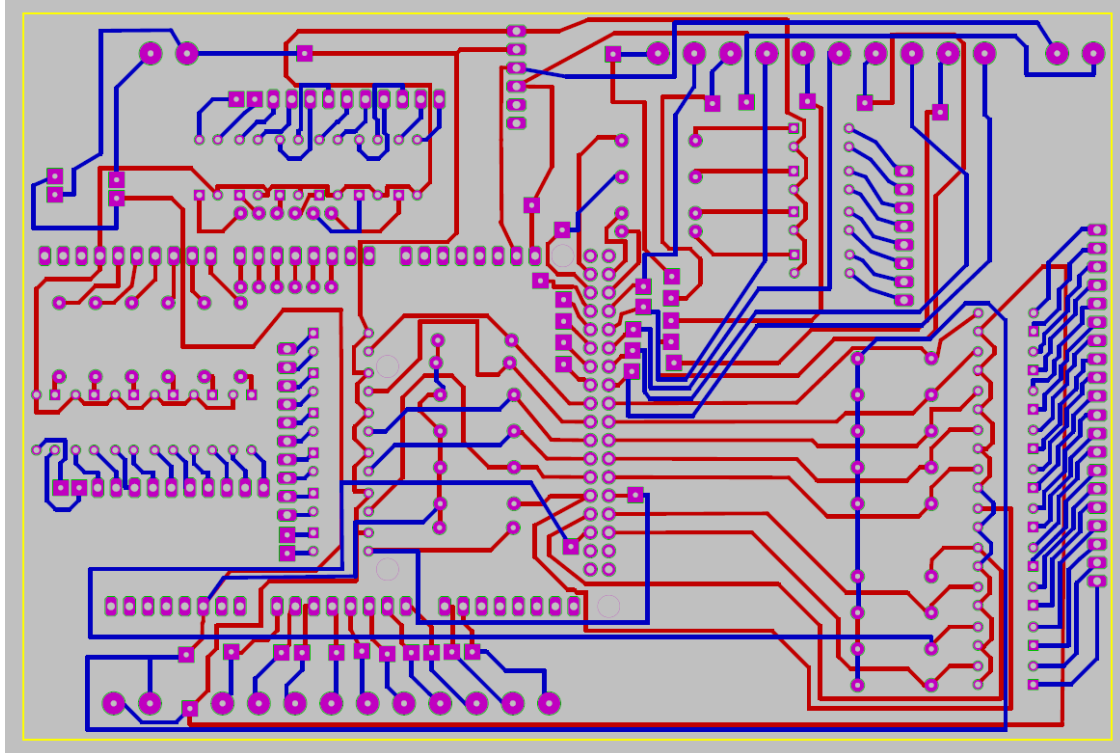
Absolute Maximum Ratings ($T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Collector Base Voltage	V_{CBO}	60 75	V
Collector Emitter Voltage	V_{CEO}	30 40	V
Emitter Base Voltage	V_{EBO}	5 6	V
Collector Current	I_C	600	mA
Power Dissipation	P_{tot}	625	mW
Junction Temperature	T_j	150	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	- 55 to + 150	$^\circ\text{C}$

Characteristics at $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$

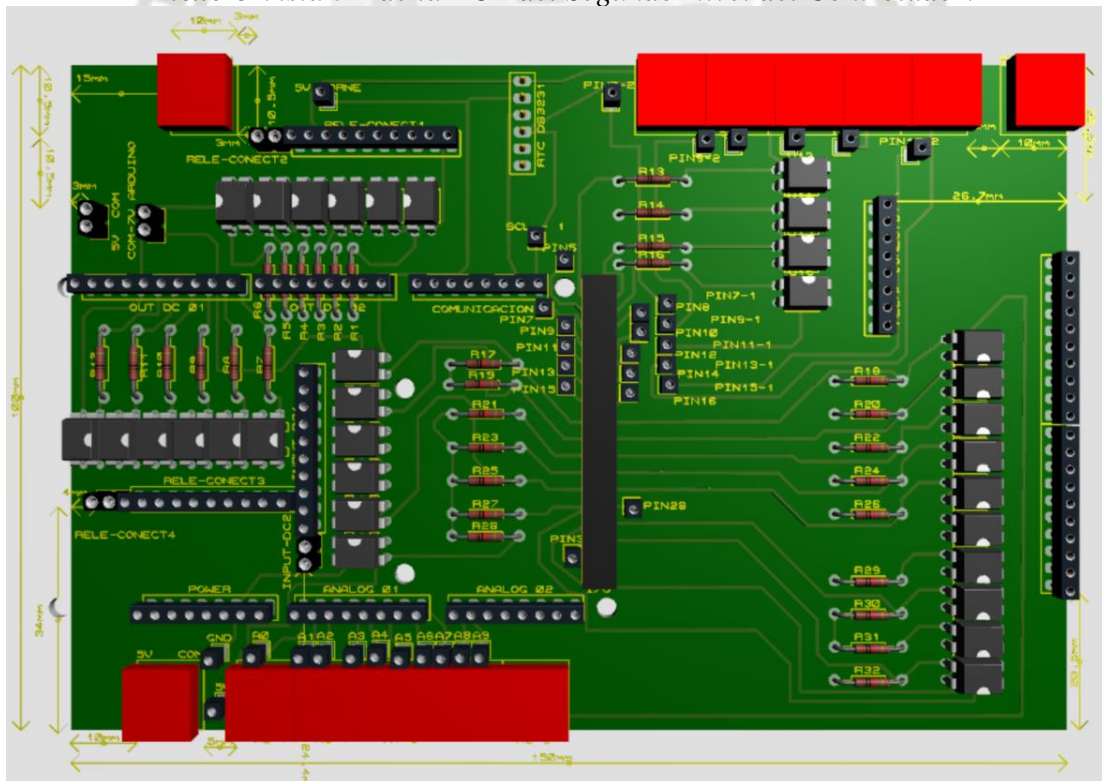
Parameter	Symbol	Min.	Max.	Unit
DC Current Gain	h_{FE}			
at $V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 0.1\text{ mA}$	h_{FE}	35	-	-
at $V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 1\text{ mA}$	h_{FE}	50	-	-
at $V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 10\text{ mA}$	h_{FE}	75	-	-
at $V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 150\text{ mA}$	h_{FE}	100	300	-
at $V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 500\text{ mA}$	h_{FE}	30	-	-
	h_{FE}	40	-	-
Collector Base Cutoff Current	I_{CBO}	-	10	nA
at $V_{CB} = 50\text{ V}$		-	10	
at $V_{CB} = 60\text{ V}$		-	10	
Collector Base Breakdown Voltage	$V_{(BR)CBO}$	60	-	V
at $I_C = 10\text{ }\mu\text{A}$		75	-	
Collector Emitter Breakdown Voltage	$V_{(BR)CEO}$	30	-	V
at $I_C = 10\text{ mA}$		40	-	
Emitter Base Breakdown Voltage	$V_{(BR)EBO}$	5	-	V
at $I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$		6	-	
Collector Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	-	0.4	V
at $I_C = 150\text{ mA}$, $I_B = 15\text{ mA}$		-	0.3	
at $I_C = 500\text{ mA}$, $I_B = 50\text{ mA}$		-	1.6	
		-	1	
Base Emitter Saturation Voltage	$V_{BE(sat)}$	-	1.3	V
at $I_C = 150\text{ mA}$, $I_B = 15\text{ mA}$		0.6	1.2	
at $I_C = 500\text{ mA}$, $I_B = 50\text{ mA}$		-	2.6	
		-	2	
Gain Bandwidth Product	f_T	250	-	MHz
at $I_C = 20\text{ mA}$, $V_{CE} = 20\text{ V}$, $f = 100\text{ MHz}$				
Collector Output Capacitance	C_{ob}	-	8	pF
at $V_{CB} = 10\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$				

