

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO PARA PRODUCCIÓN Y GERMINACIÓN DE PLANTULAS CON CONTROL DE TEMPERATURA, LUMINOSIDAD Y RIEGO

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRONICA Y CONTROL**

VALDIVIESO TITUANA DAVID EDMIGIO

DIRECTOR: ING. ANA VERÓNICA RODAS BENALCÁZAR, MBA.

Quito, febrero 2022

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por David Edmigio Valdivieso Tituana, bajo mi supervisión.

Ing. Ana Verónica Rodas Benalcázar
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, David Edmigio Valdivieso Tituana, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

David Edmigio Valdivieso Tituana

DEDICATORIA

A mis padres y hermana, por apoyarme, cuidarme y guiarme.

A mis abuelitos y demás familiares.

AGRADECIMIENTO

A mi madre, por su apoyo incondicional, por su cariño, por inculcarme valores, por protegerme, por enseñarme a ser un hombre de bien.

A mi padre, quien, a más de su cariño, enseñanzas y afecto, me ha brindado sus conocimientos y ayuda para realizar este proyecto técnico.

A mi hermana, quien es mi ejemplo a seguir, por estar siempre pendiente de mí y ayudarme cuando lo necesito.

A mis abuelitos, por su aprecio y cariño, por siempre recibirme con una sonrisa, por su sacrificio y esfuerzo.

A la Ing. Ana Rodas, por su apoyo, tiempo, paciencia y guía durante la realización de este trabajo.

A la Ing. María Trujillo, por confiar en mí, por darme ánimos, por su ayuda, y por sus consejos.

A mis amigos, con quienes pase los mejores momentos dentro de la Universidad, por acompañarme, por estar pendientes de mí y por apoyarme cuando lo necesitaba.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ALCANCE	2
1.3 MARCO TEÓRICO	3
1.3.1 MICROCLIMAS PARA EL CRECIMIENTO ACELERADO DE PLÁNTULAS. ..	3
1.3.2. PLÁNTULAS.....	5
1.3.3. REQUERIMIENTOS PARA LA GERMINACIÓN Y EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS	6
1.3.4. SISTEMAS DE CONTROL EN MICROCLIMAS.....	10
2. METODOLOGÍA.....	13
2.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA FÍSICA.....	13
2.1.1. ÁREA DEL MÓDULO	13
2.1.2. ESTRUCTURA	15
2.2. CONTROL DE VENTILACIÓN FORZADA Y EXTRACCIÓN DE AIRE	18
2.2.1. ACTUADORES.....	18
2.3. CONTROL DE TEMPERATURA.....	19
2.3.1. MEDICIÓN DE TEMPERATURA	20
2.3.2. SISTEMA DE ACTUACIÓN.....	21
2.3.3. DIMENSIONAMIENTO DE ACCIONADORES	24
2.4. CONTROL DE HUMEDAD SUELO	26
2.4.1. MEDICIÓN HUMEDAD SUELO	27
2.4.2. EMISORES DE AGUA	28
2.4.3. VÁLVULAS	31
2.5. CONTROL DE HUMEDAD	35
2.5.1. MEDICIÓN DE HUMEDAD AMBIENTAL	36

2.6.	CONTROL DE ILUMINACIÓN	37
2.6.1.	ACTUADORES.....	37
2.7.	ADQUISICIÓN DE DATOS, ALARMAS DEL SISTEMA Y CONTROL EN LINEA 39	
2.7.1.	CONTROLADOR.....	39
2.7.2.	ADQUISICIÓN DE DATOS	46
2.7.3.	ALARMAS DEL SISTEMA	49
2.7.4.	CONTROL EN LÍNEA.....	53
2.8.	TABLERO DE CONTROL	67
2.8.1.	RELÉS	67
2.8.2.	DIMENSIONAMIENTO DE PROTECCIONES	68
2.8.3.	ELEMENTOS DEL TABLERO DE CONTROL	73
2.8.4.	IMPLEMENTACIÓN DEL TABLERO DE CONTROL.....	76
2.9.	INTERFAZ HOMBRE-MAQUINA	79
2.9.1.	PANTALLA SIEMENS LOGO 8	82
2.9.2.	SERVIDOR WEB.....	83
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	88
3.1.	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL TABLERO DE CONTROL Y CABLEADO DEL MÓDULO.	91
3.1.1.	OBJETIVOS.....	91
3.1.2.	MATERIALES	91
3.1.3.	METODOLOGÍA DE LA PRUEBA	91
3.1.4.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	92
3.2.	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	94
3.2.1.	OBJETIVOS.....	94
3.2.2.	MATERIALES	94
3.2.3.	METODOLOGÍA DE LA PRUEBA	95
3.2.4.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	95
3.2.5.	DISCUSIÓN.....	100
3.3.	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL EN LÍNEA. 100	
3.3.1.	OBJETIVOS.....	100
3.3.2.	MATERIALES	100
3.3.3.	METODOLOGÍA DE LA PRUEBA	101
3.3.4.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	104
3.3.5.	DISCUSIÓN.....	114
3.4.	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LA INTERFAZ HMI.....	114

3.4.1.	OBJETIVOS.....	114
3.4.2.	MATERIALES.....	114
3.4.3.	METODOLOGÍA DE LA PRUEBA	114
3.4.4.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	115
3.4.5.	DISCUSIÓN.....	119
3.5.	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO CON PLÁNTULAS REALES 119	
3.5.1.	OBJETIVOS.....	119
3.5.2.	MATERIALES.....	119
3.5.3.	METODOLOGÍA DE LA PRUEBA	120
3.5.4.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	125
3.5.5.	DISCUSIÓN.....	135
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	136
4.1.	CONCLUSIONES	136
4.2.	RECOMENDACIONES.....	137
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138

RESUMEN

En el presente proyecto se implementa un módulo germinador y productor de plántulas con control de temperatura, luminosidad y riego, con el fin de generar un microclima idóneo donde semillas de especies de ciclo largo como árboles frutales puedan germinar y crecer con rapidez.

El trabajo comienza con una investigación de microclimas adecuados para el crecimiento de plántulas, la importancia de mantener bajo ciertos rangos las variables físicas como temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y finalmente los factores que influyen en el crecimiento de las plántulas. Se continúa con el diseño de la estructura del módulo, la descripción y dimensionamiento de todos los elementos que influyen en la generación y control del microclima (sensores, transmisores, actuadores, controlador), la implementación del tablero de control, la implementación del sistema de adquisición de datos, control en línea y la interfaz HMI.

Finalmente se realizan pruebas para verificar el funcionamiento y para comprobar el crecimiento acelerado. Las pruebas se realizan comparando las características morfológicas en dos especies de plántulas (Café y Chirimoya) desde la germinación hasta el desarrollo de las primeras hojas verdadera.

PALABRAS CLAVE: módulo, control, plántulas, microclima.

ABSTRACT

This project implements a germinator and seedling producer module with temperature, light and irrigation control, in order to generate an ideal microclimate where seeds of long cycle species such as fruit trees can germinate and grow quickly.

The work begins with an investigation of suitable microclimates for seedling growth, the importance of maintaining under certain ranges the physical variables such as temperature, relative humidity, soil moisture and finally the factors that influence the growth of seedlings. The design of the module structure, the description and sizing of all the elements that influence the generation and control of the microclimate (sensors, transmitters, actuators, controller), the implementation of the control panel, the implementation of the data acquisition system, online control and the HMI interface.

Finally, tests are performed to verify the operation and to check the accelerated growth. The tests are performed by comparing the morphological characteristics in two species of seedlings (Coffee and Custard Apple) from germination to the development of the first true leaves.

KEYWORDS: module, control, seedlings, microclimate.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existen numerosas técnicas para mejorar el rendimiento en los cultivos, usando agua con fertilizantes, controlando plagas-enfermedades y el manejo del clima. Estas técnicas buscan soluciones tecnológicas que contribuyan a mejorar el proceso fotosintético de las plantas, el cual consiste principalmente en aprovechar la energía lumínica y transformar la energía química en azúcares y otras sustancias importantes que constituyen la biomasa necesaria para el crecimiento de las plantas. [1]

La implementación de sistemas agrícolas automatizados y equipados se ha enfocado en la generación de ambientes controlados o microclimas para mejorar la producción de cultivos de ciclo corto y vegetales en temporadas que no son favorables a campo abierto. Sin embargo, no es rentable ingresar cultivos de ciclo largo como árboles frutales, a microclimas artificiales por su tamaño y tiempo de cosecha (algunas especies desarrollan frutos solamente una vez por año). Por ello, en este proyecto se enfocó en generar un sistema automatizado que permita reducir el tiempo desde la germinación hasta el trasplante de cultivos de ciclo largo para aumentar la producción. [2]

Las plantas en su desarrollo pasan por 3 fases: establecimiento, crecimiento rápido y endurecimiento; una plántula en proceso de germinación y en sus primeras etapas de crecimiento tiene necesidades muy diferentes a las de una planta grande. En cada etapa las plantas tienen diferentes requerimientos de luz, agua, espacio, tipo de atención y trabajos necesarios para mantenerlas vigorosas. Este proyecto técnico diseña e implementa un módulo capaz de acelerar la velocidad de crecimiento en todas las fases de crecimiento. [3]

El módulo se construyó con estructura metálica recubierta por plástico de invernadero, lo que permitió generar un clima interior parcialmente aislado de factores ambientales del exterior. Para controlar las variables dentro del mismo se instalaron ventiladores axiales, resistencias calefactoras, emisores de riego (nebulizadores o micro aspersores) y para la medición sensores y transmisores de temperatura, humedad relativa y humedad suelo.

El sistema diseñado permite controlar las variables físicas más importantes para el crecimiento acelerado, las cuales son: temperatura, humedad del suelo, ventilación e iluminación de forma directa, e indirectamente la humedad relativa y los niveles de CO₂ dentro del módulo.

El sistema de control es flexible, es decir, permite ingresar valores de referencia de los controladores en función de la especie a producir y la fase de crecimiento en la que se encuentra y utiliza una interfaz gráfica donde se visualizan las variables, además se permite enviar comandos para forzar accionadores y cambiar configuraciones del sistema.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

- Diseñar e implementar un módulo para producción y germinación de plántulas con control de temperatura, luminosidad y riego.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Recopilar información sobre generación de microclimas adecuados para crecimiento acelerado de plantas y su reacción al ser sometidas a ambientes controlados, así como sensores y actuadores a ser utilizados en invernaderos.
- Diseñar e implementar el módulo para producción y germinación de plantas.
- Diseñar e implementar el algoritmo para el control de las señales de temperatura, humedad ambiental, riego e iluminación artificial, tomando en cuenta valores referenciales introducidos por el usuario.
- Verificar el funcionamiento del módulo mediante pruebas a un grupo de plántulas y semillas.

1.2 ALCANCE

En el presente proyecto se realizará una recopilación de información sobre un método para la generación de microclimas controlados adecuados para el crecimiento acelerado de plantas.

Se investigarán las opciones disponibles de sensores y actuadores para cada una de las variables (temperatura y humedad) a controlar en la generación de microclimas, así como de sistemas de adquisición de datos, considerando entradas y salidas tanto analógicas como digitales.

Se diseñará un módulo para producción y germinación de plantas el cual tendrá una capacidad de hasta 400 plántulas.

Se diseñará e implementará el sistema de adquisición, medición y actuación, así como un algoritmo para el control de las señales de temperatura, humedad ambiental, iluminación y riego.

Se diseñará un tablero de control que contendrá selectores, luces piloto y la interfaz de usuario.

Se implementará el hardware y software en el módulo tomando en cuenta los diseños eléctricos realizados

Se probará el funcionamiento del módulo mediante el análisis de grupo de plántulas que estén desarrollándose dentro del módulo y se las comparará con aquellas (del mismo tipo) que se desarrollen fuera del mismo con el fin de observar sus características morfológicas.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 MICROCLIMAS PARA EL CRECIMIENTO ACELERADO DE PLÁNTULAS.

Los microclimas se definen como un clima con características diferentes al resto de áreas que lo rodean que pueden ser sustanciales o leves dependiendo de diversos factores. Los microclimas pueden ser espacios reducidos o alcanzar cientos de kilómetros cuadrados. La temperatura y humedad son las principales características diferentes. [4]

La generación de un microclima para el cultivo de plantas debe ser específico y sus modificaciones dependen directamente de las plantas a cultivar, propiedades del material de cerramiento, condiciones del aire, forma, dimensiones, orientación y las posibilidades de evaporación del suelo. [5]

El control que se efectúa sobre los microclimas influye considerablemente en el desarrollo de los cultivos, logrando un mayor crecimiento de las plantas en menor tiempo, permitiendo disminuir el costo de abonos y pesticidas, ya que permite crear condiciones ideales para cada cultivo específico de acuerdo a la necesidad de cada planta, reduciendo problemas de deshidratación o asfixia radicular por exceso de agua, temperatura y humedad. [1], [6]

1.3.1.1. Variables a Controlar para el crecimiento acelerado de plántulas.

El mantenimiento del clima dentro de un ambiente para el crecimiento acelerado de plantas, es de gran prioridad, a pesar de las buenas propiedades en las variables genéticas de los cultivos, la buena calidad de fertilizantes y el suelo, existen variables a considerar que declinan la producción y podrían generar pérdidas, por lo cual, se vuelve indispensable el correcto manejo de temperatura, humedad, dióxido de carbono y luminosidad. La variación del microclima dentro de un invernadero es un ambiente complejo con diversos parámetros no lineales a controlar, el cual depende de factores internos y externos como la humedad ambiente, la radiación solar, velocidad y dirección del viento. [7] A continuación se analizará cada una de las variables involucradas:

Temperatura

Es el factor principal que determina la adaptación de las especies, debido a que afecta directamente a las funciones vitales, la velocidad de las reacciones químicas, los cambios en la estructura y actividades de macromoléculas. El aumento de la temperatura provoca el incremento de la energía cinética y las reacciones de la plántula, lo que se traduce en aceleramiento en el crecimiento vegetal. En caso de existir un ascenso excesivo de temperatura se pueden alterar los procesos fisiológicos, desnaturalizando las enzimas y desorganizando la estructura celular. [7], [5]

Humedad Relativa

Es un factor medioambiental influyente en el cultivo, debido a que al aumentar la humedad relativa se mejora la conductancia estomática de las hojas, incrementando la absorción de CO₂ y el rendimiento del cultivo. La transpiración de la planta disminuye con altas humedades relativas, lo que disminuye el estrés por falta de agua permitiendo incrementar la tasa fotosintética, aunque por consecuencia puede existir una deficiencia en el transporte de nutrientes desde la raíz a las hojas. [8] Un exceso de humedad relativa favorece el crecimiento de hongos y plagas indeseadas en el desarrollo de una planta.

Dióxido de Carbono

Los cultivos y la vegetación en general necesitan de CO₂ para crecer y desarrollarse, pero un exceso de CO₂ en las plantas también puede ser perjudicial para las mismas. [9]

La ventilación, la fotosíntesis, la respiración de las plantas y la generación de CO₂ del suelo influyen en el contenido de este gas en el aire dentro del microclima. En las noches, por acumulación de CO₂ producto de la respiración de las plantas, la tasa es superior a la del

aire exterior. De día, debido a la fotosíntesis, el CO_2 es menor respecto al valor normal exterior. El CO_2 en un invernadero cerrado puede disminuir hasta 200 ppm, siendo limitante para la producción y el crecimiento de plantas. [8]

Una correcta ventilación con tasas de 20 a 30 renovaciones por hora suele ser suficiente para mantener niveles de CO_2 adecuados.

Luminosidad

La cantidad (intensidad / fotoperiodo) y la calidad (composición espectral) de la luz afectan al crecimiento y la fisiología de las plantas además de proporcionar la energía para la fotosíntesis. La luz también permite regular el desarrollo, la conformación y el metabolismo de las plantas en el complejo proceso de la foto morfogénesis. Los conocimientos sobre la foto morfogénesis de las plantas han aumentado drásticamente en los últimos años, también gracias al gran uso de los diodos emisores de luz (LED), que ofrecen varias ventajas en comparación con fuentes de luz convencionales, como la posibilidad de adaptar el espectro luminoso y regular la intensidad de la luz, en función de los requisitos específicos de los distintos cultivos y etapas de desarrollo. [10]

Basándose en los conocimientos actuales sobre la respuesta de las plantas en los cultivos, la iluminación LED permite mejorar el rendimiento y la calidad del producto. [10]

1.3.2. PLÁNTULAS

Se denomina plántula a la planta en sus primeros estados de desarrollo, desde la germinación hasta que se desarrollan las primeras hojas verdaderas. [11]

1.3.2.1. Fases de desarrollo

El desarrollo de casi todos los cultivos puede ser dividido en tres fases: Establecimiento, crecimiento rápido y endurecimiento. En cada fase, las plantas presentan diferentes requerimientos de humedad suelo y atención. [3]

Fase de establecimiento

En plantas cultivadas a partir de semillas, la fase de establecimiento está definida como la que empieza con la siembra de semillas, pasado por la germinación, emergencia y desarrollo de las acículas primarias o primeras hojas verdaderas. Esta fase dura unas pocas semanas y depende del tipo de planta y calidad de semilla. [3]

Crecimiento Rápido

En esta fase los brotes de las plantas aumentan de tamaño rápidamente. Frecuentemente el tallo terminal se aproxima al tamaño objetivo. Las plantas demandan mayor protección en esta fase. [3]

Endurecimiento

Durante esta fase la energía es dirigida al crecimiento de la raíz. El diámetro del cuello y las raíces alcanzan las especificaciones deseadas al tiempo que no se busca el crecimiento de partes aéreas de la planta. El endurecimiento hace referencia a acondicionar la planta para resistir el estrés producido al levantamiento, transporte y trasplante al campo. También esta etapa permite el obtener plantas robustas que tengan reservas de energía para sobrevivir y crecer luego del trasplante. [3]

1.3.3. REQUERIMIENTOS PARA LA GERMINACIÓN Y EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS

Se necesita la presencia y control de factores como la temperatura, humedad, oxígeno y condiciones de iluminación para que las semillas germinen. Todas tienen rangos de temperaturas óptimas para su germinación. Si la temperatura es óptima, la germinación es rápida y uniforme. [12]

Estas condiciones contribuyen para que las plántulas crezcan rápidamente y se mantengan vigorosas, pero a más de estar en un microclima adecuado también se deben tomar en cuenta otros elementos como: sustratos, nutrientes, abonos y fertilizantes. [13]

Los sustratos pueden ser definidos como cualquier medio que se utilice para la sustitución del suelo para cultivar plantas en contenedores. Los contenedores son fundas o recipientes de diversos tamaños y formas en donde queda contenido el sustrato. El volumen del contenedor determina el tamaño que podrá alcanzar la planta. El sustrato debe proporcionar nutrientes y agua, permitir la aireación de las raíces y proporcionar soporte o anclaje a la plántula. Mientras que los fertilizantes se definen como sustancia o mezcla de sustancias que, incorporada al suelo suministra los elementos que estos requiere para su nutrición, estimulando el crecimiento y aumentando la producción. [13]

El riego es un factor primordial en el crecimiento de las plántulas ya que éste aporta el agua que necesitan para su crecimiento

1.3.3.1. Riego

El agua es de vital importancia para el crecimiento y desarrollo de las plantas, es importante contar con agua de buena calidad y suficiente para su requerimiento. Esta se debe proporcionar a las plantas según su necesidad evitando excesos. Las plantas durante su crecimiento son más delicadas a déficit y excesos. [13]

Al regar se debe minimizar las pérdidas de agua, haciendo un uso más eficiente de la misma. La eficiencia de riego es la cantidad de agua disponible para el cultivo que queda en el suelo después de un riego, en relación al total del agua que se aplicó. [14]

Riego por Microaspersión

Consiste en la aplicación de agua al suelo en gotas pequeñas, normalmente a una presión de 1.6 Kg/cm², con un diámetro de riego normalmente entre 3 y 4 metros. Una variación de los micro aspersores son los micro jets que se colocan de manera que cuelgan por encima de las plantas y se utilizan principalmente en viveros y zonas para producción de plantas [14], como se observa en la Figura 1.1. Riego por Microaspersión



Figura 1.1. Riego por Microaspersión

Riego por goteo

Este método de riego consiste en la aplicación de agua en forma de gotas de manera continua en un lugar cercano a la planta, mojando solo un 30% del volumen del suelo. Es un riego de alta frecuencia. En este método, en el suelo se forma un bulbo húmedo debajo de cada gotero donde la planta desarrolla una mayor cantidad de raíces. [14], como se observa en la Figura 1.2. Riego por goteo



Figura 1.2. Riego por goteo

Riego por Nebulización

En este sistema los nebulizadores observados en la Figura 1.3, expulsa el agua en forma de neblina, que además de suministrar agua o fertilizante, contribuyen a disminuir la temperatura y elevar la humedad relativa en los microclimas.