Anexo 7 Plano de la PCB del Segundo Nivel del Controlador (Pistas de cobre y orificios)



Nota: Rojo para el cobre de la capa superior, azul para el cobre de la capa inferior.

Anexo 8 Vista 3D de la PCB del Segundo Nivel del Controlador.



DS3231

Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal

General Description

The DS3231 is a low-cost, extremely accurate I²C real-time clock (RTC) with an integrated temperature-compensated crystal oscillator (TCXO) and crystal. The device incorporates a battery input, and maintains accurate timekeeping when main power to the device is interrupted. The integration of the crystal resonator enhances the long-term accuracy of the device as well as reduces the piece-part count in a manufacturing line. The DS3231 is available in commercial and industrial temperature ranges, and is offered in a 16-pin, 300-mil SO package.

The RTC maintains seconds, minutes, hours, day, date, month, and year information. The date at the end of the month is automatically adjusted for months with fewer than 31 days, including corrections for leap year. The clock operates in either the 24-hour or 12-hour format with an AM/PM indicator. Two programmable time-of-day alarms and a programmable square-wave output are provided. Address and data are transferred serially through an I²C bidirectional bus.

A precision temperature-compensated voltage reference and comparator circuit monitors the status of V_{CC} to detect power failures, to provide a reset output, and to automatically switch to the backup supply when necessary. Additionally, the RST pin is monitored as a pushbutton input for generating a µP reset.

Benefits and Features

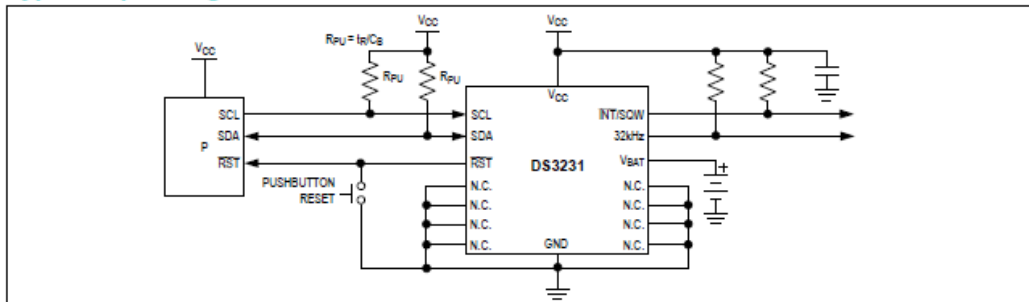
- Highly Accurate RTC Completely Manages All Timekeeping Functions
 - Real-Time Clock Counts Seconds, Minutes, Hours, Date of the Month, Month, Day of the Week, and Year, with Leap-Year Compensation Valid Up to 2100
 - Accuracy ±2ppm from 0°C to +40°C
 - Accuracy ±3.5ppm from -40°C to +85°C
 - Digital Temp Sensor Output: ±3°C Accuracy
 - Register for Aging Trim
 - RST Output/Pushbutton Reset Debounce Input
 - Two Time-of-Day Alarms
 - Programmable Square-Wave Output Signal
- Simple Serial Interface Connects to Most Microcontrollers
 - Fast (400kHz) I²C Interface
- Battery-Backup Input for Continuous Timekeeping
 - Low Power Operation Extends Battery-Backup Run Time
 - 3.3V Operation
- Operating Temperature Ranges: Commercial (0°C to +70°C) and Industrial (-40°C to +85°C)
- Underwriters Laboratories® (UL) Recognized

Applications

- Servers
- Telematics
- Utility Power Meters
- GPS

Ordering Information and Pin Configuration appear at end of data sheet.