Permite entregar un riego uniforme y el tamaño de la gota no ocasiona daños a los cultivos ni la compactación del sustrato.



Figura 1.3. Riego por Nebulización

Sistemas Automatizados de Riego Localizado

Se trata de un sistema de riego que provee de agua a cultivos de manera automática y que normalmente emplea la aspersión o el goteo.

Presentan una mejor gestión del uso del agua durante el riego y permiten la distribución uniforme. [15]

Generalmente los sistemas de riego localizado incluyen la unidad de regulación y control, estación de bombeo, equipo de filtrado, controladores y reguladores de presión y caudal, válvulas y los dispositivos de medición de agua.

La unidad de regulación y control incluye los elementos: una válvula de seguridad de corte, una válvula de salida de aire y válvula automática. Las válvulas controladas son la base de la automatización de estos sistemas y se programan para permitir el paso de un volumen dado de agua. Estas válvulas se seleccionan tomando en cuenta el volumen de agua y el caudal. [16]

Riego Temporizado

El riego temporizado consiste en permitir la dosificación de agua a los cultivos mediante dosis dadas por tiempo y volumen en un horario programado. Este tipo de riego es el más utilizado actualmente en invernaderos y para producción de plantas debido a que es de fácil instalación, ahorra tiempo y esfuerzo, y es de fácil mantenimiento. Pero presenta desventajas como ajustes continuos en los parámetros configurables para evitar falta de riego o encharcamientos, es por esto que actualmente en cultivos con alta necesidad de atención se implementa el riego por demanda, que se analiza a continuación.

Riego por demanda

Es un sistema de riego automatizado que depende de las medidas de sensores externos, este sistema actúa de acuerdo con los procesos evapotranspirativos que sufre el cultivo. Actualmente existe esta opción de riego que permite que la humedad del suelo se mantenga en un rango de valores asignados tomando en cuenta las propiedades del suelo. Esto permite ahorrar agua, mejorar la calidad de las plantas, evitar encharcamientos o marchitez por exceso o déficit de agua y generar mayor sostenibilidad del medio ambiente. [17]

1.3.3.2. Propiedades del suelo

Es importante conocer las características del suelo pues son un factor determinante en la germinación, crecimiento y tipos de cuidados que se debe dar a la planta dentro de sus diferentes etapas. A continuación, se indican algunas de ellas:

Humedad del Suelo

La humedad del suelo es la cantidad de agua que almacenan los macroporos existentes en el suelo. Los niveles de humedad del suelo adecuados son una condición importante para la formación adecuada de las plantas y el alto rendimiento de los cultivos. El nivel del agua en el suelo se expresa como la relación entre la cantidad de agua y el peso del suelo seco, se puede expresar en porcentaje. [18]

Capacidad de Campo

La capacidad de Campo corresponde al límite superior de agua disponible y representa la humedad del suelo tras el drenaje del agua contenida en los macroporos por acción de la gravedad. Esta condición de humedad favorece una mayor absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas. [19]

Punto de Marchitez Permanente

El punto de marchitez permanente corresponde al límite inferior del agua disponible. Esta condición de humedad restringe severamente la absorción de agua por parte de las plantas, que morirían si no hay reposición del agua en el suelo. [19]

1.3.4. SISTEMAS DE CONTROL EN MICROCLIMAS

Con el aumento de la producción en los cultivos se hace necesario el uso de tecnología con la aplicación de técnicas de control específicas que permita la manipulación del microclima generado dentro de invernaderos. Desde la década del 70 se emplean técnicas para el control de invernaderos mediante técnicas convencionales como el control PID (Proporcional más integral derivativo), el control On-Off y el uso de técnicas más avanzadas como los controles óptimos y predictivos aplicando modelos del clima por ser no lineal e inestable. [20]

El control aplicado a los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos para la manipulación de microclimas, se debe implementar considerando la estructura física, ventilación, riego, humedad y temperatura.

Los sistemas de control actuales buscan crear un entorno favorable para el cultivo con el fin de alcanzar resultados de alto rendimiento, alta calidad y bajos costos.

Tomando en cuenta que el microclima generado dentro de un invernadero es un sistema altamente no lineal, fuertemente acoplado y con múltiples entradas y salidas (MIMO), que presentan comportamientos dinámicos y son perturbados en gran medida por el clima exterior (Velocidad del viento, temperatura y humedad exterior, etc.), actualmente se han propuesto varias técnicas de control avanzado como el control predictivo, control difuso, control óptimo y control compatible para diferentes entornos y tipos de invernadero. Pero estos enfoques son teóricamente complejos y difíciles de implementar en la producción real de plantas y cultivos. Debido a esto la aplicación de la ingeniería de control de microclimas adoptan en su mayoría controladores proporcionales, integrales convencionales debido a su arquitectura simple, fácil implementación y excelente rendimiento. [20] como se muestra en la Figura 1.4.

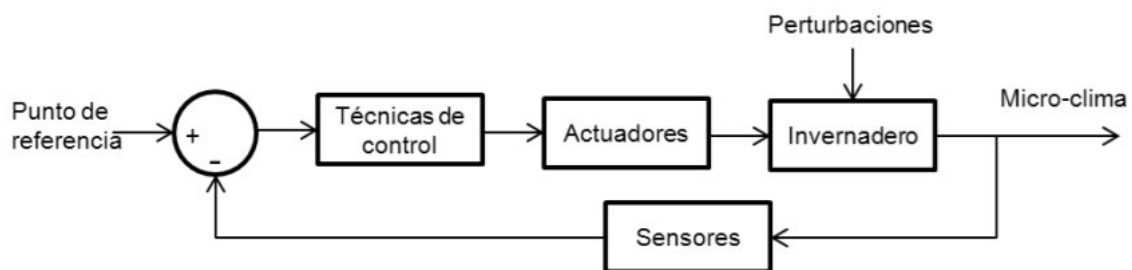


Figura 1.4. Esquema de lazo de Control para el Microclima

1.3.4.1. Tipos de Control

Existen algunos tipos de control que pueden ser aplicados para el control de las diferentes variables involucradas en un microclima para el crecimiento y desarrollo de plántulas. Se exponen algunos de ellos:

Control ON-OFF con Histéresis

Este tipo de control posee dos estados (Encendido – Apagado), incorpora un retardo en el cambio de la señal para disminuir la cantidad de conmutaciones permitiendo prolongar la vida útil de los componentes, pero no permite que la variable manipulada se encuentre en un valor definido, sino que produce una oscilación alrededor del valor referencial llamada histéresis.

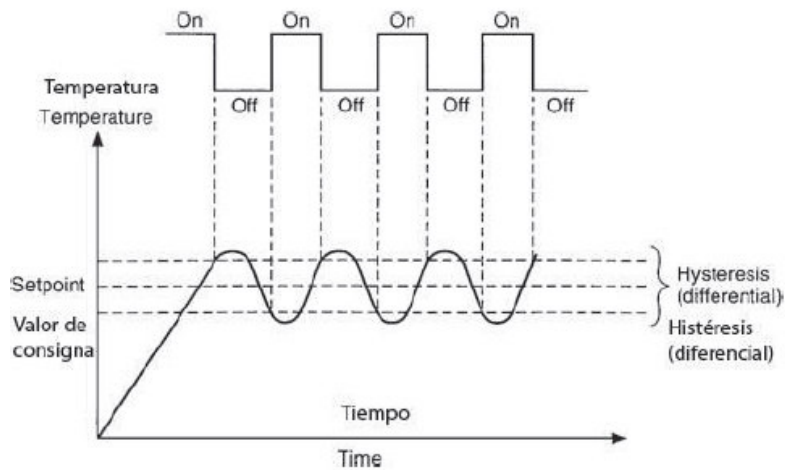


Figura 1.5. Controlador On-Off con histéresis

Control Proporcional-Integral

Es un controlador en lazo cerrado, por el cual ingresa un error correspondiente al valor deseado menos el valor medido y mediante la ecuación (1.1), obtiene una señal que procura reducir el error ajustando la señal de entrada al sistema.

La acción proporcional consiste en multiplicar el error por una constante K_p y enviarla a la salida del controlador. Está basado en un algoritmo lineal y proporcional, cuyo objetivo es disminuir la magnitud del error.

La acción integral permite eliminar el error en estado estacionario, funciona cuando hay diferencia entre la variable y el valor deseado mediante la integración de este error en el tiempo.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i * s} \right) \quad (1.1)$$

En el caso de este proyecto técnico se ha optado por realizar un control PI para la temperatura durante la noche, un control On-Off con histéresis para la temperatura durante el día, la humedad relativa, riego (demanda) y un control On-Off temporizado para la iluminación, riego (temporizado) y ventilación.

2. METODOLOGÍA

Este proyecto técnico abarca la implementación de un módulo que permita la germinación y acelere el crecimiento de plántulas hasta que estén listas para el trasplante. Esto se logra creando un microclima idóneo para las plantas, donde se mantienen rangos adecuados de temperatura, humedad ambiental, humedad del suelo y luminosidad.

En este capítulo se explicará el procedimiento y las consideraciones que se tomaron para el diseño y construcción del módulo, además de describir los sistemas de control implementados, los sensores, transmisores y actuadores usados, la lógica de control diseñada y el sistema de adquisición de datos. Finalmente se presentará el tablero de control y la interfaz Humano-Maquina desarrollada en el proyecto.

2.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA FÍSICA

Para la construcción de la estructura física del módulo se consideró el número total de plántulas que se desean producir, el material, la forma de germinación de las plantas (funda para vivero, bandeja de germinación), el acople con los elementos del sistema de control (sensores, actuadores, tablero de control), la comodidad a la hora de realizar el seguimiento a las plántulas, tamaño máximo de las plántulas, su ubicación y el aspecto económico.

La forma de germinación escogida fue mediante fundas de vivero, que permiten cultivar plántulas de árboles frutales de diversas especies, además de facilitar el seguimiento y posterior trasplante.

2.1.1. ÁREA DEL MÓDULO

El área del módulo a construir depende del número máximo de plántulas a producir y está diseñado para introducir dos especies al mismo tiempo ya que se construyó con dos zonas separadas de producción. Para el diseño del área de cultivo en el módulo se tomaron en cuenta dos tamaños estándar de funda: 10x7cm y 10x15cm.

El área es de 4.25 m², permitiendo introducir aproximadamente 800 fundas pequeñas (10x7cm) o 220 fundas grandes (10x15cm).

Dentro del área de módulo se designaron dos zonas de cultivo, las cuales tienen riego independiente permitiendo introducir dos especies de plántulas al mismo tiempo con necesidades similares de temperatura y humedad ambiental. En la Figura 2.1. se puede apreciar las zonas de cultivo A y B.

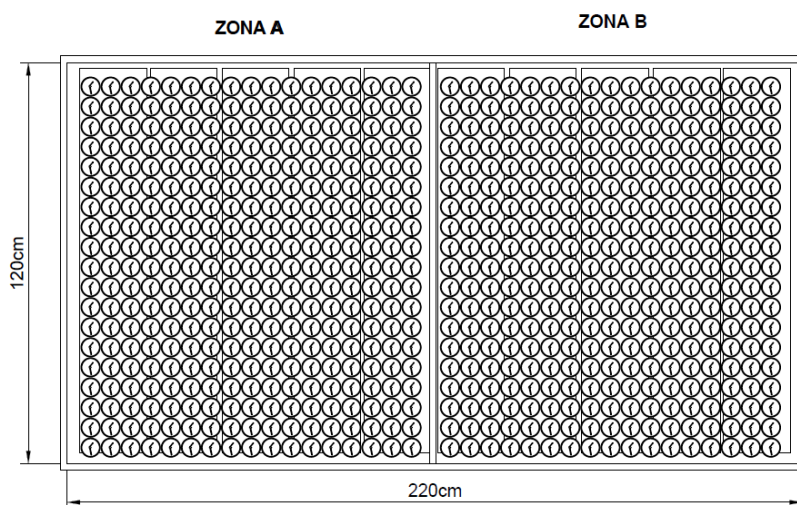


Figura 2.1. Zonas de Cultivo

Las fundas son colocadas una a continuación de otra como se observa en la Figura 2.2, lo que permite aumentar la cantidad de plántulas en el área disponible sin causar problemas en la germinación y desarrollo de las mismas gracias a las características que ofrecen las fundas para vivero.

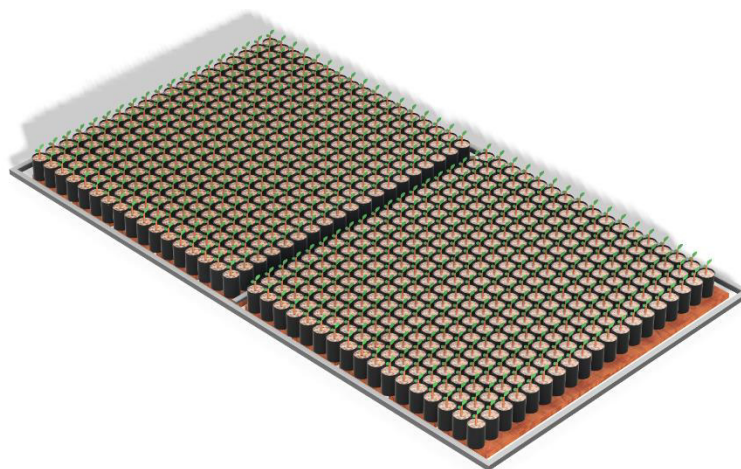


Figura 2.2. Disposición de Plántulas

2.1.2. ESTRUCTURA

Ya que el módulo va a permitir el desarrollo de aproximadamente 800 plántulas y considerando el peso de cada funda (10x7cm) se determina que el peso total que debe soportar la estructura es de 720kg.

Con el peso calculado se decidió usar perfiles metálicos para su construcción, debido a que era la mejor opción ante alternativas como madera. Dichos perfiles fueron recubiertos con una capa de pintura de esmalte para evitar la corrosión.

Se construyó el módulo con cuatro puertas en los laterales, la base está a 80 cm de altura para generar comodidad, facilitar el seguimiento y acceso al encargado del cuidado de las plántulas.

El módulo se diseñó y construyó de forma modular, lo que permite el transporte y el reensamble en caso de reubicación con gran facilidad. La estructura del módulo se puede ver en la Figura 2.3.

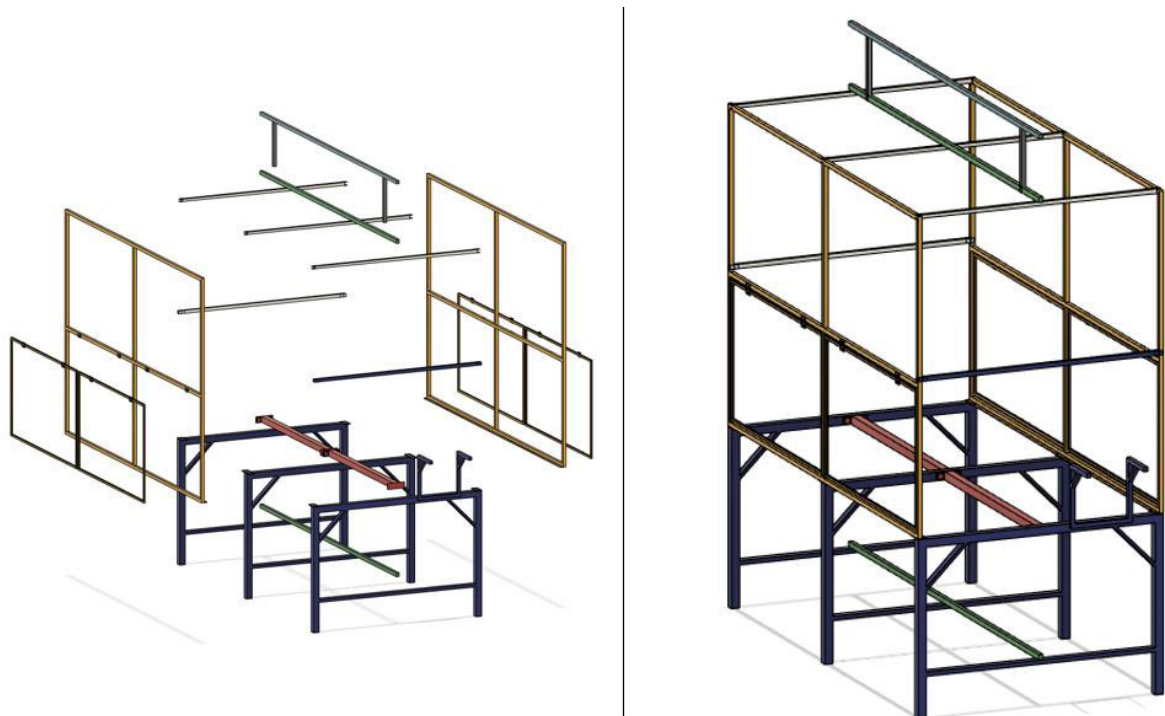


Figura 2.3. Estructura del Módulo

La base donde se coloca la zona de cultivo observada en la Figura 2.4. se implementó usando tablas de madera sujetas por la estructura metálica y recubiertas por plástico para alargar su vida útil y se generó una pendiente que permite llevar el agua drenada de las

plántulas a la esquina posterior derecha del módulo para ser extraída y aprovechada en otros cultivos.



Figura 2.4. Base de Zona de Cultivo

Una vez terminada la estructura se determinó el lugar idóneo para colocar los actuadores dentro del módulo mediante el diseño de soportes metálicos a medida como se observa en la Figura 2.5. Estos soportes permiten sujetar nebulizadores, mangueras, resistencias calefactoras, ventiladores, luminarias y sensores de forma segura y en la ubicación más idónea debido a características técnicas/ funcionales y criterio de expertos.

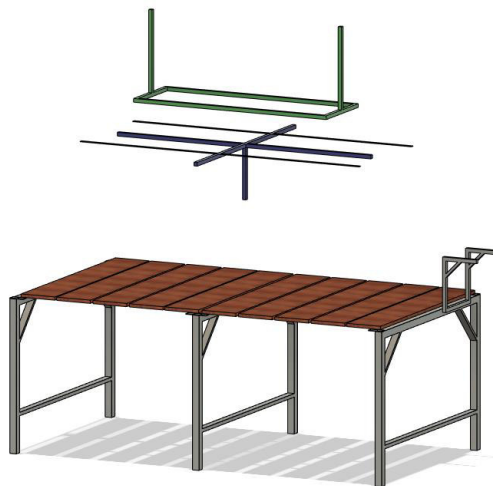


Figura 2.5. Soportes de elementos del Sistema de Control



Figura 2.6. Construcción de Estructura Física

2.1.2.1. Cubierta

El módulo está cubierto por plástico para invernadero que confiere una alta resistencia a la degradación por efecto de la radiación UV solar y beneficios como la capacidad de difusión de luz elevada, la eliminación de sombras dentro del módulo y permite mantener el calor acumulado, que se traduce en mayor crecimiento en las especies producidas.

Adicionalmente, la cubierta aísla parcialmente el microclima generado de las condiciones ambientales externas lo que facilita obtener internamente las condiciones deseadas para la producción de las plántulas. La cubierta implementada se observa en la Figura 2.7



Figura 2.7. Cubierta Plástica

2.2. CONTROL DE VENTILACIÓN FORZADA Y EXTRACCIÓN DE AIRE

El sistema de ventilación forzada y extracción de aire permite reducir la temperatura interior del módulo hasta el equilibrio con la temperatura ambiental, además de reducir la humedad relativa en caso de que se salga de los rangos apropiados para las plántulas. Finalmente permite controlar indirectamente los niveles de CO₂ dentro del módulo durante el día. Para ello utiliza ventiladores axiales con su respectiva lógica de control

La finalidad de este sistema es reemplazar el aire dentro del módulo mediante dos ventiladores axiales ubicados en partes opuestas, uno funcionando como extractor y otro que permita introducir el aire del exterior.

2.2.1. ACTUADORES

2.2.1.1. Ventiladores Axiales

Dentro de los ofertados en el mercado nacional se escogió el Eason VF-N6 de 25W de potencia y un flujo de aire de 250 m³/h debido a sus características eléctricas y tomando en cuenta que el volumen total del módulo es de 4,35 m³. Estos dispositivos permiten renovar el aire del interior aproximadamente 57 veces cada hora lo que se permite la ventilación dentro del módulo. El ventilador se observa en la Figura. 2.8.



Figura 2.8. Ventilador Axial

Fueron colocados en los laterales para facilitar su función de circulación como se observa en la Figura 2.9.