Typical Operating Circuit



Underwriters Laboratories is a registered certification mark of Underwriters Laboratories Inc.



Absolute Maximum Ratings

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground-0.3V to +6.0V
 Junction-to-Ambient Thermal Resistance (θ_{JA}) (Note 1) 73°C/W
 Junction-to-Case Thermal Resistance (θ_{JC}) (Note 1)23°C/W
 Operating Temperature Range
 DS3231S0°C to +70°C
 DS3231SN-40°C to +85°C

Junction Temperature+125°C
 Storage Temperature Range-40°C to +85°C
 Lead Temperature (soldering, 10s)+260°C
 Soldering Temperature (reflow, 2 times max)+260°C
 (see the *Handling, PCB Layout, and Assembly* section)

Note 1: Package thermal resistances were obtained using the method described in JEDEC specification JESD51-7, using a four-layer board. For detailed information on package thermal considerations, refer to www.maximintegrated.com/thermal-tutorial.

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Recommended Operating Conditions

($T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted.) (Notes 2, 3)

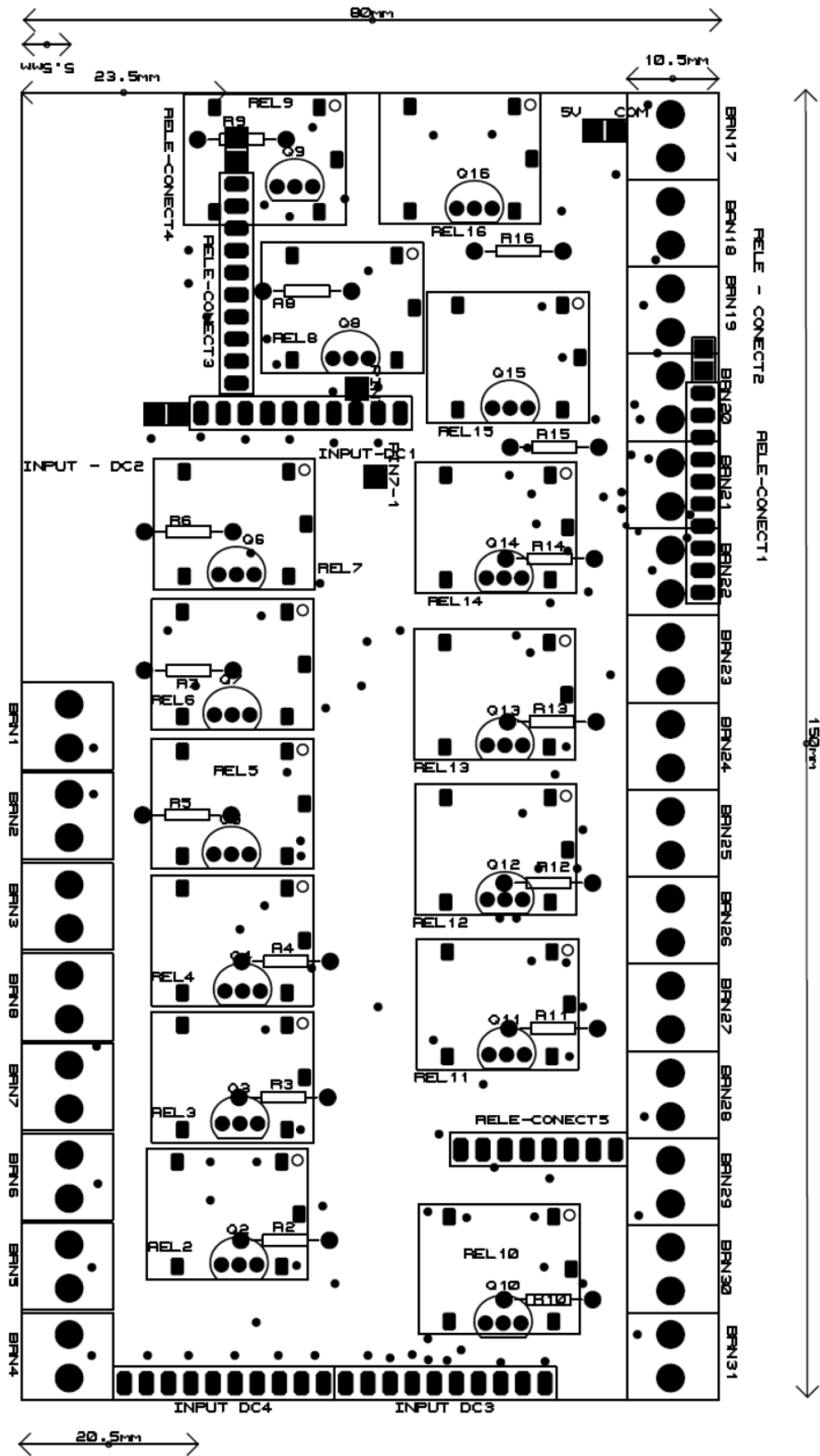
PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V_{CC}		2.3	3.3	5.5	V
	V_{BAT}		2.3	3.0	5.5	V
Logic 1 Input SDA, SCL	V_{IH}		0.7 x V_{CC}		$V_{CC} + 0.3$	V
Logic 0 Input SDA, SCL	V_{IL}		-0.3		0.3 x V_{CC}	V