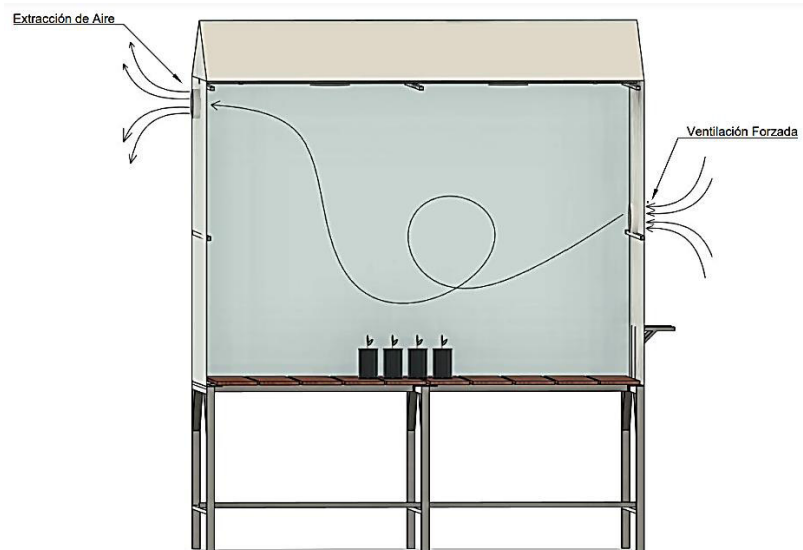


Figura 2.9. Disposición de Ventiladores Axiales

2.3. CONTROL DE TEMPERATURA

El control de la variable temperatura es de suma importancia al momento de acelerar el crecimiento de una plántula. Para el diseño de este sistema se tomó en cuenta las características del módulo, el espacio disponible, rangos de temperatura necesarios, impacto medioambiental.

El espacio disponible es de 4.35 m³

El rango de temperatura necesario para las especies de plántulas con las que va a trabajar el módulo está comprendido entre 15-35 grados centígrados.

Se necesita que el módulo genere un mínimo impacto medioambiental y que el sistema de control no sea excesivamente costoso.

De acuerdo a todas estas consideraciones se determinó que se necesitan elementos de medición y actuación para el manejo de la variable temperatura.

2.3.1. MEDICIÓN DE TEMPERATURA

El sistema de medición es el encargado de cuantificar la variable al interior del módulo. Dada la importancia de esta variable en el crecimiento de las plántulas, este proyecto técnico busca regular la temperatura dentro del módulo en varios momentos/tiempos/espacios del día, con lo que conocer los cambios de la variable física con el menor retraso posible es una característica indispensable del sensor a seleccionar.

Existen muchos sensores de temperatura que pueden medir el rango que se manejará en el proyecto. De entre ellos se escogió un detector de temperatura por resistencia o RTD acoplado a un transmisor de temperatura debido a su linealidad, precisión, fácil integración al sistema y protección para ambientes de alta humedad. Además, como se observa en la Figura 2.10, el sensor escogido es de 3 hilos, lo que permite eliminar el error generado por la resistencia de los conductores.



Figura 2.10. Sensor Pt100

Tabla 2.1. Características del Sensor Pt100

Rango	-50/200 °C
Longitud de Cable	5 m
Hilos	3

2.3.1.1. Transmisor de Temperatura

Se usó un transmisor de temperatura con entrada para RTD Pt100 de 3 hilos, el cual se observa en la Figura 2.11, que entrega en su salida una señal normalizada entre 0 y 10 voltios para el rango de trabajo del sensor.

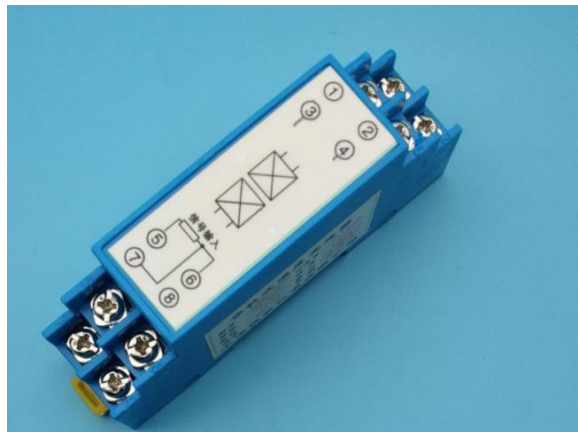


Figura 2.11. Transmisor de Temperatura

Tabla 2.2. Características del Transmisor

Rango	0-100 °C
Señal de Salida	0-10 V
Precisión	0,2%
Alimentación	24 VDC

2.3.2. SISTEMA DE ACTUACIÓN

La temperatura se regula principalmente con un calefactor que permite aumentar la temperatura del módulo y un ventilador que permite distribuir uniformemente el calor dentro

del módulo. El trabajo conjunto con el sistema de ventilación forzada y extracción de aire, posibilita reducir limitadamente la temperatura interior.

2.3.2.1. Calefactor

El calefactor debe ser capaz de calentar el volumen total del módulo de $4,35 \text{ m}^3$ principalmente por las noches ya que es en este periodo de tiempo que se sufre un decaimiento de temperatura. El tamaño del módulo permite implementar un sistema convectivo con el uso de resistencias calefactoras y causa menor impacto al medio ambiente frente a sistemas que usan combustibles a partir de recursos no renovables.

Para los cálculos se tomó en cuenta que el módulo estará ubicado en Malacatos-Loja - Ecuador, que se encuentra a 1470 metros sobre el nivel del mar y tiene una temperatura promedio de 20,6 grados centígrados con una densidad de aire de 0.98 kg/m^3 . [21] [22]

$$\text{densidad aire} = 0,98 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{volumen de aire dentro del módulo} = 4,35 \text{ m}^3$$

$$\text{masa de aire (m)} = 0,98 * 4,35 = 4,26 \text{ kg}$$

$$\text{Calor específico del aire} = 0,24 \frac{\text{cal}}{\text{g} * \text{C}^\circ}$$

$$Q = m * c * \Delta T$$

$$Q = 4260 * 0,24 * (25 - 10)$$

$$Q = 15336 \text{ calorías}$$

$$\text{tiempo de calentamiento (t)} = 4 \text{ min}$$

$$Q = 0,24 * P * t$$

$$15336 = 0,24 * P * (4 * 60)$$

$$P = 266,25 \text{ W}$$

Tomando en cuenta la potencia necesaria para calentar el volumen total del módulo, se escogió utilizar un arreglo de 3 resistencias de níquelina de 55v, 350 W.

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(55)^2}{350W} = 8,64 \text{ ohmios}$$

$$R_{Total} = 8,64 * 3 = 25,92 \text{ ohmios}$$

$$Potencia\ total = \frac{(Voltaje\ Red\ eléctrica)}{R_{Total}} = \frac{(120)^2}{25,92} = 555,37\ W$$

La potencia total conseguida con el arreglo de resistencias en serie cumple con ser mayor a la necesaria para elevar la temperatura ambiental dentro del módulo, permitiendo compensar las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación que existe en el módulo, al mismo tiempo que aumenta la vida útil de las resistencias calefactoras ya que no trabajan al 100%. Las resistencias calefactoras de niquelina utilizadas se encuentran en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Resistencias Calefactoras

2.3.2.2. Ventilador

El ventilador utilizado es de marca Eason de 120 VAC, de 15 watts y permite mover un flujo de aire de 70m³ por hora, repartiendo el calor uniformemente dentro del módulo. El ventilador interno utilizado se observa en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Ventilador Interno

2.3.2.3. Ubicación de los elementos finales de control

Los elementos finales de control se utilizan para elevar uniformemente la temperatura dentro del módulo, para su colocación se fabricó un soporte metálico a medida, el cual soporta las tres resistencias calefactoras con una separación de 30cm entre las mismas. Además, se colocó el ventilador en el centro de la parte superior para forzar al aire caliente a descender. La disposición del ventilador, resistencias y flujo de aire se observa en la Figura 2.14. Disposición de Ventilador y Resistencias Calefactoras

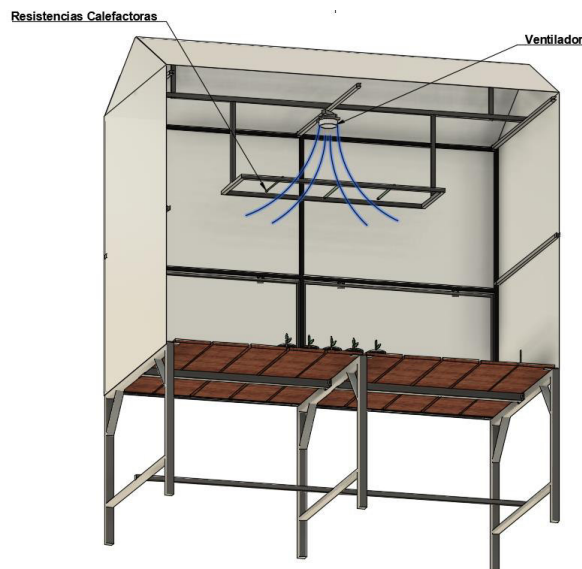


Figura 2.14. Disposición de Ventilador y Resistencias Calefactoras

2.3.3. DIMENSIONAMIENTO DE ACCIONADORES

Para el dimensionamiento de los accionadores se tomó en cuenta la corriente que va a circular por cada uno de los dispositivos. La fórmula considera un sistema monofásico a 2 hilos (Fase + Neutro), y un factor de potencia de 0.9 para los ventiladores axiales, y 1 para las resistencias calefactoras

$$I = \frac{P}{V \times fp}$$

Donde

I: Es la corriente consumida

P : Potencia Activa [W]

fp : Factor de Potencia

Tabla 2.3. Corriente consumida

Dispositivo	Potencia de Consumo	Corriente
Resistencias Calefactoras	555.37 W	4,63 A
Extractor de Aire / Ventilación Forzada	50 W	0.46 A
Ventilador	15	0.14 A

2.3.3.1. SSR

Tomando en cuenta la corriente consumida por las resistencias calefactoras y las necesidades de altas frecuencias de conmutación se escogió el SSR (Relé de estado Solido) MS-1DA4825 de la marca Maxwell, el cual cuenta con función de cruce por cero, led indicador de operación, rápida respuesta y alta robustez. El dispositivo se observa en la Figura 2.15 y las especificaciones en la Tabla 2.4.



Figura. 2.15. Relé de Estado Solido

Tabla 2.4. Especificaciones del Relé de Estado Solido

Corriente Nominal de Carga	25 A
Voltaje de Control	3-32 Vdc
Tiempo On-Off	≤ 10ms
Voltaje de Carga	24-48 Vac

El Relé de estado solido se colocó sobre el disipador de aluminio que se observa en la Figura 2.16 y se lo escogió escogio tomando en cuenta que la corriente maxima que va a circular es de 4.63 A, que la carga es puramente resistiva y que el fabricante recomienda el uso para dispositivos SSR entre 10-40 A.



Figura 2.16. Disipador SSR

2.4. CONTROL DE HUMEDAD SUELO

El agua es de vital importancia para el crecimiento y desarrollo de las plántulas y, durante su crecimiento son más delicadas a déficit y excesos de las mismas. El sistema de control de humedad suelo tiene por finalidad el dotar de agua a todas las plántulas. Para su diseño se consideró los siguientes aspectos:

- Capacidad máxima del módulo: 800 plántulas
- Zonas de cultivo: A, B
- Emisiones de riego: Nebulizadores y Micro aspersores
- Fuente de agua disponible: Red de agua potable
- Altura máxima de las plántulas: 70 cm
- Cantidad de humedad necesaria en el suelo: 15-50%

2.4.1. MEDICIÓN HUMEDAD SUELO

Este sistema está encargado de medir el contenido de agua en el sustrato donde se encuentran las plántulas. En el presente proyecto técnico se implementó dos sistemas de control de riego, temporizado y por demanda. El control automatizado de riego por demanda necesita medir la humedad suelo en tiempo real, para lo cual se utilizaron transmisores de humedad de suelo.

Se escogió el transmisor de humedad suelo MS10 debido a su alta precisión, robustez, señal de salida normalizada (0-10v) y fácil integración al sistema de adquisición de datos. Este transmisor permite conocer el contenido de humedad volumétrico en el suelo mediante la medición de la constante dieléctrica. Además, está diseñado para aplicaciones similares en invernaderos y no necesita calibración. El transmisor de humedad suelo utilizado se observa en la Figura 2.17.



Figura 2.17. Transmisor de Humedad Suelo

Tabla. 2.5. Características del Transmisor de Temperatura

Rango	0-100 % Contenido de Humedad Volumétrica
Precisión	0-53% de $\pm 3\%$ 53-100% de $\pm 5\%$
Protección	IP68
Material de la Sonda	Acero Inoxidable
Temperatura de Operación	-40 / 85 °C
Señal de Salida	0-10

2.4.2. EMISORES DE AGUA

La humedad del suelo se regula con el aporte de agua, es decir con un sistema de riego. El sistema de riego está diseñado para regar las plántulas uniformemente en cada zona de cultivo. Por ello se han definido dos zonas de riego: Zona A y Zona B, en cada una de las cuales se puede colocar diferentes especies de plántulas con tamaños de fundas y necesidades de agua distintas.

Debido a que las plántulas pasan por diferentes etapas y en cada una de ellas necesita diferente cantidad de agua se colocó un sistema intercambiable en los terminales de riego.

Para la fase de establecimiento, donde la semilla está recientemente colocada en el sustrato se utilizan nebulizadores, debido a que proporcionan un tamaño de gota promedio de 65 micras lo que permite aumentar la humedad del suelo de manera uniforme y sin compactar el sustrato.

Para las fases de crecimiento rápido y endurecimiento se usan micro aspersores los que facilitan el riego al trabajar con un tamaño de gota promedio es de 150 micras lo que es adecuado para las plántulas en estos ciclos de crecimiento de acuerdo al criterio de los ingenieros agrónomos, expertos en el tema.

2.4.2.1. Nebulizadores

Los nebulizadores escogidos son de la marca Fogger, desmontables, con válvula antigoteo y de un solo emisor. Este dispositivo visto en la Figura 2.18, está recomendado para el uso en semilleros y para microclimas generados en invernaderos con calefacción donde el aire es seco y se necesita a más de regar aumentar la humedad relativa.



Figura 2.18. Nebulizador

Tabla 2.6. Características del Nebulizador

Tamaño promedio de gotas	65 micras
Rango de Presión	3-5 bar
Caudal	7,5 l/h
Diámetro de aspersión	1 metro

2.4.2.2. Micro Aspersores

Los micro aspersores escogidos son de marca Irritec y se observan en la Figura 2.19, son recomendados para riego en áreas pequeñas, además tienen una estructura sólida para condiciones de uso rígidas y de funcionamiento estático, es decir, no tienen partes móviles. El riego se da con gotas de 150 micras de diámetro sin nebulización, es decir, aumenta en menor medida la humedad relativa que los nebulizadores.



Figura 2.19. Micro Aspersor

Tabla 2.7. Características del Micro aspersor

Tamaño promedio de gotas	150 micras
Rango de Presión	1,5-5 bar
Caudal	12 l/h
Diámetro de aspersión	2 metro

2.4.2.3. Ubicación de emisores de agua

En la 2.20 se observa la ubicación de los emisores de agua; se colocaron en total 8 actuadores distribuidos uniformemente, 4 por cada zona de riego. Su ubicación se escogió tomando en cuenta las dimensiones de la zona de cultivos y la necesidad de generar un riego uniforme en las plántulas.

El sistema está diseñado para cambiar fácilmente entre Nebulizadores y Micro aspersores, para ello se usó emisores de agua con el mismo acople plástico a la manguera de 12mm de riego utilizada para la conexión a la salida del arreglo de válvulas implementado.



Figura 2.20. Disposición de Emisores de Agua

La distancia entre los emisores de agua es de 41cm, esto se determinó mediante las pruebas realizadas y considerando que la presión del agua es poco variable a lo largo del día.

2.4.3. VÁLVULAS

2.4.3.1. Válvulas Manuales

Las válvulas manuales observadas en la Figura 2.21, son de bola con $\frac{1}{4}$ de vuelta plásticas, necesitan poco mantenimiento, se usan para permitir o cortar el flujo de agua a todo el módulo y para regar en caso de fallas en válvulas de control o falta de suministro eléctrico.



Figura 2.21. Válvula de Bola

2.4.3.2. Válvulas de Control

La válvula de control se utiliza para dejar pasar el fluido que va desde la alimentación de agua de la red eléctrica hasta los emisores de agua utilizados para el riego de las plántulas o impedir su paso. La cantidad de flujo máxima a controlar es de 96 l/h

Para la elección se tomó en cuenta el tipo de válvula, el caudal, el tipo de fluido, la presión, el CV (coeficiente de flujo de válvula) y el aspecto económico.

El fluido que va a circular por la válvula es agua a temperatura ambiental con la presión disponible en la red de agua potable. El cálculo del CV está realizado tomando en cuenta una caída de presión y un caudal acorde a la necesidad de los emisores de agua (Nebulizador/ Micro aspersor) que es de 5 bar.

La presión de agua disponible en la red de agua fue medida con un manómetro acoplado mediante tubería de presión PVC de ½ pulgada como se puede ver en la Figura 2.22.
Manómetro acoplado



Figura 2.22. Manómetro acoplado

Se observó que se mantenía constante a lo largo del día con una presión de 90 psi / 6,2 bar, aunque se producen perturbaciones al utilizar el agua de la red en otros lugares del sector.

El caudal máximo se calculó tomando en cuenta el necesario para el funcionamiento de los micro aspersores multiplicado por el número de dispositivos colocados en el módulo, que en este caso son 8.

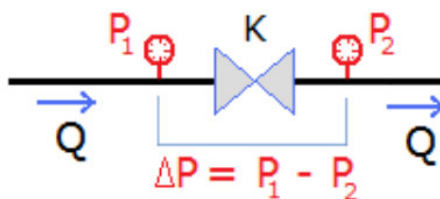


Figura 2.23. Diferencia de Presión en una válvula

$$C_v = Q \sqrt{\frac{\delta}{\Delta P}}$$

$P_1 = 90 \text{ psi}$ (Presión de la red de agua potable)

$P_2 = 5 \text{ bar} = 72,5 \text{ psi}$ (Presión para funcionamiento óptimo de emisores)

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 90 - 72,5 = 17,5 \text{ psi}$$

$$\delta = 1 \text{ (Agua)}$$

$$Q = 96 \text{ l/h} = 0,352 \text{ gpm (Caudal máximo)}$$

$$C_v = 0,352 \sqrt{\frac{1}{17,5}} = 0,08$$

Tomando en cuenta el coeficiente de flujo obtenido se escoge la válvula con un $C_v > 0.16$ y que soporte presiones mayores a $1.25 \times 90 = 112.5$ psi

Las válvulas de control utilizadas en el proyecto son válvulas solenoides modelo 2W-160-15, se observan en la Figura 2.24.



Figura 2.24. Válvula Solenoide

Tabla 2.8. Características de Válvulas Solenoides

Medio de Trabajo	Aire, Agua, Aceite, Gas
Tipo de Operación	Directa
Estado	Normalmente Cerrada
CV	4,8
Tamaño de Tubería	½ Pulgada
Presión de Operación	0-142 psi
Temperatura de Operación	-5 / 80 °C
Voltaje de Alimentación	24 VDC
Potencia de Bobina	14

2.4.3.3. Arreglo de Válvulas

El arreglo implementado cuenta con 3 válvulas manuales de globo de ¼ de vuelta y dos válvulas solenoides. Está diseñado para que se activen los dos circuitos de riego manualmente en caso de fallo en las válvulas o cortes de energía continuos en el módulo, por ello se han colocado las válvulas manuales y de control en paralelo como se observa en la Figura 2.25.

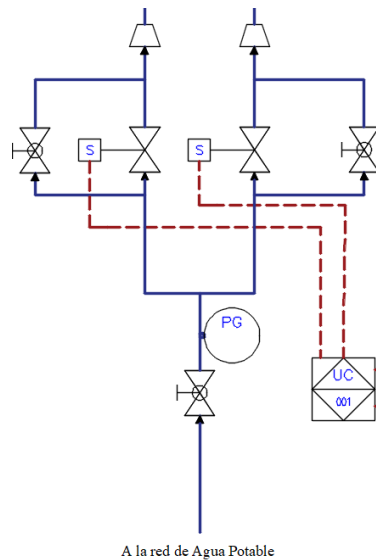


Figura 2.25. Arreglo de Válvulas

2.5. CONTROL DE HUMEDAD

La humedad relativa en rangos apropiados disminuye el estrés por falta de agua permitiendo incrementar la tasa fotosintética y mejorar el crecimiento y desarrollo de las plántulas, al mismo tiempo que reduce la posibilidad de crecimiento de hongos desfavorables.

La humedad relativa dentro del módulo es una variable física difícil de controlar, debido a que está fuertemente acoplada con otras variables, por ejemplo, aumenta con el riego y disminuye al elevar la temperatura, por ello al tomar en cuenta la influencia de la temperatura, riego y ventilación dentro del módulo, esta variable se controla indirectamente haciendo uso de todos los sistemas de control descritos anteriormente, principalmente del sistema de ventilación y extracción de aire.