Electrical Characteristics

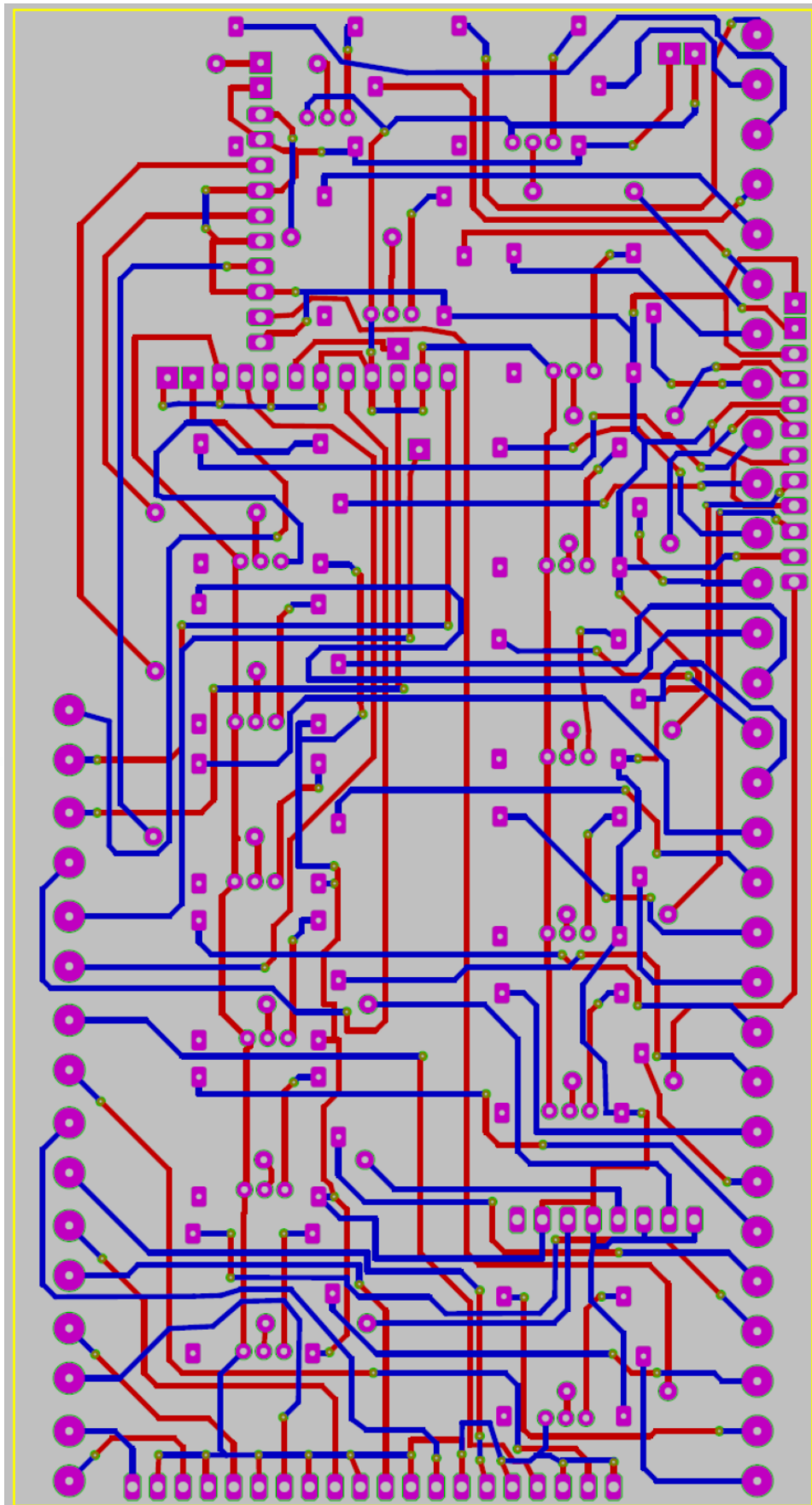
($V_{CC} = 2.3V$ to $5.5V$, V_{CC} = Active Supply (see Table 1), $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted.) (Typical values are at $V_{CC} = 3.3V$, $V_{BAT} = 3.0V$, and $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.) (Notes 2, 3)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Active Supply Current	I_{CCA}	(Notes 4, 5)	$V_{CC} = 3.63V$		200	μA
			$V_{CC} = 5.5V$		300	
Standby Supply Current	I_{CCS}	I ² C bus inactive, 32kHz output on, SQW output off (Note 5)	$V_{CC} = 3.63V$		110	μA
			$V_{CC} = 5.5V$		170	
Temperature Conversion Current	$I_{CCSCONV}$	I ² C bus inactive, 32kHz output on, SQW output off	$V_{CC} = 3.63V$		575	μA
			$V_{CC} = 5.5V$		650	
Power-Fail Voltage	V_{PF}		2.45	2.575	2.70	V
Logic 0 Output, 32kHz, INT/SQW, SDA	V_{OL}	$I_{OL} = 3mA$			0.4	V
Logic 0 Output, RST	V_{OL}	$I_{OL} = 1mA$			0.4	V
Output Leakage Current 32kHz, INT/SQW, SDA	I_{LO}	Output high impedance	-1	0	+1	μA
Input Leakage SCL	I_{LI}		-1		+1	μA
RST Pin I/O Leakage	I_{OL}	RST high impedance (Note 6)	-200		+10	μA
V_{BAT} Leakage Current (V_{CC} Active)	I_{BATLKG}			25	100	nA