2.5.1. MEDICIÓN DE HUMEDAD AMBIENTAL

Para medir la humedad ambiental dentro del invernadero se usó un transmisor el cual incluye la etapa de sensado y se observa en la Figura 2.26. Este dispositivo usa una sonda digital de alta sensibilidad con señal estable y alta precisión, y fue escogido tomando en cuenta el rango de medición necesario (de 0 a 100%), buena linealidad, sonda a prueba de agua, fácil instalación y aspectos económicos. Además, este transmisor cuenta con una pantalla donde se observa la temperatura y humedad relativa medida.



Figura 2.26. Transmisor de Humedad y Temperatura Ambiental

Este equipo también permite adquirir la temperatura ambiental dentro del módulo, sin embargo, no se utilizó esta señal en el sistema de adquisición de datos debido a su elevado tiempo de respuesta (15 segundos) que perjudicaría al momento de mantener una temperatura estable. El tiempo de respuesta de la humedad ambiental es menor ($\leq 8s$) y permite realizar el control correctamente. Las características se describen en la tabla 2.9.

Tabla. 2.9. Características del Transmisor de Humedad y Temperatura Ambiental

Rango Humedad Relativa	0-100 %
Rango Temperatura	-40 a 80 °C
Precisión Humedad	$\pm 3\%$ HR (60%HR, 25 °C)
Precisión Temperatura	$\pm 0,5$ °C (25 °C)
Protección de Sonda	IP68
Temperatura de Operación de Sonda	-40 / 120 °C
Señal de Salida	4-20mA
Tiempo de respuesta Humedad	$\leq 8s$
Tiempo de Respuesta Temperatura	$\leq 15 s$
Tiempo de Actualización	1s

2.6. CONTROL DE ILUMINACIÓN

La cantidad (intensidad / fotoperiodo) y la calidad (composición espectral) de la luz afectan al crecimiento y la fisiología de las plantas, es decir al aumentar las horas de luz por las noches en las fases de crecimiento rápido y endurecimiento de la plántula se acelera el crecimiento.

Este sistema, a diferencia de los anteriores no cuenta con la realimentación de un sensor, sino que usa un reloj sincronizado que tomando en cuenta la lógica de control que define el momento en donde se tiene que encender la iluminación artificial, es decir se realiza un control temporizado.

2.6.1. ACTUADORES

2.6.1.1. Luminarias

La iluminación artificial dentro del módulo es producida por las luminarias Led de marca Sylvania, se escogió este tipo de luminaria por su eficiencia de $43 \frac{lm}{W}$, ángulo de 120 y flujo luminoso de 130 lm.



Figura 2.27. Luminarias Led

Tabla. 2.10. Características de Luminarias Led

Potencia	3 w
Flujo Luminoso	130 lm
Temperatura de color	6500 k
IRC	70
IP	20

2.6.1.2. Disposición de Luminarias

Se colocaron dos luminarias en la parte superior del módulo centradas para cada una de las zonas como se observa en la 2.28. Esta ubicación evita que las luminarias estén expuestas a humedades altas.



Figura 2.28. Ubicación de Luminarias

2.7. ADQUISICIÓN DE DATOS, ALARMAS DEL SISTEMA Y CONTROL EN LINEA

El presente proyecto técnico busca controlar las variables físicas dentro del módulo y guardar los datos de las mismas para generar históricos que permitan un posterior análisis. Para ello se ha implementado un sistema de control en línea y adquisición de datos que se acople a las necesidades del proyecto.

El control en línea permite reaccionar ante perturbaciones con rapidez, mientras que la adquisición de datos permite registrar las variables físicas, proporcionar datos en tiempo real y guardar los datos en una memoria no volátil. [23]

El sistema de adquisición de datos toma los datos de las variables: temperatura, Humedad Ambiental, Humedad Suelo a través de los sensores y trasmisores y los envía al Controlador Multivariable y Adquisidor de Datos Siemens Logo 24 CE que se describe a continuación.

2.7.1. CONTROLADOR

El dispositivo escogido como controlador es el SIEMENS LOGO 24 CE, que se observa en la Figura 2.29; es un módulo lógico inteligente que permite controlar salidas en función de la lógica de control implementada y fue escogido tomando en cuenta su robustez, fácil programación, interfaz de comunicación, salida tipo transistor y el hecho de que incorpora un servidor web.



Figura 2.29. El controlador

Tabla. 2.11. Características del Controlador

Voltaje de Alimentación	24 v
Entradas	8 digitales, 4 pueden usarse en modo análogo (0-10v)
Salidas	4 transistor

Este dispositivo cuenta con 8 entradas digitales de las cuales 4 se pueden usar en modo análogo, esto permite conectar las señales normalizadas (0-10v) de las salidas de los transmisores de temperatura ambiental, humedad relativa y humedad suelo. Además, dispone de 4 salidas tipo transistor a 24 voltios DC con 0.3 A máximos de corriente, este tipo de salida tiene la ventaja de no presentar ningún tipo de desgaste mecánico apreciable, además que permite una alta frecuencia de conmutaciones. La salida tipo transistor ofrece la capacidad de implementar controladores PID, donde el número de conmutaciones es elevado.

2.7.1.1. Dimensionamiento del Controlador

Para el dimensionamiento del controlador se tomaron en cuenta el número de entradas y salidas necesarias, las cuales se describen en las Tablas 2.12 y 2.13.

Tomando en cuenta que se necesitan 4 entradas analógicas, 6 entradas digitales y 8 salidas digitales se adicionó un módulo de expansión Siemens DM8 24R que se observa en la Figura 2.30, el cual cuenta con 4 entradas digitales y 4 salidas tipo relé.



Figura. 2.30. Módulo de expansión Siemens DM 24R

Tabla. 2.12. Señales de Entrada

Variable	Tipo de Entrada	Dispositivo	Bornes Entrada Logo
Temperatura Ambiental	Analógica (0-10v)	Transmisor de Temperatura	I1
Humedad Ambiental	Analógica (2-10v)	Transmisor de Humedad Ambiental	I2
Activar Humedad	Digital	Selector 2 Posiciones (SF3)	I3
Activar Riego por Demanda	Digital	Selector 3 posiciones (SH2-1)	I4
Activar Riego Temporizado	Digital	Selector 3 posiciones (SH2-1)	I5
Activar Iluminación Temporizado	Digital	Selector 3 posiciones (SH1-1)	I6
Humedad Suelo A	Analógica (0-10v)	Transmisor humedad Suelo A	I7
Humedad Suelo B	Analógica (0-10v)	Transmisor humedad Suelo B	I8
Activar Iluminación	Digital	Selector 3 posiciones (SH1-1)	I9
Activar Temperatura Controlado	Digital	Selector 2 Posiciones (SF2)	I10

Tabla. 2.13. Señales de Salida

Dispositivo	Tipo de Salida	Accionadores	Bornes Salida Logo
Resistencias Calefactoras	Digital / Transistor	SSR	Q1 (LOGO)
Luz Piloto Verde	Digital / Transistor	-	Q2 (LOGO)
Luz Piloto Roja	Digital / Transistor	-	Q3 (LOGO)
Extractor de Aire / Ventilación Forzada	Digital / Transistor	Relé	Q4 (LOGO)
Luminarias	Digital / Relé	Relé	Q1 (DM 24R)

Ventilador	Digital / Relé	Relé	Q2 (DM 24R)
Válvula Solenoide Zona B	Digital / Relé	Bobina Solenoide	Q3 (DM 24R)
Válvula Solenoide Zona A	Digital / Relé	Bobina Solenoide	Q4 (DM 24R)

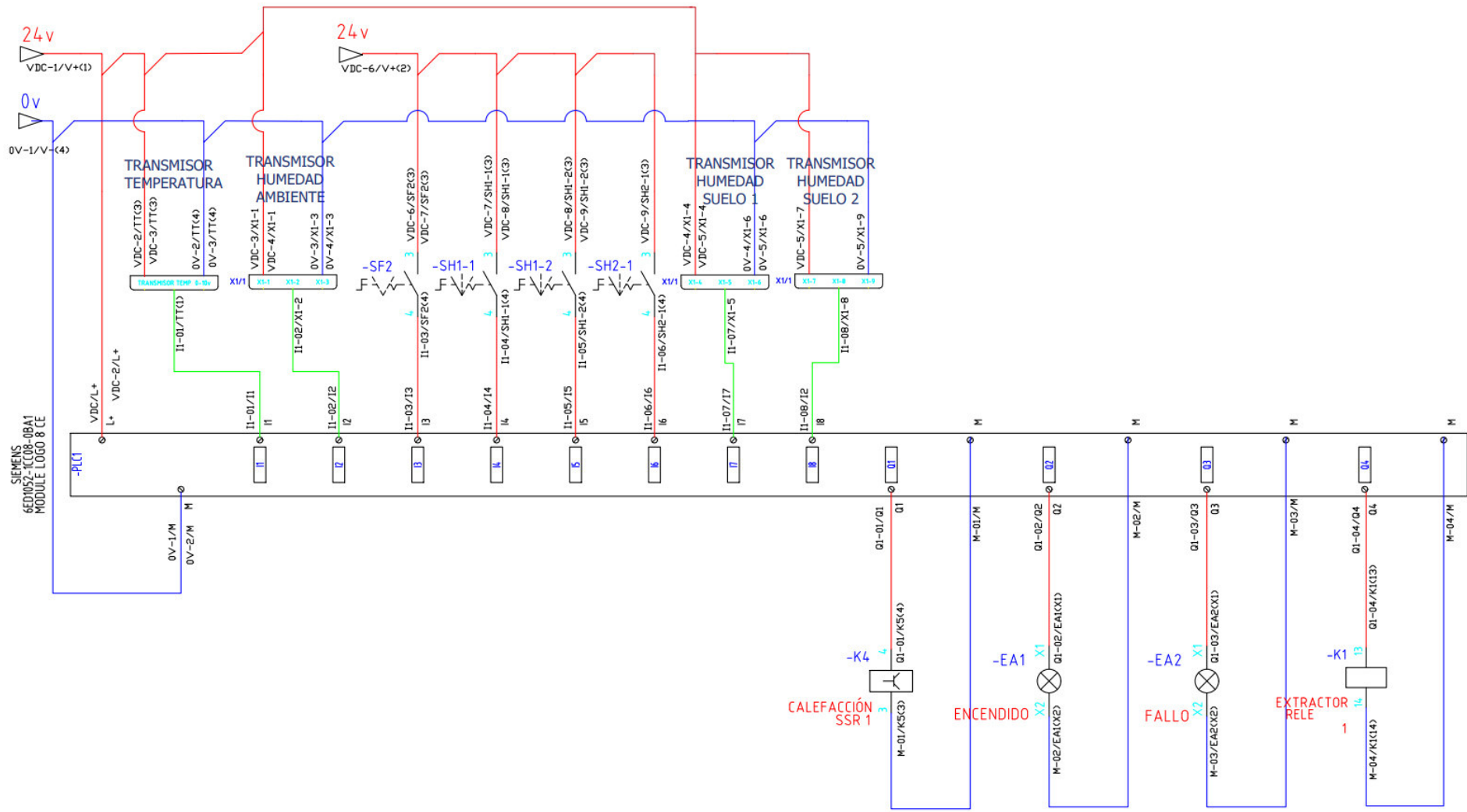


Figura. 2.31. Diagrama de Conexiones-Logo Siemens 8

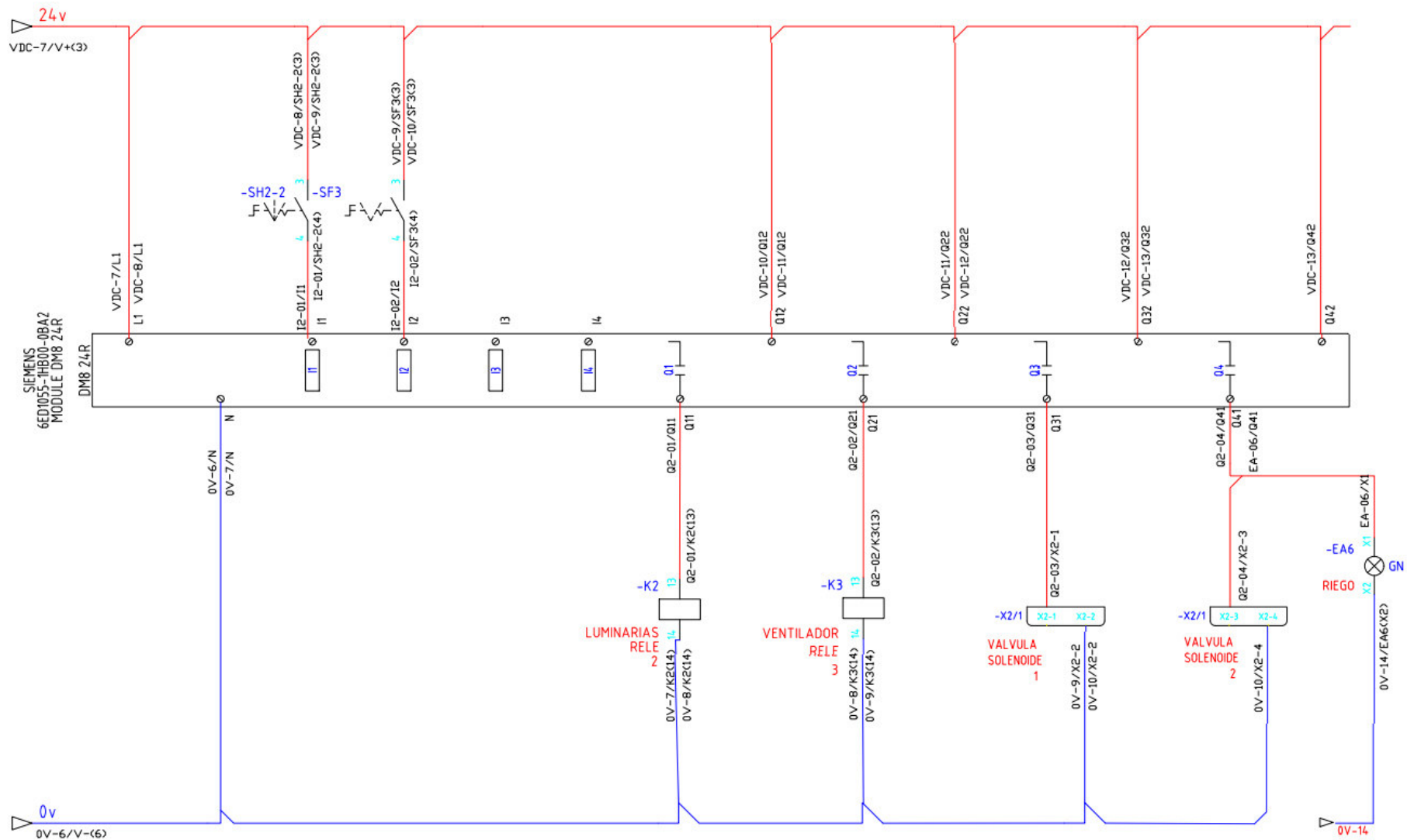


Figura 2.32. Diagrama de Conexiones-Modulo de Expansión DM24R

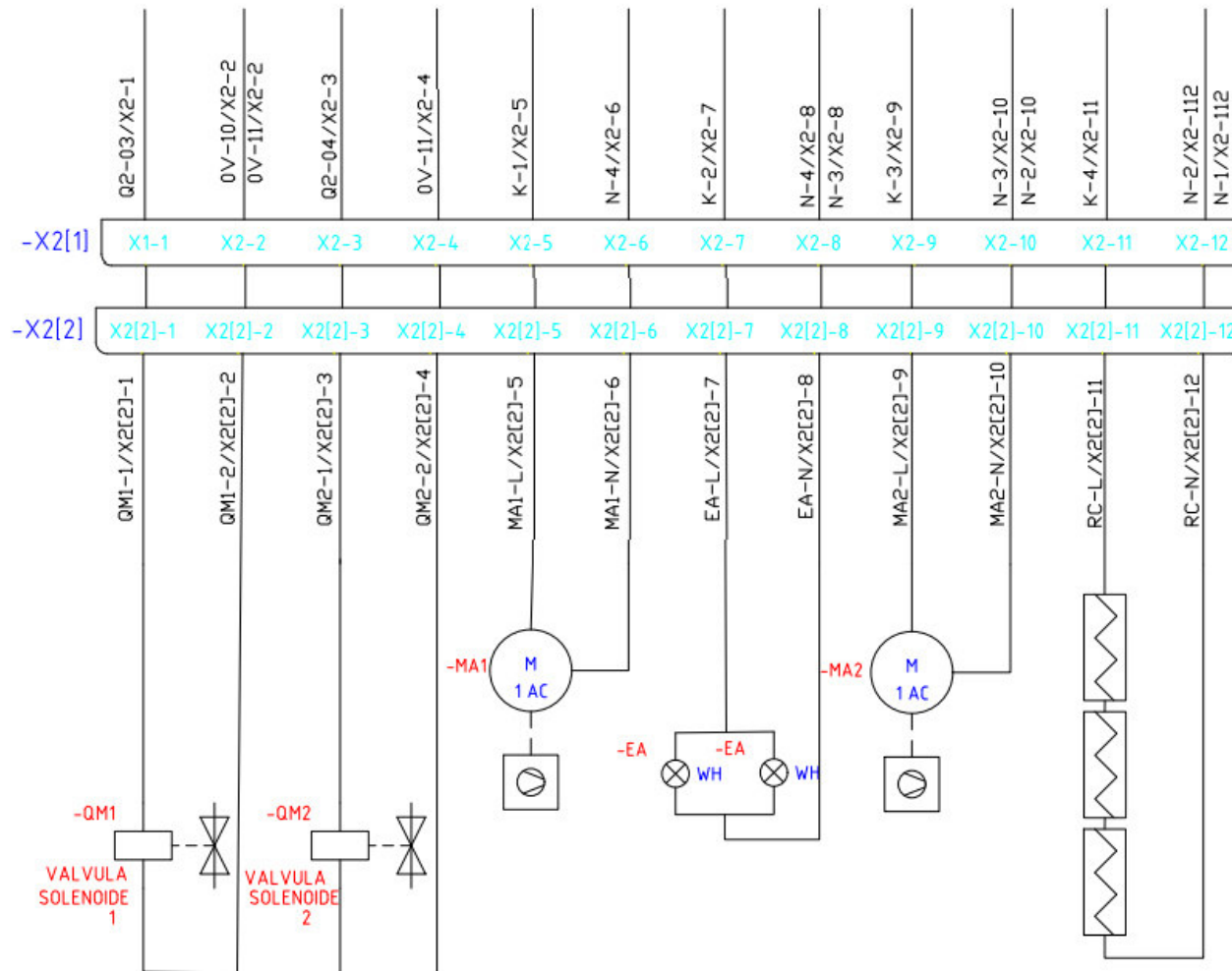


Figura 2.33. Diagrama de Conexiones Actuadores

2.7.2. ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos en este proyecto es esencial para la prueba del producto final, debido a que permite observar los cambios en las variables físicas y realimentar los lazos de control.

Como se mencionó anteriormente el controlador Logo 24 CE cuenta con cuatro entradas análogas de 0-10v y realiza un proceso para convertir la señal eléctrica en digital dentro de un valor comprendido entre 0 y 1000 a través de su conversor análogo digital.

El dato digital es el que posteriormente se usa para conocer el valor transmitido de las variables análogas y permite generar gráficos e históricos de los datos adquiridos.

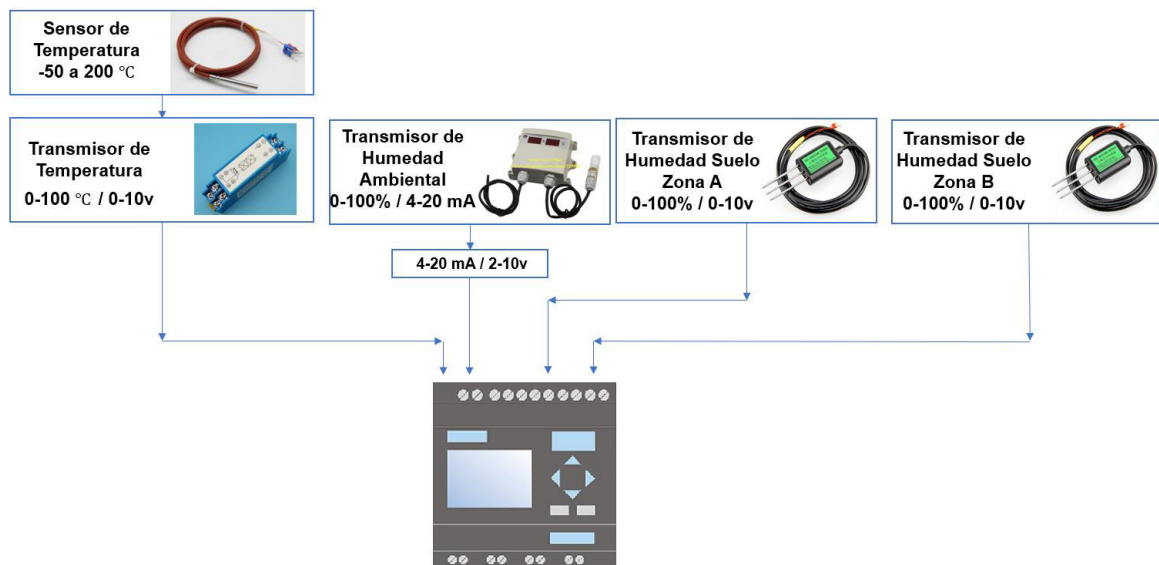


Figura 2.34. Elementos del sistema de Adquisición de Datos

Los elementos que contiene el sistema de adquisición de datos se observan en la Figura 2.34. Elementos del sistema de Adquisición de Datos La temperatura ambiental, la humedad ambiental y la humedad suelo de la Zona A/B son las cuatro variables físicas que se miden dentro del módulo y cada una de ellas se describe a continuación.

2.7.2.1. Adquisición de Temperatura Ambiental

Para ingresar el dato de temperatura ambiental se usó un transmisor que entrega una señal normalizada de 0-10v, correspondiente a una medida de temperatura entre 0 y 100 grados centígrados. El grafico que relaciona la señal de voltaje respecto a la temperatura medida se muestra en la Figura 2.35.

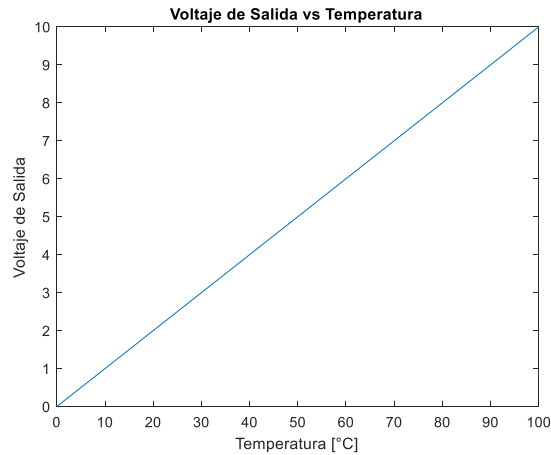


Figura 2.35. Voltaje de Salida en Función de la Temperatura

La señal eléctrica de voltaje se ingresa mediante el puerto análogo al controlador Logo Siemens, donde se realiza el proceso de conversión analógica-digital que permite obtener datos entre 0 – 1000.

Para poder conocer el dato de la temperatura a partir del valor digital se realizan operaciones aritméticas, con las cuales se genera la gráfica que se observa en la Figura 2.36. Temperatura Adquirida vs Valor Digital La capacidad del controlador permite adquirir la señal de temperatura con un decimal.

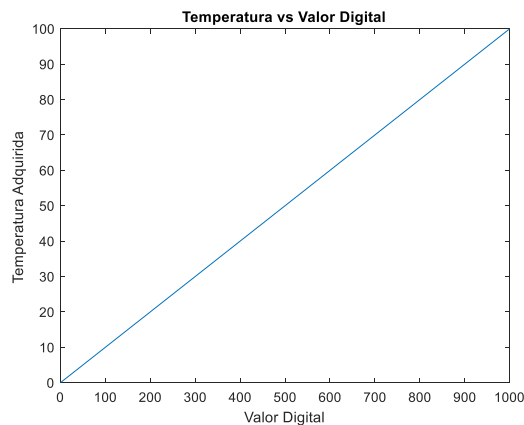


Figura 2.36. Temperatura Adquirida vs Valor Digital

2.7.2.2. Adquisición de Humedad Ambiental

El transmisor escogido tiene una salida normalizada de 4-20mA, mientras que los puertos análogos del controlador admiten señales comprendidas entre 0-10v, es por ello que se implementó una etapa que permita transformar la señal de corriente en una de voltaje entre 2 y 10 voltios como se observa en la Figura 2.37.

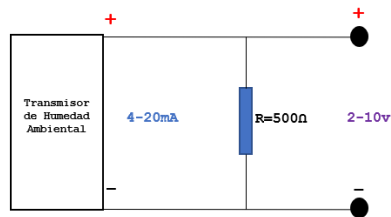


Figura 6.37. Conversor 4-20mA a 2-10v

Para realizar la conversión se colocó un potenciómetro ajustable de precisión, el cual está calibrado en 500 ohmios.

Al ingresar la señal eléctrica entre 2-10v los valores digitales en el controlador estarán comprendidos entre 200 y 1000, por lo que, para obtener el valor medido de humedad ambiental se realizaron operaciones aritméticas de acuerdo a la ecuación indicada a continuación. La Figura 2.38, describe la curva de acondicionamiento implementada.

$$\text{Humedad Adquirida} = 0,125 (\text{Valor Digital}) - 25$$

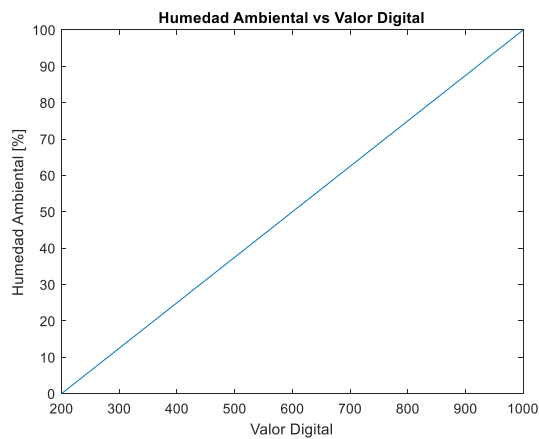


Figura 2.38. Humedad Ambiental vs Valor Digital

2.7.2.3. Adquisición de Humedad Suelo

El transmisor de humedad suelo tiene una señal de salida de 0-10v, por lo que al igual que en la temperatura el valor digital estará comprendido entre 0 – 1000, además, se podrá adquirir la señal de humedad suelo con un decimal. En la Figura 2.39. se observa la relación entre la humedad suelo y el valor digital.

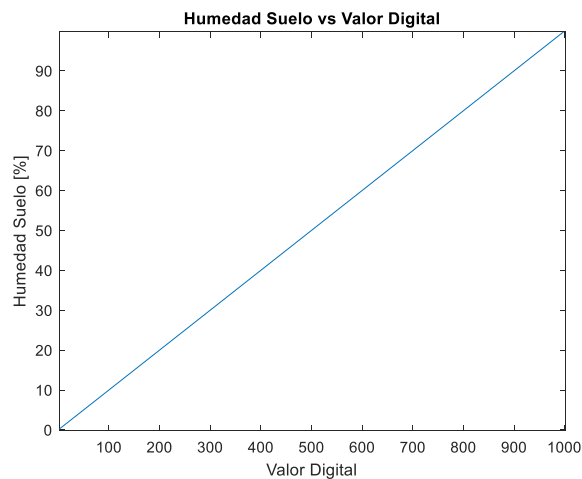


Figura 2.39. Humedad Suelo vs Valor Digital

2.7.3. ALARMAS DEL SISTEMA

Considerando que se pueden producir fallos en los sensores por falta de mantenimiento o por uso inadecuado de los mismo, se ha implementado un sistema de detección en función de los datos adquiridos que permite emitir alarmas y condicionar el funcionamiento de los

sistemas de control implementados dentro del módulo. También se han configurado comparadores entre las variables adquiridas con valores que ponen en riesgo la vida de las plántulas y que emiten alarmas de rangos peligrosos.

2.7.3.1. Alarmas de Fallo en los Sensores y Transmisores.

Para identificar un fallo en los trasmisores se tomaron en cuenta rangos en los datos adquiridos que son poco comunes dentro de esta aplicación o imposibles de obtenerse si los sensores y transmisores están funcionando correctamente. En la Tabla 2.14 se observan las alarmas, los rangos inadecuados y las posibles causas.

Tabla 2.14. Alarmas de Fallo en Sensores y Transmisores

Variable Física	Rango Inadecuado	Alarma	Causa
Temperatura Ambiental	< 3 °C y > 80 °C	Fallo Sensor de Temperatura Ambiental	Falla en la conexión, Sensor Pt 100 defectuoso, Transmisor Temperatura Defectuoso
Humedad Ambiental	< 1 % HR	Fallo Transmisor de Humedad Ambiental	Falla en la conexión, Transmisor de Humedad Ambiental Defectuoso
Humedad Suelo A	<1%	Fallo Transmisor de Humedad Suelo A	Falla en la conexión, Transmisor de Humedad Suelo Defectuoso, Instrumento mal colocado
Humedad Suelo B	<1%	Fallo Transmisor de Humedad Suelo B	Falla en la conexión, Transmisor de Humedad Suelo Defectuoso, Instrumento mal colocado

En la Figura 2.40 se observa el diagrama de flujo que se sigue para determinar fallos en los sensores, las alarmas se activan por comparaciones entre las variables adquiridas y

variables fijas que corresponden a los rangos inadecuados o imposibles de darse dentro del módulo.

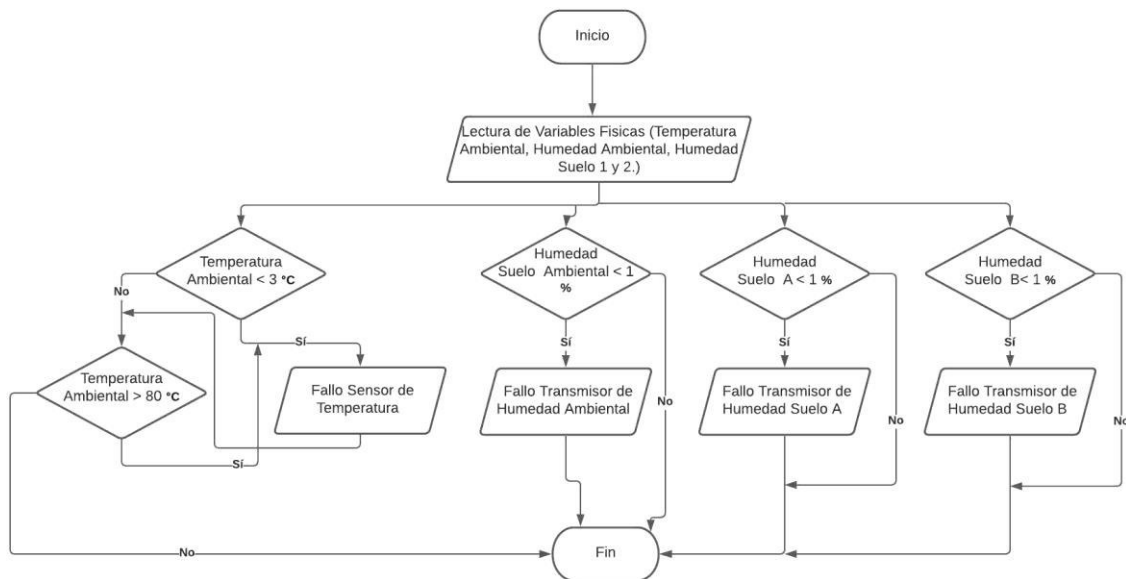


Figura 2.40. Diagrama de Flujo Fallos en los Sensores y Transmisores

2.7.3.2. Alarmas de Rangos Peligrosos

Los rangos peligrosos en las plantas producen un efecto desfavorable que puede generar un retraso en el crecimiento de las plántulas o incluso la pérdida del cultivo. Las variables se pueden salir de rangos seguros por múltiples causas, que comprenden factores ambientales, fallas en los actuadores o fallas en la estructura del módulo, en Tabla 2.15 se describe las causas y el efecto en las plántulas. [24] [25]

Tabla 2.15. Alarmas de Rangos Peligrosos

Variable Física	Rango Peligroso	Alarma	Causa	Efecto en Plántulas
Temperatura Ambiental	> 40 °C	Temperatura Ambiental Alta	Exceso de radiación solar durante el día, Falla en SSR (Resistencias ON). Valores de Referencia Erróneos.	Estrés Vegetal, Quemaduras en Hojas y brotes, Inhibición de brotes y crecimiento radicular

Humedad Ambiental	<20 % HR	Humedad Ambiental Baja	Temperatura Alta, Exceso de Calefacción Valores de Referencia Erróneos.	Sobreesfuerzo para mantener estomas abiertos, deshidratación.
	>95% HR	Humedad Ambiental Alta	Exceso de Riego, Lluvia exterior al Módulo Valores de Referencia Erróneos.	Reducción de transpiración, disminución de absorción de nutrientes, afección al crecimiento, facilidad para propagación de plagas y enfermedades
Humedad Suelo Zona A/B	<15%	Humedad Suelo Baja A/B	Corte continuo de suministro de agua, falla en válvulas solenoides, falla en emisores de agua. Valores de Referencia Erróneos.	Falta de hidratación, ausencia de nuevos brotes, languidez y amarilleamiento generalizado.
	>70%	Humedad Suelo Alta A/B	Falla en válvulas solenoides, Valores de Referencia Erróneos.	Asfixia radicular. Facilidad de propagación de hongos en las raíces, pudrición de la plántula

Para evitar que se produzcan los efectos descritos en la tabla anterior, por mantener en rangos inadecuados las variables físicas por largos periodos de tiempo, se ha implementado el sistema que emite las alarmas a la interfaz HMI y proporciona indicadores visuales para que el encargado de las plántulas realice las acciones pertinentes dependiendo de la alarma.

En el diagrama de la Figura 2.41. se observan las comparaciones realizadas para determinar rangos peligrosos para las plántulas.

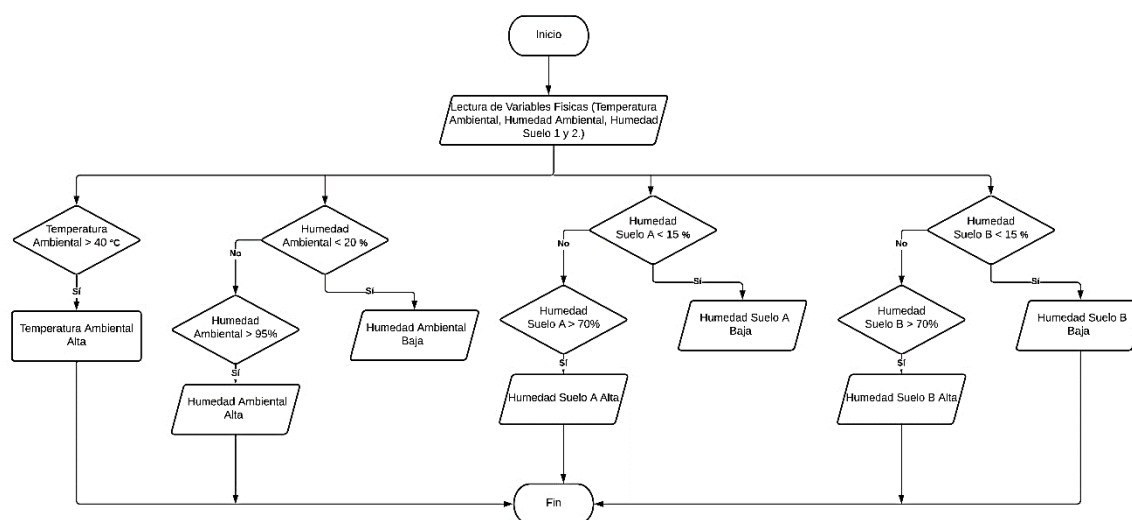


Figura 2.41. Diagrama de Flujo de Alarmas de Rangos Peligrosos

En el diagrama de la Figura 2.41 se observan las comparaciones realizadas para la activación de las alarmas, los rangos inadecuados para las plántulas no son configurables desde el HMI.

2.7.4. CONTROL EN LÍNEA

Como se mencionó anteriormente, para acelerar el crecimiento de las plántulas se necesita que la humedad ambiental, temperatura ambiental y humedad suelo se encuentren en rangos adecuados. Por ello se implementaron controladores en lazo cerrado que permitan compensar perturbaciones en función de valores referenciales ingresados desde el HMI o desde la interfaz visual del controlador.

Los sistemas están diseñados para funcionar de forma independiente, es decir que se pueden activar o desactivar tomando en cuenta las necesidades de las plántulas dependiendo del estado en el que se encuentran. Por ejemplo, para plántulas en proceso de germinación sin hojas verdaderas no se necesita la iluminación artificial.

El control puede ser de forma local (desde tablero de control) o remota (desde HMI), y se describen a continuación.

2.7.4.1. Control local y remoto

Tabla 2.16. Etiquetas de Mandos Locales/Remotos

Mandos	Etiqueta Mandos Locales	Etiqueta Mandos Remotos
Control de Temperatura (Activado)	C.Temperatura_ON	C.Temperatura_ON_HMI
Control de Humedad (Activado)	C. Humedad_ON	C. Humedad_ON_HMI
Control de Luminarias (Temporizado)	C.Illuminación_Temp	C.Illuminación_Temp_HMI
Control de Luminarias (Activado)	C_Illuminación_ON	C_Illuminación_ON_HMI
Control de Riego (Demanda)	C.Riego_Temp	C.Riego_Temp_HMI
Control de Riego (Temporizado)	C.Riego_Demanda	C.Riego_Demanda_HMI

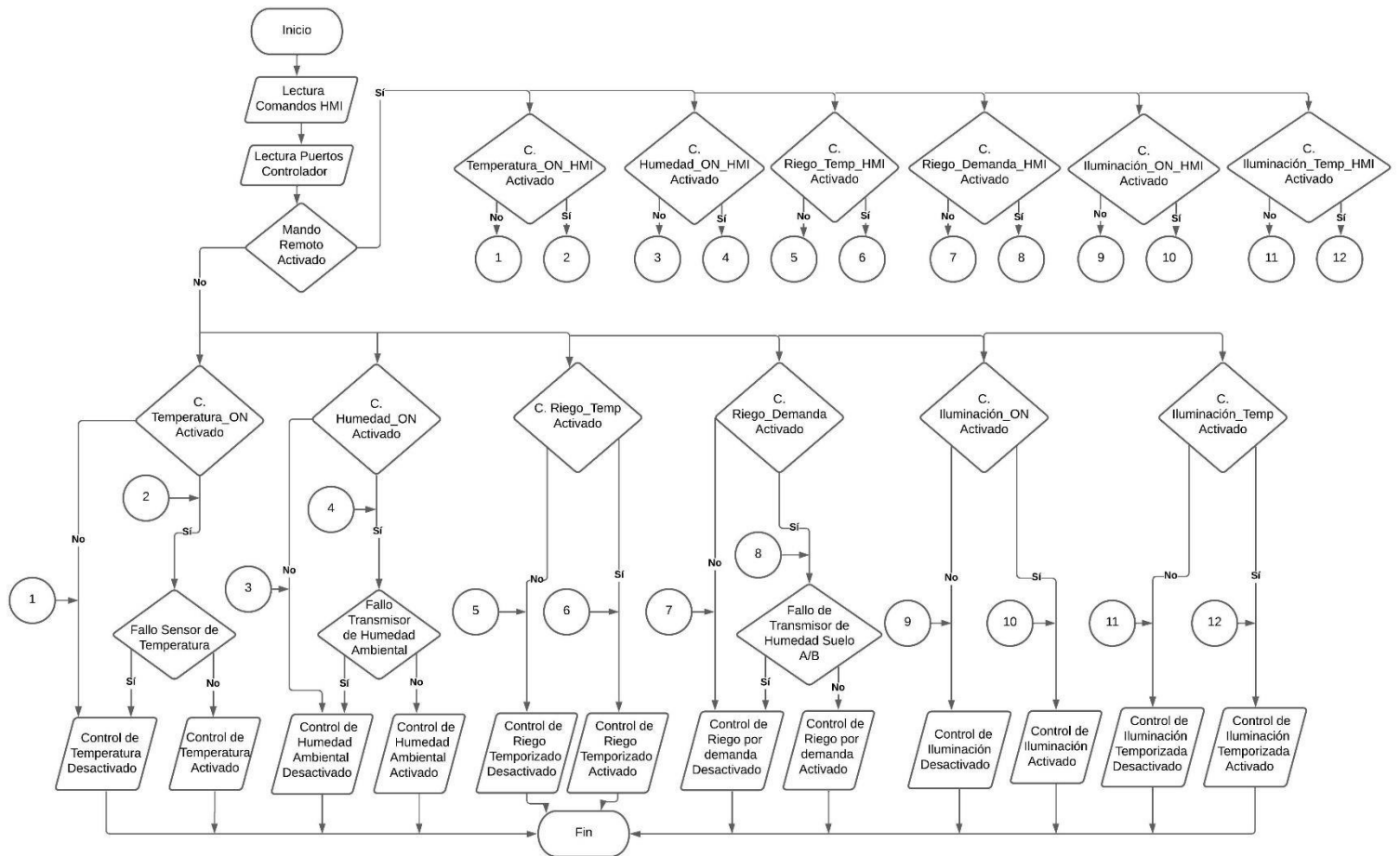


Figura 2.42. Diagrama de Flujo de Mandos Locales y Remotos

En el diagrama de la Figura 2.42, se observa las comparaciones para activar los modos de control local o remoto, si se detecta fallo en el sensor de temperatura no se permite activar el control de temperatura, si falla el transmisor de humedad ambiental no se puede activar el control de humedad y si falla cualquiera de los transmisores de humedad suelo A/B no se permite activar el riego temporizado. Estas restricciones implementadas reducen el riesgo de que las variables físicas se salgan de los rangos adecuados para el crecimiento acelerado de las plántulas.