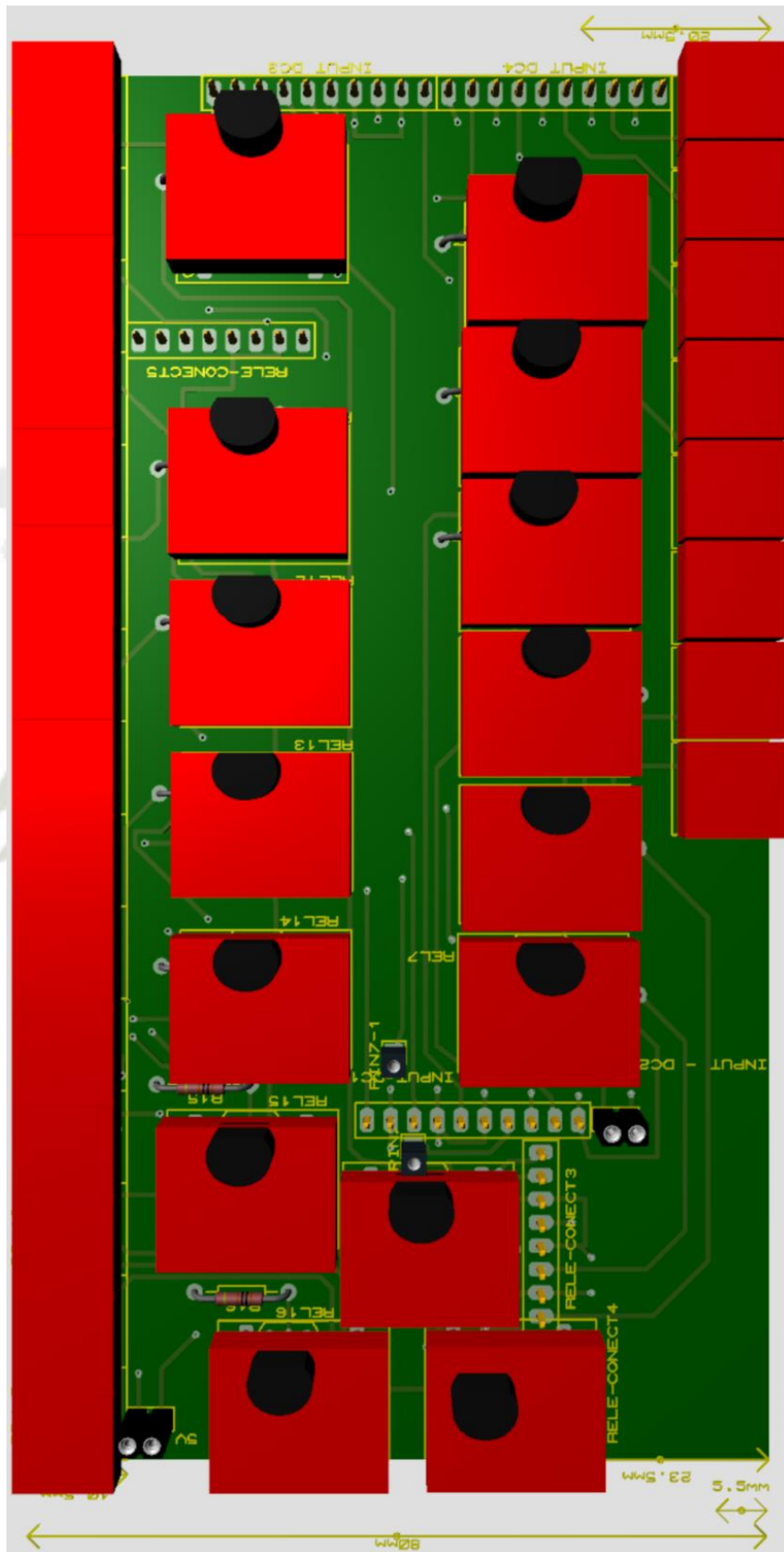
Anexo 10 Plano de la PCB del Tercer Nivel del Controlador.



Anexo 11 *Plano de la PCB del Tercer Nivel del Controlador (Pistas de cobre y orificios)*



Anexo 12 Vista 3D de la PCB del Tercer Nivel del Controlador.