A continuación, se describen las lógicas de control utilizadas en cada una de las variables dentro del módulo.

2.7.4.2. Lógica de Control de Temperatura

El control de temperatura dentro del módulo tiene dos lógicas: una para día y otra para la noche, ya que durante el día la radiación solar eleva la temperatura del microclima generado mientras que por la noche para mantener la temperatura ideal en las plántulas se necesita el sistema de calefacción.

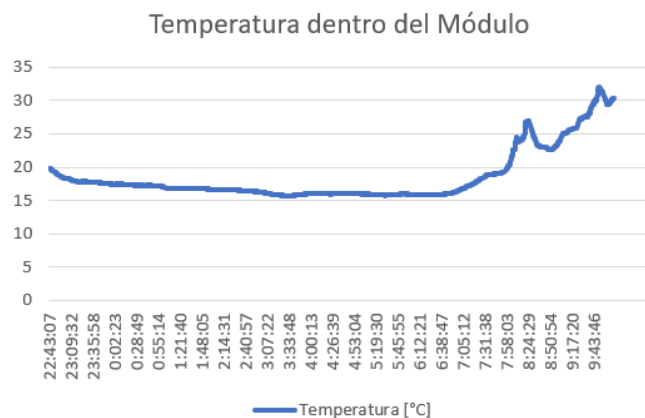


Figura 2.43. Temperatura Ambiental dentro del Módulo sin Control

En la Figura 2.43. Temperatura Ambiental dentro del Módulo sin Control, se observa como la temperatura baja alrededor de 16 grados centígrados durante la noche, mientras que durante la mañana sube a más de 30 grados. Tomando en cuenta las temperaturas obtenidas dentro del módulo y las necesidades de las plántulas, se implementó un controlador PI para el sistema de calefacción durante la noche y un control ON-OFF con histéresis para la ventilación y extracción de aire durante el día.

Control de Calefacción

El sistema de calefacción tiene dos elementos: las resistencias de niquelina y un ventilador axial para distribuir el aire caliente dentro del módulo.

El control de las resistencias calefactoras se realiza mediante un ciclo integral enviado hacia el dispositivo de potencia que permite energizarlas el cual es un SSR Maxwell el cual se observa en la Figura 2.44.

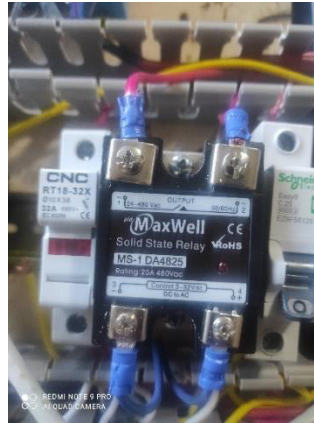


Figura 2.44. Relé de Estado Sólido

La señal PWM con frecuencia de conmutación máxima de 1 HZ que responde a la señal de salida del lazo de control implementado con un PI (0-1000) comanda la operación del relé de estado sólido y es enviada por el controlador Logo 8 a través de su salida tipo transistor.

Para la activación del ventilador se implementó un controlador On/Off con histéresis que funciona tomando en cuenta la señal de salida del regulador PI: cuando ésta supera 400 (valor digital) el ventilador se enciende y se mantiene activado hasta que la señal es menor a 50. Esto evita una conmutación excesiva en el actuador y aumenta su vida útil. El gráfico del control con histéresis se observa en la Figura 2.45.

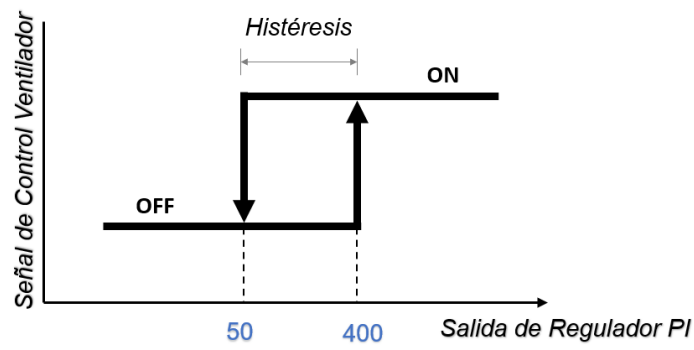


Figura 2.45. Histéresis Señal de Control Ventilador

Control de exceso de temperatura

Cuando la temperatura se eleva en exceso principalmente por la radiación solar durante el día, lo que lleva a que la función supere la temperatura máxima durante el día configurada, funciona el sistema de ventilación y extracción de aire, el cual esta comandado por el controlador On/Off histéresis que se muestra en la Figura 2.46. Histéresis

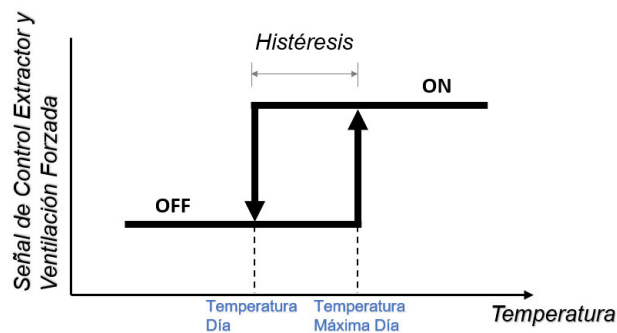


Figura 2.46. Histéresis Temperatura

La Temperatura Día y Temperatura Máxima Día son valores configurables, estos van a depender del tipo de plántulas que se ingresaran dentro del módulo, y de la fase en la que se encuentren.

Lógica de Control de temperatura

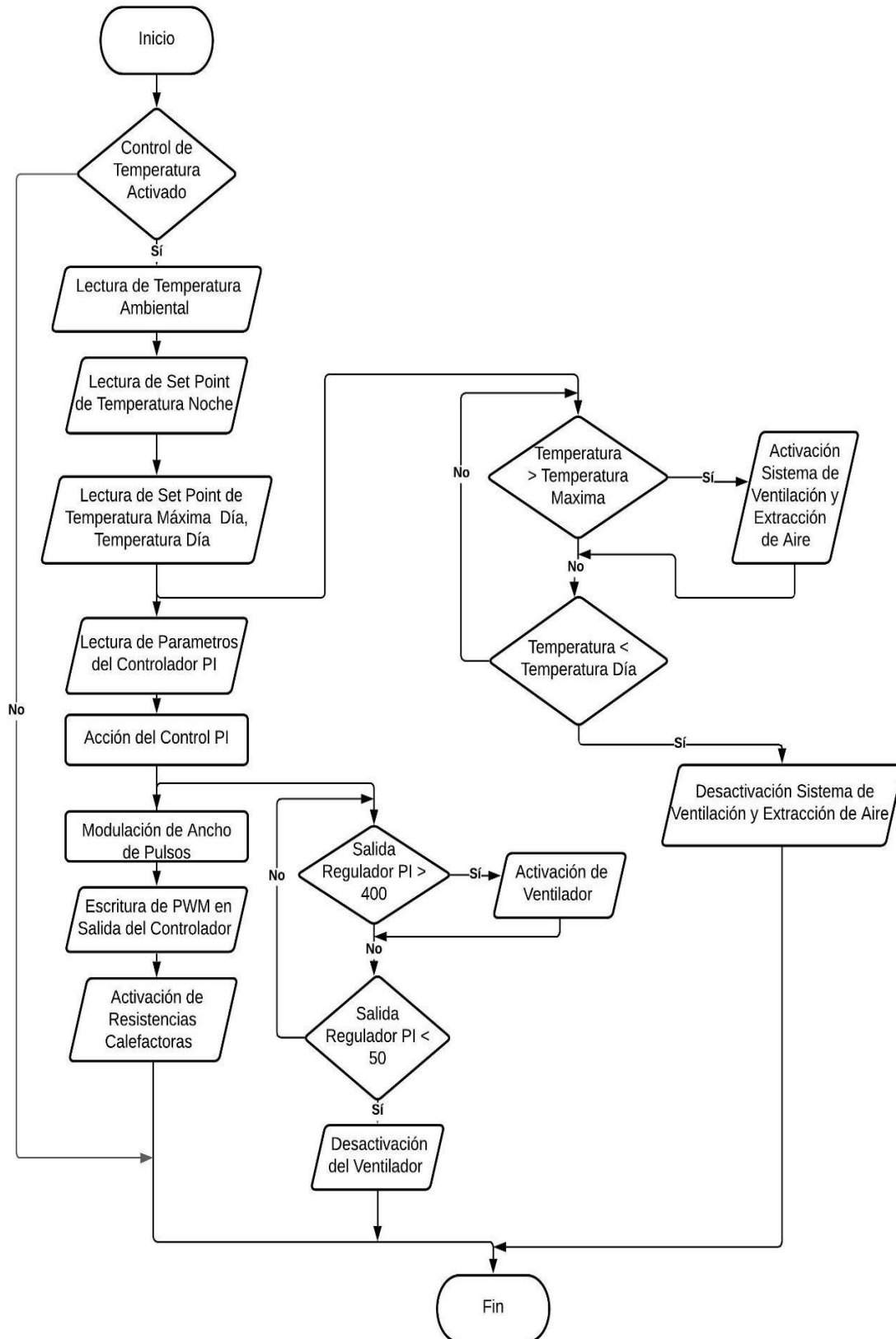


Figura 2.47. Lógica de Control de Temperatura

En el diagrama de flujo observado en la Figura 2.47. Lógica de Control de Temperatura se describe la lógica de control implementada para mantener en rangos adecuados la temperatura dentro del invernadero. Primero se lee el valor adquirido de temperatura ambiental, luego los valores de referencia de temperatura noche, temperatura día y temperatura máxima durante el día. Se dispone de dos controladores, un PI para el control de calefacción donde el valor de referencia es la temperatura noche, además funciona en conjunto con un control On/Off con histéresis para el ventilador interno que depende de la señal de salida del Controlador PI. El segundo controlador funciona principalmente durante el día, cuando la temperatura se excede de los rangos preconfigurados.

2.7.4.3. Lógica de Control de Humedad Suelo

Para el control de la humedad del suelo se implementó dos tipos de controladores: por demanda y temporizado, los cuales pueden ser escogidos de uno en uno, es decir, no pueden trabajar al mismo tiempo.

Control de Humedad Suelo para Riego Temporizado

Este tipo de control usa el reloj en tiempo real interno del Controlador, el cual funciona continuamente por 20 días en caso de corte de energía eléctrica.[26]

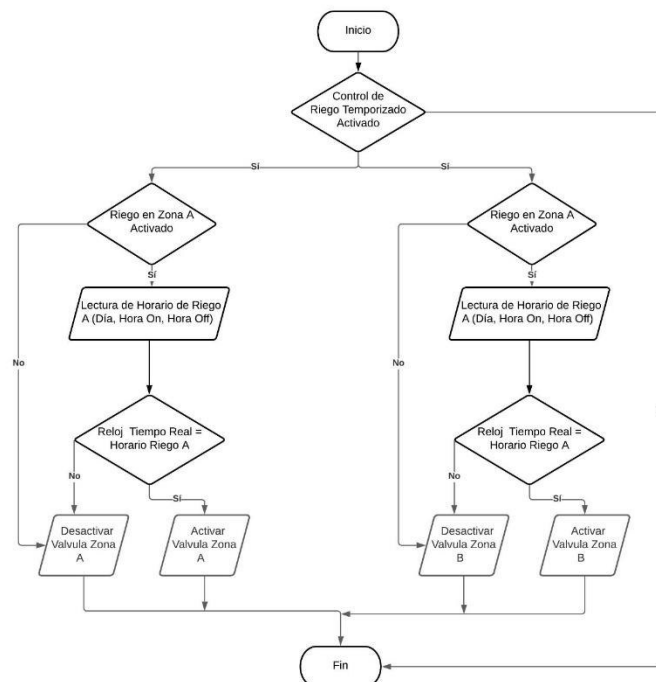


Figura 2.48. Lógica de Control Riego Temporizado

Tomando en cuenta que existen dos zonas con circuitos independientes de riego, se ha implementado la lógica de control observada en la Figura 2.48 que permita la activación de las válvulas en función del control temporizado semanal, activación del riego temporizado y activación de riego por zonas.

Control de Humedad Suelo para Riego por Demanda

Para el Riego por demanda se toma en cuenta los datos adquiridos por los sensores de Humedad del suelo en cada Zona (A y B). Para mantener en rangos adecuados la humedad suelo se implementó controladores On/Off con histéresis como se muestra en la Figura 2.49.

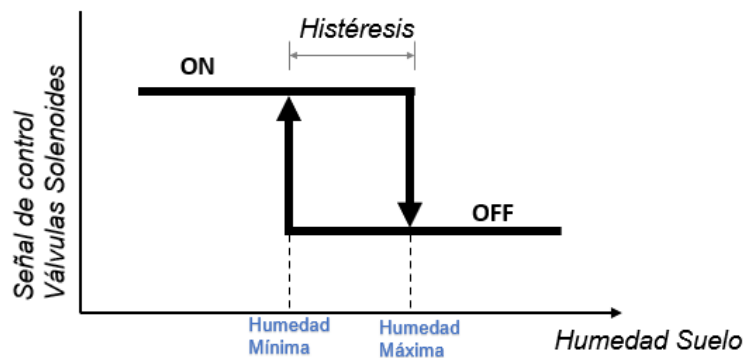


Figura 2.49. Histéresis Humedad Suelo

En la Figura 2.50 se describe la lógica de control implementada para el control de riego por demanda, para ello se toma en cuenta valores configurables de Humedad Suelo máxima y mínima para cada Zona de cultivo y la lectura de los sensores de humedad. Además, se tiene un horario de riego permitido configurable, este horario permite elegir los días, la hora de conexión y hora de desconexión

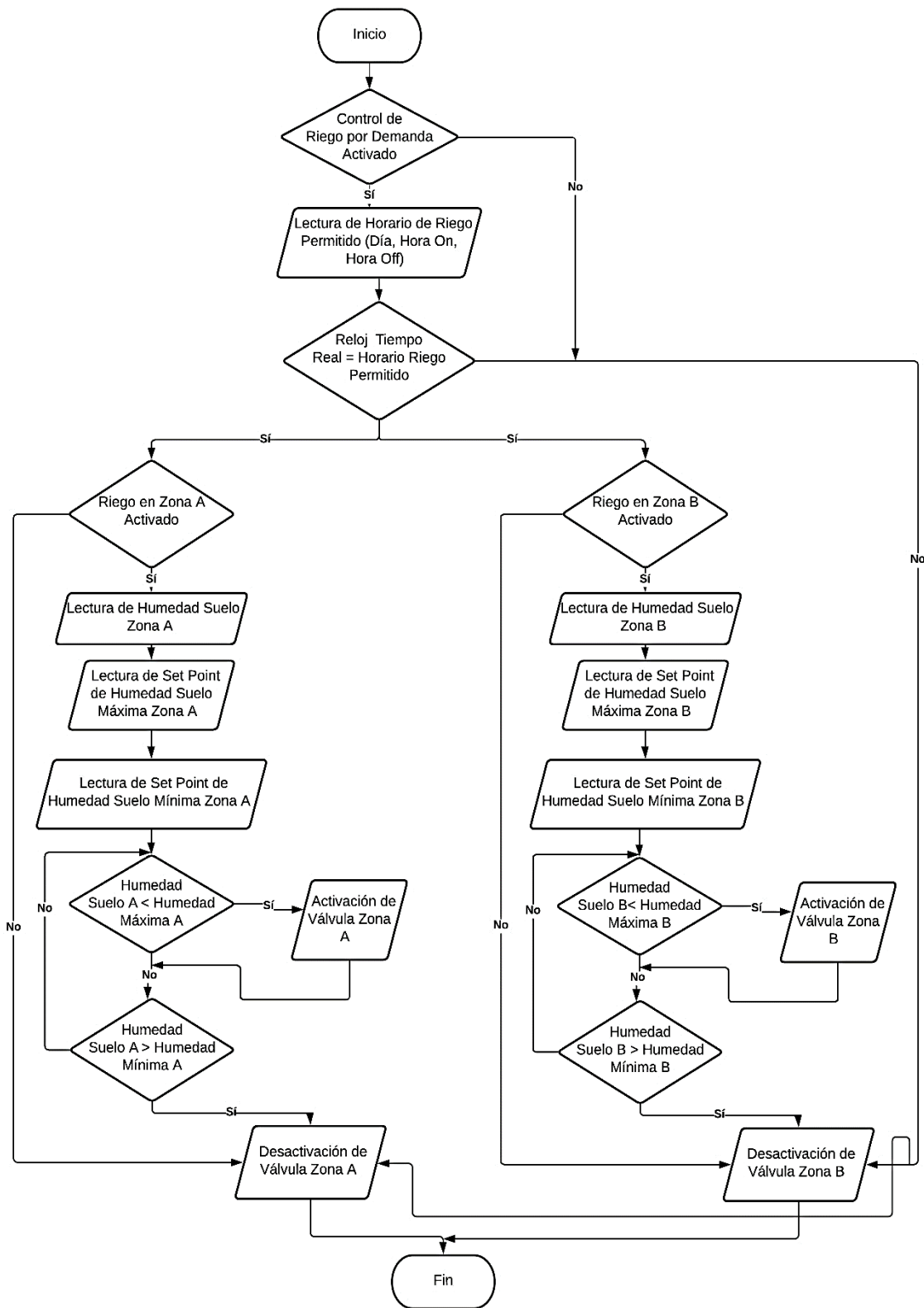


Figura 7.50. Lógica de Control Riego por Demanda

2.7.4.4. Lógica de Control de Humedad Ambiental

La humedad del ambiente del invernadero en el cual van a desarrollarse las plántulas varía en gran medida con la calefacción, riego y radiación solar. El objetivo de realizar un control es reducir la humedad ambiental principalmente porque en excesos generan un microclima favorable para el crecimiento de hongos en las plántulas. Para ello se ha implementado un control On/Off con histéresis que activa el sistema de extracción y ventilación de aire, facilitando la renovación del aire en el interior del módulo con el del exterior y reduciendo de esta manera la humedad ambiental. La histéresis se observa en la Figura 2.51

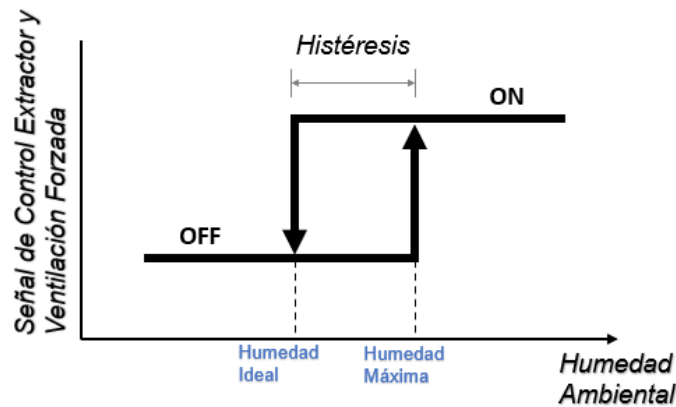


Figura 2.51. Histéresis Humedad Ambiental

La lógica de control de la humedad ambiental observada en la Figura 2.52, al igual que las anteriores tiene un horario de funcionamiento permitido, y toma en cuenta dos variables configurables, la humedad ideal y la humedad máxima.