Anexo 13 Código del Controlador para Comandar el Sistema de Control.

```
//-----INCLUYENDO LIBRERIAS NECESARIAS-----
#include <LiquidCrystal_I2C.h>*****LIBRERIA LCD COMUNICACION I2C*****
#include <RTCLib.h>*****LIBRERIA MODULO RTC DS3231*****
#include <DHT.h>*****LIBRERIAS SENSOR DHT22*****
#include <DHT_U.h>*****LIBRERIAS SENSOR DHT22*****
//-----
// -----SALIDAS DIGITALES A RELE -----
const byte O_1 = 7;
const byte O_2 = 13;
const byte O_3 = 12;
const byte O_14 = 23;
const byte O_15 = 8;
//-----
//-----ENTRADAS DIGITALES-----
const byte I_1 = 47;
const byte I_2 = 36;
const byte I_3 = 38;
const byte I_4 = 40;
const byte I_5 = 42;
const byte I_6 = 44;
//-----
//-----ENTRADAS SENSORES DIGITALES-----
int S_1 = 26;
int S_2 = 27;
//-----
//-----ENTRADAS ANALOGICAS-----
const int A_0=A0;
const int A_1=A1;
const int A_2=A2;
//-----
//-----VARIABLES DE TRABAJO-----
int ValMin=0;
int cont_Menu = 0;
int Cont_Config=0;
int Config=0;
int Config_1=0;
int Config_2=0;
int Config_3=0;
int Config_4=0;
bool romper = 0;
bool SELECT = 0;
int Temp_in;***** Variable temperatura ambiental interior*****
int H_in;***** Variable humedad ambiental interior*****

int Temp_out;***** Variable temperatura ambiental exterior*****
int H_out;***** Variable humedad ambiental exterior*****

int Hs_1;***** Variable de trabajo %H de suelo de sensor 1*****
int Hs_2;***** Variable de trabajo %H de suelo de sensor 2*****
int Hs_3;***** Variable de trabajo %H de suelo de sensor 3*****

const int H_aire= 520;***** Constante de %H del aire*****
const int H_agua= 200;***** Constante de %H del agua*****

int Tmax=28;***** CONSTANTE TEMPERATURA AMBIENTAL INTERIOR MAXIMA*****
int Tmin=23;***** CONSTANTE TEMPERATURA AMBIENTAL INTERIOR MINIMA*****
int Hmax_in=85;***** CONSTANTE %H AMBIENTAL INTERIOR MAXIMA*****
int Hmin_in=55;***** CONSTANTE %H AMBIENTAL INTERIOR MINIMA*****

int Hsoil_max=80;***** CONSTANTE %HUMEDAD DE SUELO MAXIMA*****
int Hsoil_min=40;***** CONSTANTE %HUMEDAD DE SUELO MINIMA*****
//-----
```

```

//-----Creación de objetos-----
RTC_DS3231 rtc;***** Crea un objeto del tipo RTC_DS3231*****
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);**Crea un objeto del tipo LCD 16x2**
DHT dht1(S_1, DHT22); //*****Crea un objeto DHT22 *****
DHT dht2(S_2, DHT22); //*****Crea un objeto DHT22 *****
//-----

//-----FUNCION QUE PERMITE NAVEGAR EN EL MENU PRINCIPAL-----
void navegar(){
    if (digitalRead(I_1) == HIGH) {
        cont_Menu++;
        delay(100);
    }
    if (digitalRead(I_3) == HIGH) {
        cont_Menu--;
        delay(100);
    }
}
//-----

//-----FUNCION QUE LIMITA LA NAVEGACION DEL MENU A 7 OPCIONES-----
void Limitar_Menu(){
    if(cont_Menu >=7 ){
        cont_Menu = 7;
    }
    if(cont_Menu <= 1 ){
        cont_Menu = 1;
    }
}
//-----

//-----FUNCION QUE PERMITE NAVEGAR EN EL MENU CONFIGURACION -----
void Limitar_Menu_Config(){
    if(cont_Menu >=2 ){
        cont_Menu = 2;
    }
    if(cont_Menu <= 1 ){
        cont_Menu = 1;
    }
}
//-----

//---FUNCION QUE LIMITA LA CONFIGURACION DE PARAMETROS AMBIENTALES-----
void Limitar_Scroll(){
    if(cont_Menu >=100 ){
        cont_Menu =100;
    }
    if(cont_Menu <= 10 ){
        cont_Menu = 10;
    }
}
//-----

//-----FUNCION QUE PERMITE CONTROLAR LA SELECCION DE OPCIONES-----
void retardo(){
    while (romper == 0){
        if((digitalRead(I_2) == HIGH)){
            romper = 1;
            SELECT = 1;
        }
        if((digitalRead(I_1) == HIGH) || (digitalRead(I_3) == HIGH)){
            romper = 1;
        }
    }
    romper = 0;
    delay(100);
}

```

```

//-----
void setup() {
  //-----CONFIGURACION DE PINES DIGITALES (ENTRADAS/SALIDAS) -----
  pinMode(0_1, OUTPUT);
  pinMode(I_1, INPUT);
  pinMode(0_2, OUTPUT);
  pinMode(I_2, INPUT);
  pinMode(0_3, OUTPUT);
  pinMode(0_15, OUTPUT);
  pinMode(I_3, INPUT);
  //-----

  //-----INICIALIZACION DEL MODULO LCD-----
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();

  rtc.begin();//****INICIALIZACION DEL MODULO RTC DS3231 *****
  dht1.begin();//**INICIALIZA EL SENSOR DHT22 (1)*****
  dht2.begin();//**INICIALIZA EL SENSOR DHT22 (2)*****

  Serial.begin(9600) ;//***** INICIALIZA COMUNICACION SERIAL*****
}

void loop() {
  //-----INSTRUCCION QUE ACTUALIZARA LOS DATOS DE TODOS LOS SENSORES Y MODULOS
  CADA MINUTO-----
  if((ValMin!=(rtc.now().minute())) ){

    Temp_in = dht1.readTemperature();//*****obtención de valor de temperatura
    ambiental interior*****

    H_in = dht1.readHumidity();//*****obtención de valor de humedad
    ambiental interior*****

    Temp_out = dht2.readTemperature();//*****obtención de valor de temperatura
    ambiental exterior*****
    H_out = dht2.readHumidity();//*****obtención de valor de humedad
    ambiental exterior*****

    ValMin=(rtc.now().minute());
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,0);
    lcd.print(rtc.now().day());
    lcd.print("/");
    lcd.print(rtc.now().month());
    lcd.print("/");
    lcd.print(rtc.now().year());
    lcd.print(" ");
    lcd.print(rtc.now().hour());
    lcd.print(":");
    lcd.print(rtc.now().minute());

    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("Tin:");
    lcd.print(Temp_in);
    lcd.print((char)223);
    lcd.print("C ");
    lcd.print("%Hin:");
    lcd.print(H_in);
    cont_Menu=1;
  //-----LECTURA DE LOS SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO-----
  if(analogRead(A_0) >= H_agua && analogRead(A_0) <= H_aire){
    Hs_1= map(analogRead(A_0), H_aire, H_agua, 0, 100);
  }
}