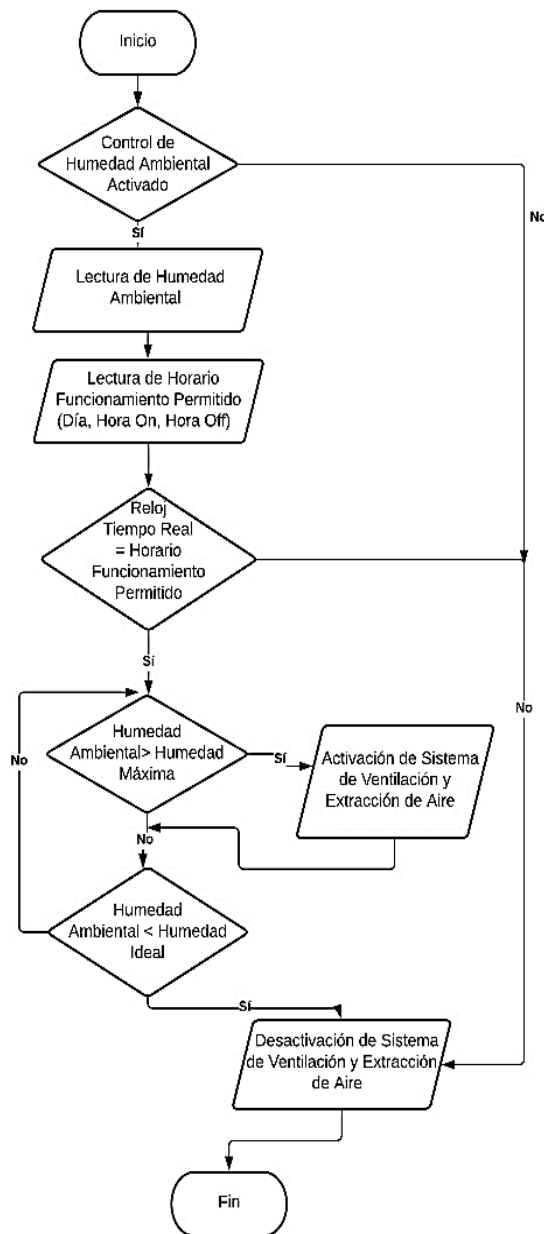


Figura 2.52. Lógica de Control Humedad Ambiental

2.7.4.5. Lógica de Control de Ventilación y Extracción de aire

Para renovar todo el volumen de aire del interior que permite mantener en niveles adecuados el CO2 dentro del módulo se ha implementado un controlador On/Off por tiempos en un horario configurable.

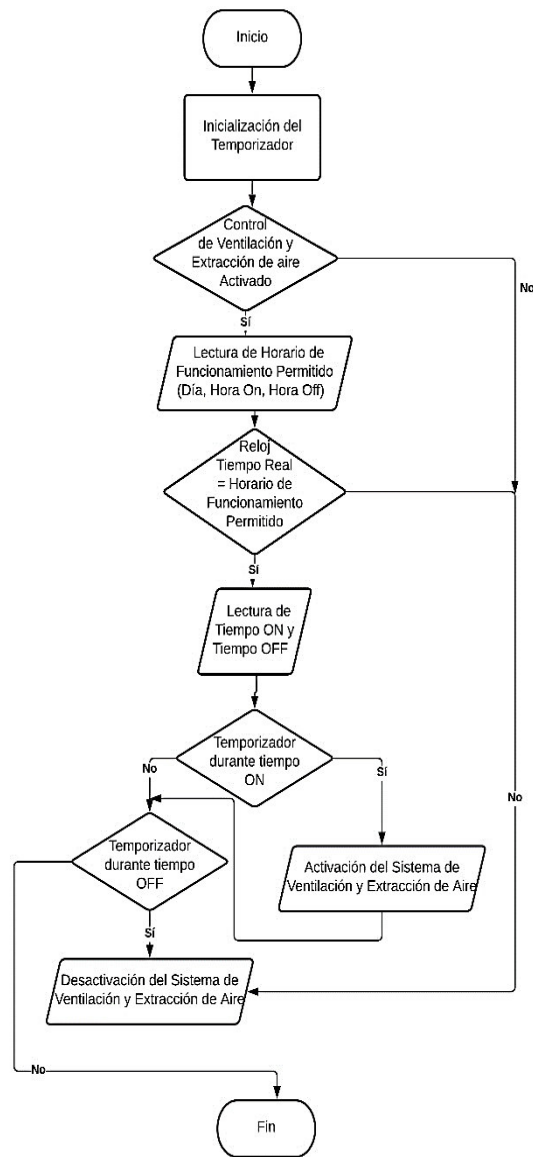


Figura 2.53. Lógica de Control Ventilación y Extracción de Aire

La Figura 2.53 describe la lógica de control que permite realizar encendidos y apagados cíclicos para renovar el aire dentro del módulo

2.7.4.6. Lógica de Control de Iluminación

El control de iluminación implementado, al igual que el riego temporizado, hace uso del reloj interno en tiempo real del controlador. La temporización actúa en función de configuraciones de Día, Hora de activación y hora de desactivación. El sistema cuenta con dos horarios de iluminación configurables como se observa en el diagrama de la Figura 2.54.

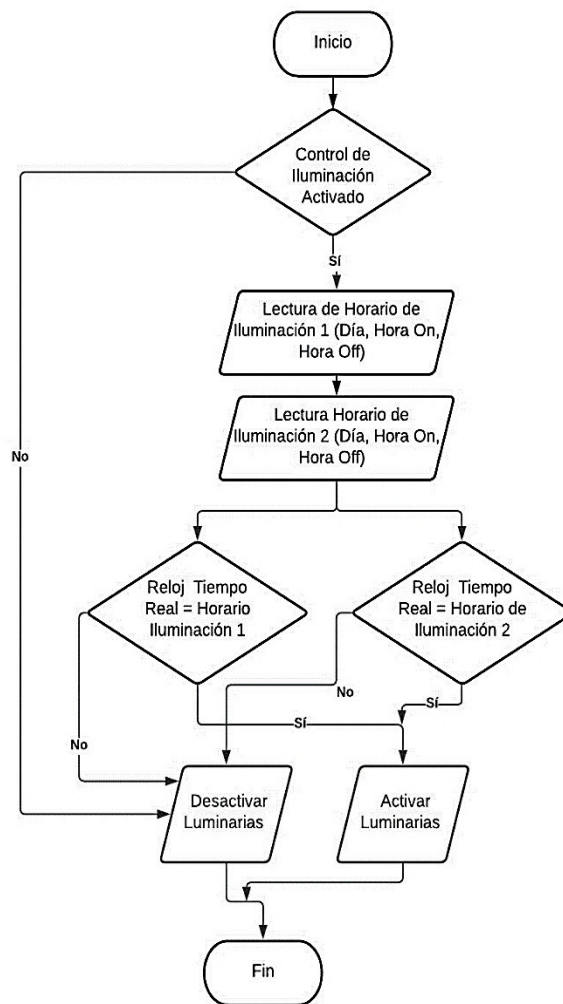


Figura 2.54. Lógica de Control Iluminación

El control de la iluminación se implementó sin realimentación de sensores debido a que para esta aplicación las plántulas no necesitan luz continua durante la noche, pero si una extensión de luz artificial de 1-4 horas.

2.7.4.7. Lógica de Control para Activación de Actuadores

Anteriormente se describieron las lógicas de control para cada una de las variables físicas dentro del módulo, pero tomando en cuenta que son altamente acopladas se ha diseñado restricciones en el funcionamiento de los actuadores dependiendo de los sistemas de control activos.

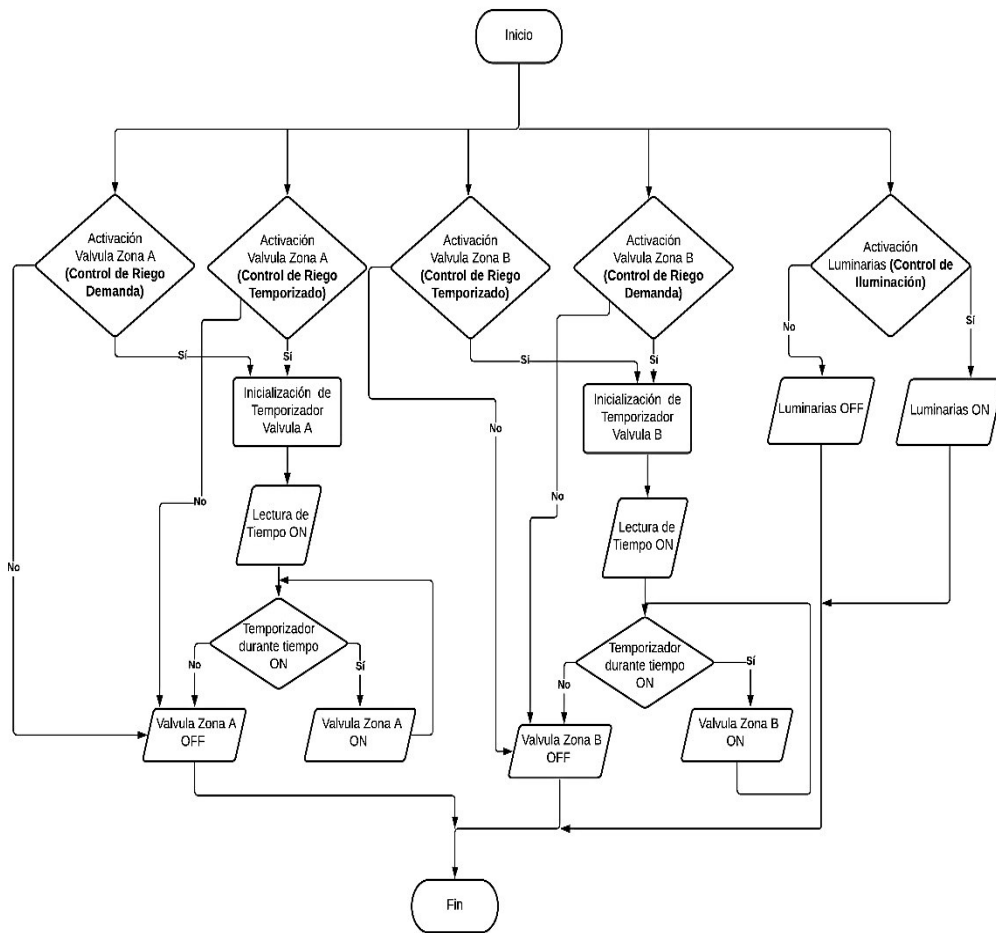
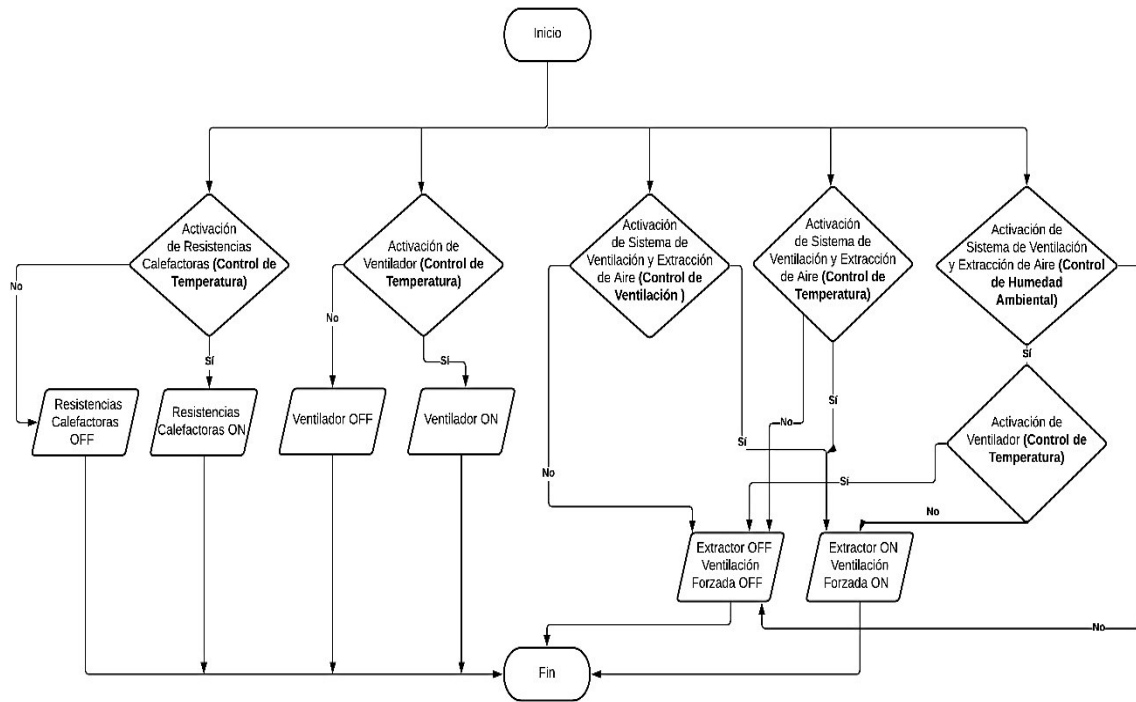


Figura 2.55. Lógica de Control de Activación y Desactivación de Actuadores

En la lógica de control descrita en la Figura 2.55. se observan los comandos de activación de los actuadores de cada uno de los controles implementados. Las resistencias calefactoras y el ventilador solo dependen del control de temperatura. El extractor y ventilador de aire forzado dependen de tres sistemas de control (Temperatura, Humedad y Ventilación). En el caso de que esté funcionando el sistema de calefacción (Ventilador ON) no permite que se extraiga el aire. Las válvulas tienen restricción de tiempo de funcionamiento configurable, es decir que pueden permanecer activadas solamente por un periodo de tiempo cada día, con el fin de evita riesgo de encharcamiento y exceso de humedad del suelo por fallas en sensores.

2.8. TABLERO DE CONTROL

El módulo productor y germinador de plántulas es un equipo que debe tener un tablero de control para proteger y organizar los dispositivos de mando y protección. En esta sección de va a describir todos los componentes que se utilizaron para la implementación del tablero de control, la elección de dispositivos de protección y mando, el diseño del cableado de actuadores y sensores y finalmente la disposición de todos los elementos en el equipo.

2.8.1. RELÉS

Las corrientes consumidas por los elementos finales de control son: 4.63 A para las resistencias calefactoras, 0.46 A para el extractor de aire, 0.14 A para el ventilador y 0.05 A para las luminarias.

En base a estos datos y con el fin de estandarizar elementos se decidió utilizar el mismo tipo de relé para cada dispositivo, lo que va a facilitar la instalación y mantenimiento en el tablero de control. El relé escogido es de la marca Camsco modelo MY2 el cual se observa en la Figura 2.56 y sus características en la Tabla 2.17. Este dispositivo se acopa mediante una base a medida para riel Din la cual se observa en la Figura 2.57,



Figura 2.56. Relé MY2 Camsco

Tabla 2.17. Especificaciones del Relé

Corriente Nominal de Carga	5 A
Voltaje de Control	24 Vdc
Capacidad del Contacto	220Vac
Resistencia de contacto	$\leq 50\text{m}\Omega$



Figura 2.57. Base Relé MY2

2.8.2. DIMENSIONAMIENTO DE PROTECCIONES

Para el dimensionamiento de las protecciones se tomó en cuenta la corriente de línea en cada parte del sistema y se consideró que la protección debe soportar sobrecargas, cortocircuitos y evitar riesgo de muerte por electrocución. Por ello se usaron termomagnéticos, fusibles e interruptor diferencial.

2.8.2.1. Termomagnéticos

Estos dispositivos protegen contra sobrecargas y cortocircuitos, además permiten realizar operaciones de mando en forma manual para permitir o no la energización de circuitos. En el tablero de control se han implementado dos termomagnéticos, uno para la parte de control y otro para potencia

El fusible termomagnético que protege la parte de potencia es un elemento unipolar de 10 amperios, el cual se observa en la figura 2.58. Se lo dimensionó tomando en cuenta que la corriente máxima de la parte de potencia es de 5.28 amperios.



Figura 2.58. Termomagnético Unipolar utilizado en la parte de potencia

Para la parte de control se tomaron en cuenta las potencias consumidas por la fuente de alimentación, luces piloto, bobinas de relés, SSR, sensores y transmisores y por ello se escogió un termomagnético unipolar de 6 A, el cual se observa en la Figura 2.59







Figura 2.59. Termomagnético Unipolar utilizado en la parte de control

2.8.2.2. Fusibles

Estos dispositivos protegen contra cortocircuitos que se pueden ocurrir dentro del módulo por falta de mantenimiento o por mala manipulación. Las líneas que cuentan con fusibles son las que energizan los ventiladores, luminarias y resistencias calefactoras, para el diseño se ha utilizado la siguiente ecuación.

$$I_f = 1.25 \times I_{línea}$$

Tabla 2.18. Dimensionamiento de Fusibles

Dispositivo	Corriente de Línea	Corriente de Fusible	Fusible Escogido	Imagen Referencial
Resistencias Calefactoras	4,63 A	5.78 A	6 A, Accionamiento Rápido (aR)	
Extractor de Aire / Ventilación Forzada	0.46 A	0.56 A	1 A, Accionamiento Norman (gG)	
Luminarias	0,05 A	0,06 A	1 A, Accionamiento Norman (gG)	
Ventilador	0.14 A	0.17 A	1 A, Accionamiento Norman (gG)	

En la Tabla 2.18 se observa el dimensionamiento de fusibles para los diferentes circuitos del módulo. Tomando como consideración que los relés de estado sólidos pueden fallar y dejar energizado el circuito se ha implementado un fusible de acción rápida tipo aR para las resistencias calefactoras.

Los fusibles se colocan en bases individuales que se acoplan fácilmente al riel din del tablero de control, esto permite realizar fácilmente cambios en caso de fallas,

2.8.2.3. Interruptor Diferencial

Este dispositivo es de gran importancia en el sistema, debido a que genera protección para el operador del módulo, esto debido a que se activa en cuanto detecta una corriente de fuga mayor a 30 mA evitando el riesgo de electrocución grave. Está colocado como dispositivo de protección y mando para todo el sistema tanto para la parte de control como para potencia y corresponde a un interruptor diferencial de marca Ebasee con una corriente nominal de 32 A, el cual se observa en la Figura 2.60.



Figura 2.60. Interruptor Diferencial

A continuación, en la Figura 2.61 se puede observar el diagrama de fuerza

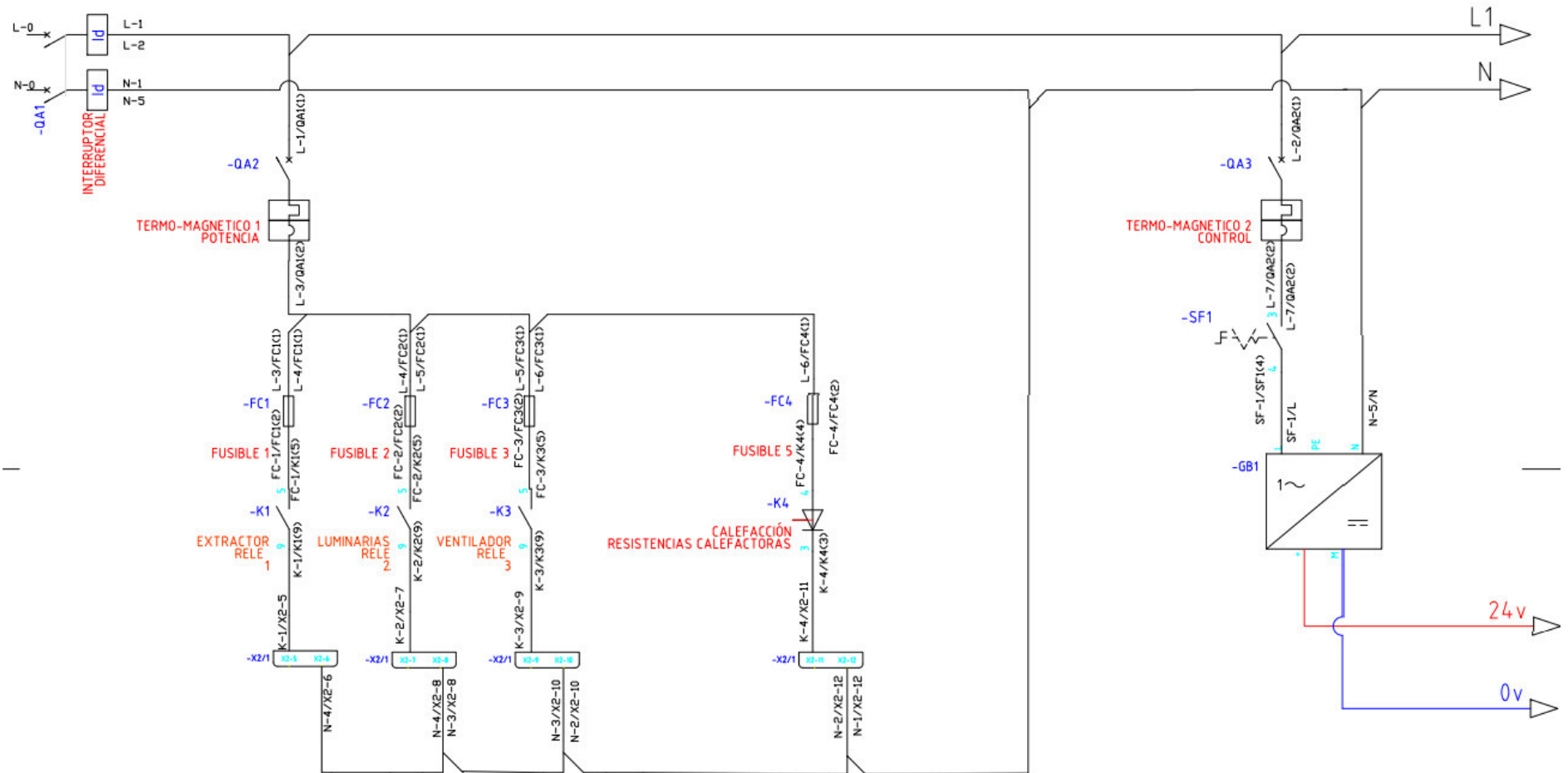


Figura 2.61. Diagrama de Fuerza

2.8.3. ELEMENTOS DEL TABLERO DE CONTROL

2.8.3.1. Fuente de Alimentación

La fuente de alimentación con la que trabaja el módulo tiene un voltaje de alimentación estandarizado de 24Vdc para sensores, transmisores, controlador y señales de control de accionadores, por lo que se escogió una fuente conmutada de 24Vdc /15 A la cual se observa en la Figura 2.61.