```

```

else {
  if(analogRead(A_0)>H_aire){
    Hs_1 = 0;
  }else if(analogRead(A_0)<H_agua){
    Hs_1 = 100;
  }
}

if(analogRead(A_1) >= H_agua && analogRead(A_1) <= H_aire){
  Hs_2= map(analogRead(A_1), H_aire, H_agua, 0, 100);
}
else {
  if(analogRead(A_1)>H_aire){
    Hs_2 = 0;
  }else if(analogRead(A_1)<H_agua){
    Hs_2 = 100;
  }
}

if(analogRead(A_2) >= H_agua && analogRead(A_2) <= H_aire){
  Hs_3= map(analogRead(A_2), H_aire, H_agua, 0, 100);
}
else {
  if(analogRead(A_2)>H_aire){
    Hs_3 = 0;
  }else if(analogRead(A_2)<H_agua){
    Hs_3 = 100;
  }
}
}
//-----
delay(100);
}
//-----
navegar();//*****LEYENDO LOS PULSADORES PARA NAVEGAR EN EL MENU*****
Limitar_Menu();//***ESTABLECIENDO 7 UNICAS OPCIONES PARA EL MENU*****

//-----MENU PRINCIPAL-----
if((digitalRead(I_1) == HIGH) || (digitalRead(I_2) == HIGH ||(digitalRead(I_3) ==
HIGH))){
  if(cont_Menu==1){
    ValMin=(rtc.now().minute());
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,0);
    lcd.print(rtc.now().day());
    lcd.print("/");
    lcd.print(rtc.now().month());
    lcd.print("/");
    lcd.print(rtc.now().year());
    lcd.print(" ");
    lcd.print(rtc.now().hour());
    lcd.print(":");
    lcd.print(rtc.now().minute());

    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("Tin:");
    lcd.print(Temp_in);
    lcd.print((char)223);
    lcd.print("C");
    lcd.print(" %Hin:");
    lcd.print(H_in);
    delay (100);
  }
  if(cont_Menu==2){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,0);
    lcd.print("T out: ");

```

```

    lcd.print(Temp_out);
    lcd.print((char)223);
    lcd.print("C ");
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("%H out: ");
    lcd.print(H_out);
    delay (100);
}
if(cont_Menu==3){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,0);
    lcd.print("%Hs1:");
    lcd.print(Hs_1);
    lcd.print(" %Hs2:");
    lcd.print(Hs_2);
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("%Hs3:");
    lcd.print(Hs_3);
    delay (100);
}
if(cont_Menu==4){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,0);
    lcd.print("Temp max: ");
    lcd.print(Tmax);
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("Temp min:");
    lcd.print(Tmin);
    delay (100);
}
if(cont_Menu==5){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,0);
    lcd.print("%H amb max: ");
    lcd.print(Hmax_in);
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("%Hamb min:");
    lcd.print(Hmin_in);
    delay (100);
}
if(cont_Menu==6){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,0);
    lcd.print("%Hs max: ");
    lcd.print(Hsoil_max);
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("%Hs min:");
    lcd.print(Hsoil_min);
    delay (100);
}
//*****MENU CONFIGURACION*****
if(cont_Menu==7){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,0);
    lcd.print("CONFIGURACION");

    if(digitalRead(I_2) == HIGH){
        delay(100);
        cont_Menu=0;
        //-----POR MEDIO DEL DO WHILE SE RETIENE EL MENU EN ESE ESTADO--
        do {
            navegar();
            Limitar_Menu_Config();
            delay(100);
        } while (1);
    }
}
//*****CONFIGURACION DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTAL MAXIMA Y MINIMA**
if(cont_Menu==1){

```

```

lcd.clear();
lcd.setCursor (0,0);
lcd.print("Temp y %Humedad");
retardo();
if(SELECT == 1){
  delay(100);
  //*****TEMPERATURA MAXIMA*****
  do {
    SELECT=0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,0);
    lcd.print("Temp max: ");
    navegar();
    Limitar_Scroll();
    lcd.print(cont_Menu);
    retardo();
    if(SELECT == 1){
      delay(100);
      Tmax=cont_Menu;
      Config_1=1;
    }
  } while(Config_1==0);
  //*****
  //*****TEMPERATURA MINIMA*****

  do {
    SELECT=0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,0);
    lcd.print("Temp min: ");
    navegar();
    Limitar_Scroll();
    lcd.print(cont_Menu);
    retardo();
    if(SELECT == 1){
      delay(100);
      Tmin=cont_Menu;
      Config_2=1;
    }
  } while(Config_2==0);
  //*****
  //*****HUMEDAD MAXIMA*****
  do {
    SELECT=0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("%H max: ");
    navegar();
    Limitar_Scroll();
    lcd.print(cont_Menu);
    retardo();
    if(SELECT == 1){
      delay(100);
      Hmax_in=cont_Menu;
      Config_3=1;
    }
  } while(Config_3==0);
  //*****
  //*****HUMEDAD MINIMA*****

  do {
    SELECT=0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("%H min: ");
    navegar();

```

```

        Limitar_Scroll();
        lcd.print(cont_Menu);
        retardo();
        if(SELECT == 1){
            delay(100);
            Hmin_in=cont_Menu;
            Config_4=1;
        }
    } while(Config_4==0);
    //*****
    Config_1=0;
    Config_2=0;
    Config_3=0;
    Config_4=0;
    Config=1;
    SELECT=0;
}
}

//*****
//*****CONFIGURACION HUMEDAD DE SUELO MAXIMA Y MINIMA*****
if(cont_Menu==2){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("%H del suelo");
    retardo();
    if(SELECT == 1){
        delay(100);
        //*****HUMEDAD MAXIMA*****
        do {
            SELECT=0;
            lcd.clear();
            lcd.setCursor (0,0);
            lcd.print("%Hs max: ");
            navegar();
            Limitar_Scroll();
            lcd.print(cont_Menu);
            retardo();
            if(SELECT == 1){
                delay(100);
                Hsoil_max=cont_Menu;
                Config_3=1;
            }
        } while(Config_3==0);
        //*****
        //*****HUMEDAD MINIMA*****
        do {
            SELECT=0;
            lcd.clear();
            lcd.setCursor (0,1);
            lcd.print("%Hs min: ");
            navegar();
            Limitar_Scroll();
            lcd.print(cont_Menu);
            retardo();
            if(SELECT == 1){
                delay(100);
                Hsoil_min=cont_Menu;
                Config_4=1;
            }
        } while(Config_4==0);
        //*****
        Config_3=0;
        Config_4=0;
        Config=1;
    }
}

```



```

    }
}
if(H_in >= Hmax_in){
    digitalWrite(0_1, LOW);
    digitalWrite(0_2, LOW);
    if(Temp_in >= Tmin){
        digitalWrite(0_15, HIGH);
    }else
        digitalWrite(0_15, LOW);
}
}
//*****

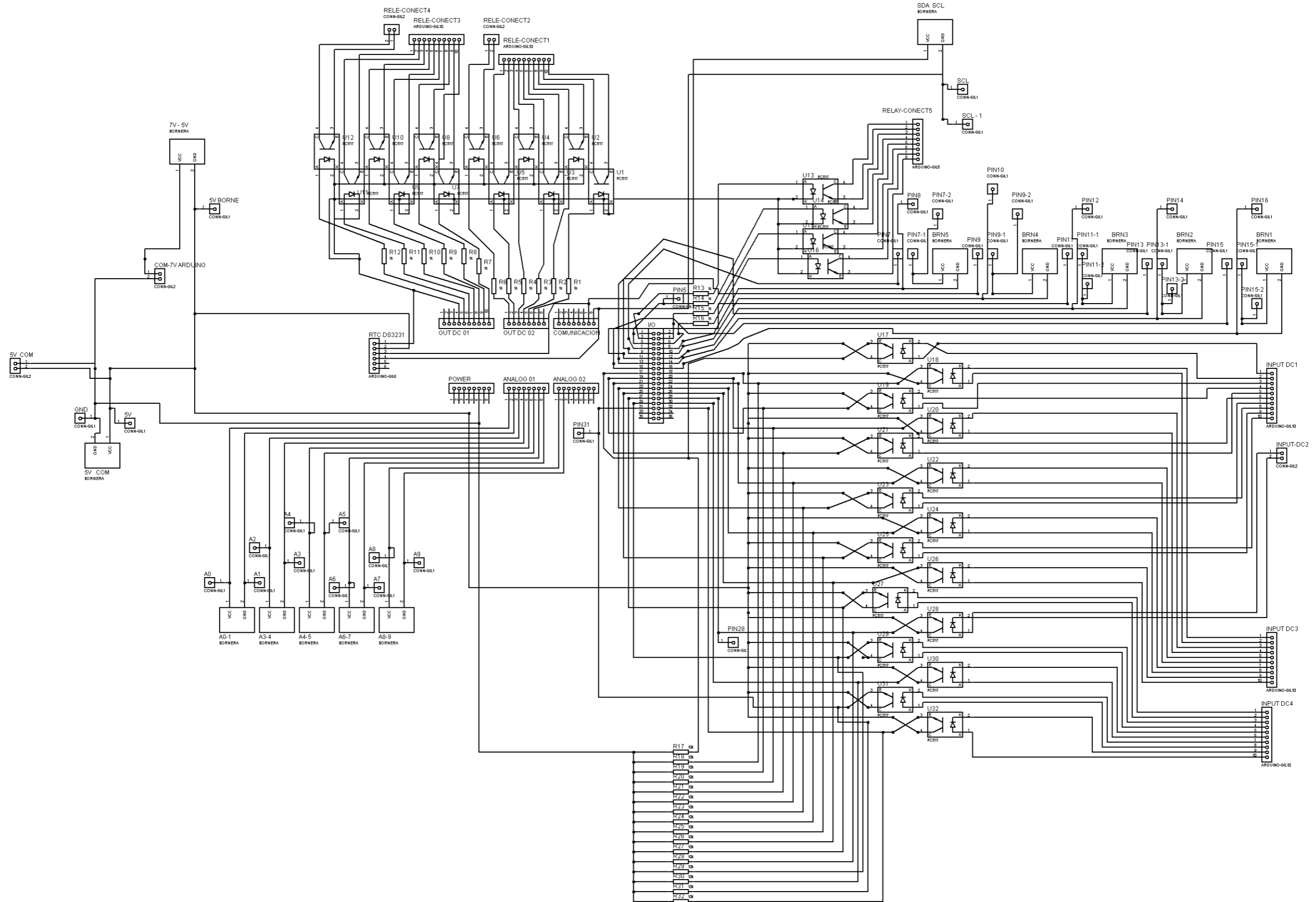
//-----
//-----CONTROL DE HUMEDAD DE SUELO MAXIMA Y MINIMA-----
//**El riego solo se realizará entre las 6 de la mañana y las 4 de la tarde*****
if((rtc.now().hour() >= 6) && (rtc.now().hour() < 14)){
    if(I_4==HIGH){/*Si el nivel de agua está más abajo del minimo no se acciona la
bomba**

        if ((Hs_1<=Hsoil_min)|| (Hs_2<=Hsoil_min)|| (Hs_3<=Hsoil_min)){

//-----CONTROL DE HUMEDAD DEL SUELO Y RIEGO-----
        digitalWrite(0_1, HIGH); //BOMBA
        digitalWrite(0_3, HIGH);//válvula de riego
        lcd.setCursor (0,0);
        lcd.print("REGANDO -----");
        lcd.setCursor (0,1);
        lcd.print("%Hs1:");
        lcd.print(Hs_1);
        lcd.print(" %Hs2:");
        lcd.print(Hs_2);
        delay(60000);/****** 1 min = 60 000 milisegundos*****
        digitalWrite(0_1, LOW);
        digitalWrite(0_3, LOW);
        }
//-----
    }
    if(I_4==LOW){ // ---Si el nivel de gua del tanque es menor al mínimo se envía una
alarma-----
        lcd.clear();
        lcd.setCursor (0,0);
        lcd.print("Nivel de agua del tanque muy bajo");
    }
//-----
}}}}

```

Anexo 14 Circuito de Placa de Segundo Nivel.



Anexo 15 Circuito de Placa de Tercer Nivel.