Figura 2.61. Fuente Conmutada 24Vdc

2.8.3.2. Selectores

Los selectores escogidos para el presente proyecto técnico son de la marca Camsco de 2 y 3 posiciones, estos dispositivos de mando permiten un flujo de corriente máximo de 10 A. y se los observa en la Figura 2.62.



Figura 2.62. Selectores

2.8.3.3. Luces Piloto

El tablero de control cuenta con varios indicadores visuales que permiten observar el funcionamiento de los diferentes dispositivos como válvulas y ventiladores. Los dispositivos

escogidos son de marca Camsco que funcionan a 24Vdc, las luces piloto se observan en la Figura 2.63.



Figura 2.63. Luces Piloto

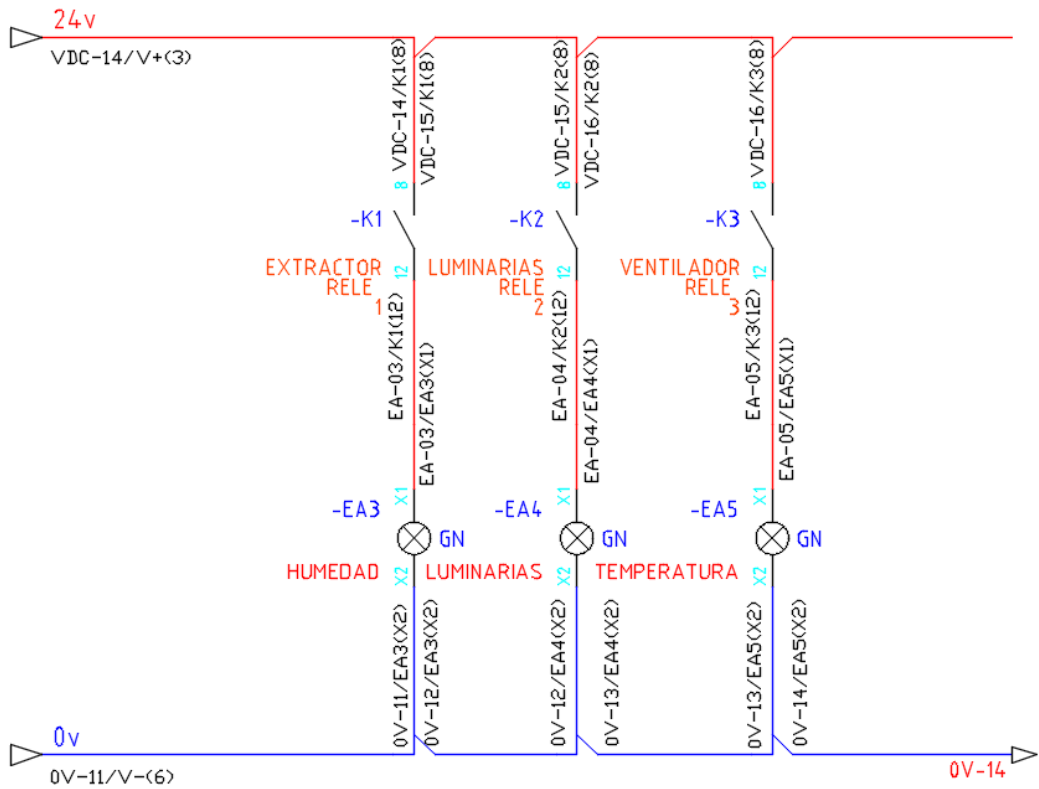


Figura 2.64. Diagrama de conexiones Luces Piloto

Tabla 2.19. Elementos de diagramas de Control / Fuerza




Elemento	Etiqueta	Función
Selector 2 Posiciones	SF1	Permite energizar la fuente de alimentación conmutada
Selector 2 Posiciones	SF2	Permite activar el control de temperatura
Selector 2 Posiciones	SF3	Permite activar el control de humedad,
Selector 3 Posiciones	SH1	Permite comandar las luminarias (activado / temporizado)
Selector 3 Posiciones	SH2	Permite comandar el control de riego (temporizado / demanda)
Piloto Verde	EA1	Está sujeta a código de colores visto en tabla
Piloto Roja	EA2	Está sujeta a código de colores visto en tabla
Piloto Verde	EA3	Se activa si ventilador y extractor se energiza
Piloto Verde	EA4	Se activa si luminarias se energizan
Piloto Verde	EA5	Se activa si ventilador interno se energiza
Piloto Verde	EA6	Se activa si válvula solenoide se energiza.
Relé Mecánico	K1	Activa Extractor de Aire y Ventilación Forzada
Relé Mecánico	K2	Activa Luminarias
Relé Mecánico	K3	Activa Ventilador Interno
Relé de Estado Solido	K4	Activa Resistencias Calefactoras
Fuente de Alimentación 24Vdc	GB1	Energiza la parte de control del sistema
Interruptor Diferencial	QA1	Protección y mando de todo el equipo.

Termomagnético C10	QA2	Protección y mando parte de potencia.
Termomagnético C6	QA3	Protección y mando parte de control.
Fusible 1 A (gG)	FC1	Protección contra cortocircuito Extractor y ventilación forzada
Fusible 1 A (gG)	FC2	Protección contra cortocircuito Luminarias
Fusible 1 A (gG)	FC3	Protección contra cortocircuito Ventilador Interno
Fusible 6 A (aR)	FC4	Protección contra cortocircuito Resistencias calefactoras

2.8.4. IMPLEMENTACIÓN DEL TABLERO DE CONTROL

El tablero de control implementado contiene varios elementos que permiten facilitar la instalación, el mantenimiento y cambio de dispositivos en caso de ser necesario. Se los describe en la Tabla 2.20.

Tabla 2.20. Elementos para implementación del Tablero de Control.

Elemento	Función	Imagen Referencial
Riel DIN	Permite acoplar los dispositivos fácilmente	
Canaleta Ranurada	Permite cablear el tablero en forma ordenada	
Terminales de cable	Permite una conexión segura entre cables y dispositivos	

Gabinete	Contiene todos los elementos y protege contra polvo y lluvia.	
Regletas de Conexión	Permite conectar sensores, transmisores, actuadores fácilmente	
Prensaestopas	Permiten acoplar mangueras al tablero de control con protección para salpicaduras de agua	
Espiral para cable	Disminuye desgaste en cables por fricción.	

En la Figura 2.65 se observa el diagrama de la ubicación de elementos en el tablero de control. El diseño se realizó tomando en cuenta el espacio del gabinete, el tamaño de los dispositivos, el cableado necesario y evitar mezclar señales de sensores y transmisores con potencia.

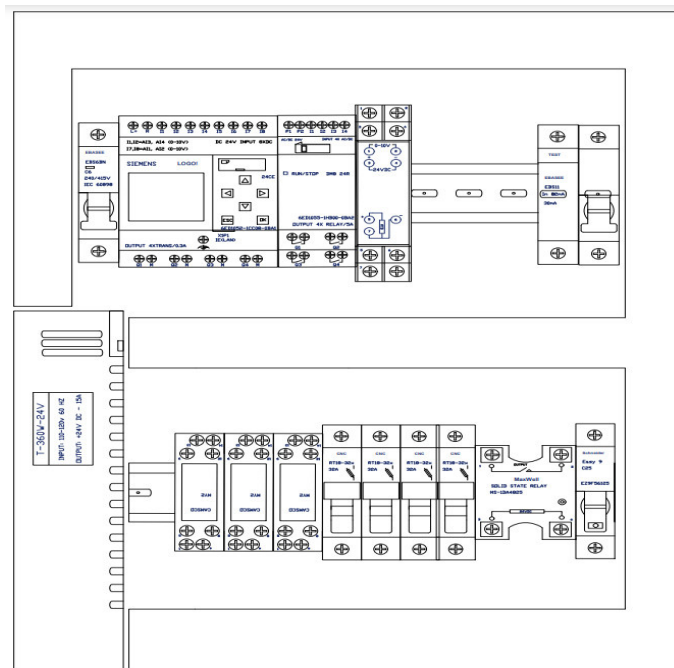


Figura. 2.65. Disposición de elementos en el Tablero de control

Como se observa en la Figura 2.61 el tablero de control está cableado en forma ordenada respetando las etiquetas y conexiones diseñadas, para el cableado de la parte de control se utilizó cable flexible color azul 18 AWG, para la parte de potencia se utilizó cable flexible color blanco 16 AWG y para los cables de alimentación 12 AWG.

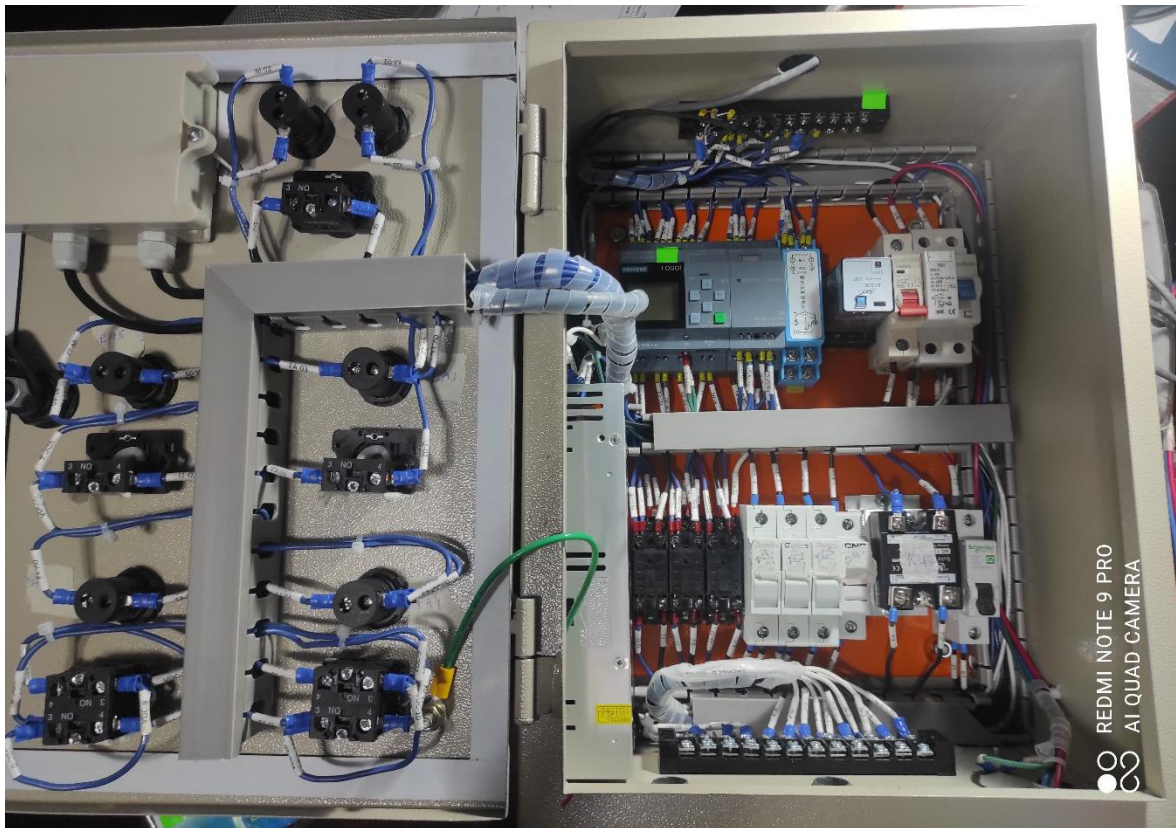


Figura. 2.66. Tablero de control Implementado

La parte frontal del tablero se observa en la Figura 2.67, en donde se puede ver que existen indicadores visuales que en este caso son las luces piloto verdes y rojas las cuales tienen un significado mediante una codificación que se observa en la Tabla 2.21.

Tabla 2.21. Código de Colores Pilotos de Operación

Operación	Piloto Verde	Piloto Rojo
Funcionamiento Correcto, Mando Local Activo	Encendido	Apagado
Funcionamiento Correcto, Mando Remoto Activo	Encendido	Encendido
Fallo en Sensores (Vistos en Tabla 2.10)	Apagado	Encendido

Rangos Peligrosos (Vistos en Tabla 2.11)	Apagado	Encendido Intermitente (Frecuencia 1Hz)
--	---------	--



Figura 2.67. Parte Frontal del tablero de Control

2.9. INTERFAZ HOMBRE-MAQUINA

El proyecto técnico implementado busca ser flexible en cuanto a las configuraciones del sistema, es decir, debe permitir que el usuario pueda cambiar valores de referencia fácilmente en función de la especie a cultivar, de la fase de crecimiento en la que se encuentra y del uso total o parcial del módulo. Para ello se ha implementado dos interfaces: una que utiliza un servidor web conectado a la red de área local y otra usando la pantalla del controlador Logo 8 de Siemens.

Las dos interfaces realizan los intercambios de información en memorias variables (VM) locales del controlador. Los valores configurables se resumen en la Tabla

Tabla. 2.22. Valores Configurables desde HMI

Función	Bloque Programación	Parámetro	Tipo	Dirección VM
Humedad Suelo Máxima Zona A	Conmutador analógico de valor umbral	ON	Word	2
Humedad Suelo Mínima Zona A	Conmutador analógico de valor umbral	OFF	Word	4
Humedad Suelo Máxima Zona B	Conmutador analógico de valor umbral	ON	Word	6
Humedad Suelo Mínima Zona B	Conmutador analógico de valor umbral	OFF	Word	8
Riego Temporizado / Zona A / Día de la Semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	10
Riego Temporizado / Zona A / Momento de Conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	11
Riego Temporizado / Zona A / Momento de Desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	13
Riego Temporizado / Zona B / Día de la Semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	15
Riego Temporizado / Zona B / Momento de Conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	16
Riego Temporizado / Zona B / Momento de Desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	18
Temperatura ideal Noche	Regulador PI	Consigna (SP)	Word	20
Temperatura Máxima día	Conmutador analógico de valor umbral	ON	Word	22
Temperatura Día	Conmutador analógico de valor umbral	OFF	Word	24
Horario Permitido Riego / Demanda / Día de la Semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	26
Horario Permitido Riego / Demanda / Momento de Conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	27

Horario Permitido Riego / Demanda / Momento de Desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	29
Humedad Ambiental/ Horario Permitido/ Dia de la semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	31
Humedad Ambiental/ Horario Permitido/ Momento de conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	32
Humedad Ambiental/ Horario Permitido/ Momento de desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	34
Humedad Máxima	Conmutador analógico de valor umbral	ON	Word	36
Humedad Ideal	Conmutador analógico de valor umbral	OFF	Word	38
Ventilación y Extracción de Aire / Horario Permitido/ Dia de la semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	51
Ventilación y Extracción de Aire / Horario Permitido/Momento de conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	52
Ventilación y Extracción de Aire / Horario Permitido/ Momento de desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	54
Iluminación Temporizada/ Horario 1/ Dia de la semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	56
Iluminación Temporizada/ Horario 1/ Momento de conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	57
Iluminación Temporizada/ Horario 1/ Momento de desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	59
Iluminación Temporizada/ Horario 2/ Dia de la semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	61

Iluminación Temporizada/ Horario 2/ Momento de conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	62
Iluminación Temporizada/ Horario 2/ Momento de desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	64
Ganancia del regulador (Kc)	Regulador PI	Ganancia del regulador (KC)	Word	66
Tiempo integral (TI) segundos	Regulador PI	Tiempo integral (TI)	Word	68
Salida del Regulador PI	Regulador PI	Aq	Word	70
Periodo de la modulación de ancho de pulsos	PWM	Tiempo periódico	Word	72
Rango mínimo PWM	PWM	Rango mín.	Word	74
Rango máximo de PWM	PWM	Rango máx.	Word	76
Histéresis Ventilador Interno (Valor on)	Conmutador analógico de valor umbral	ON	Word	78
Histéresis Ventilador Interno (Valor off)	Conmutador analógico de valor umbral	OFF	Word	80

2.9.1. PANTALLA SIEMENS LOGO 8

Uno de los motivos por los que fue escogido el controlador Logo 8 de Siemens es la disponibilidad de una pantalla donde se pueden visualizar valores numéricos, estado de marcas, estado de salidas y también se pueden configurar fácilmente los valores mostrados. La pantalla en funcionamiento se observa en la Figura 2.68, en ella se desarrolló la interfaz mediante el software Logo soft Comfort.



Figura. 2.68. Pantalla de Logo Siemens 8

En la parte izquierda de la Figura 2.69, se observa una de las pantallas implementadas con los valores de cada variable física medida dentro del módulo y en la parte derecha se observa la pantalla de configuración del control de temperatura. Las pantallas desarrolladas son:

- Pantalla de monitorización
- Configuración de Temperatura Ambiental
- Configuración de Humedad Ambiental
- Configuración de Riego (Temporizado)
- Configuración de Riego (Demanda)
- Configuración de Iluminación
- Configuración de Ventilación y Extracción de Aire

T e m	A m b :			3 1 . 7 °C
H u m	A m b :			6 0 . 4 %
- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
H u m e d a d	S u e l o			
H u m 1 :				2 6 . 2 %
H u m 2 :				2 9 . 6 %

C o n t r o l	T e m p	°C		
			3 1 . 7 °C	
S e t	P o i n :			2 3 . 0
▶ T e m	M a x :			3 5 . 0
▶ T e m	M i n :			3 3 . 0
E s t a d o :	I n a c t i v o			

Figura 2.69. Implementación de valores en pantalla Logo

2.9.2. SERVIDOR WEB

El servidor web permite la supervisión y control del Logo 8 en remoto a través de internet utilizando la interfaz ethernet con la que cuenta el controlador. El software que se usó para implementar las páginas web es LWE (Logo Web Editor).

El servidor web realiza los cambios en las variables locales mediante los siguientes pasos.

1. El Servidor web almacena los datos requeridos en el área VM especificada en la conexión de datos y en la transferencia de datos, es una acción compartida.
2. La unidad cliente lee el área VM del servidor y luego actualiza el área VM local correspondiente a su paso dentro del proceso de red.

3. Tras la actualización local, el programa del cliente puede utilizar la información de la VM local originada desde el servidor web. [26]

En la Tabla 2.23 se observan todos los comandos que envía el HMI al controlador, los mandos remotos de activación de cada uno de los controladores y comandos para forzar el encendido de los mismos.

Tabla 2.23. Comandos enviados desde HMI

Función	Bloque Programación	Tipo	Dirección VM
Forzar encendido de Ventilador Interior	NI1	Booleano	0.0
Forzar encendido de Extractor y Ventilación Forzada	NI2	Booleano	0.1
Forzar encendido de válvula Zona A	NI3	Booleano	0.2
Forzar encendido de válvula Zona B	NI4	Booleano	0.3
Forzar encendido de Luminarias	NI5	Booleano	0.4
Mando Remoto/ Activación Control de Calefacción	NI6	Booleano	0.5
Mando Remoto/ Activación Control de Humedad Ambiental	NI7	Booleano	0.6
Mando Remoto/ Activación Control de Riego Temporizado	NI8	Booleano	0.7
Mando Remoto/ Activación Control de Riego por Demanda	NI9	Booleano	1.0
Mando Remoto/ Activación Control de Iluminación Temporizado	NI10	Booleano	1.1

Mando Remoto/ Activación Control de Iluminación Activo	NI11	Booleano	1.2
Cambio de Modo (Local- Remoto)	NI12	Booleano	1.3
Forzar encendido de Resistencias Calefactoras	NI13	Booleano	1.4
Activación Control de Ventilación y Extracción de Aire	NI14	Booleano	1.5
Comando Activación Riego por Demanda Zona A	NI15	Booleano	1.6
Comando Activación Riego por Demanda Zona B	NI16	Booleano	1.7
Tiempo Encendido / Control Ventilación y Extracción de aire	NAI1	Word	100
Tiempo Off/ Ventilación y Extracción de aire	NAI2	Word	102

En la Figura 2.70, se observa la pantalla principal del HMI, donde se encuentra un gráfico referencial del módulo y se observa el funcionamiento mediante animaciones, los comandos de mando remoto y las alarmas en caso de fallas en sensores o rangos peligrosos. Las configuraciones de cada sistema de control se encuentran en pantallas secundarias.

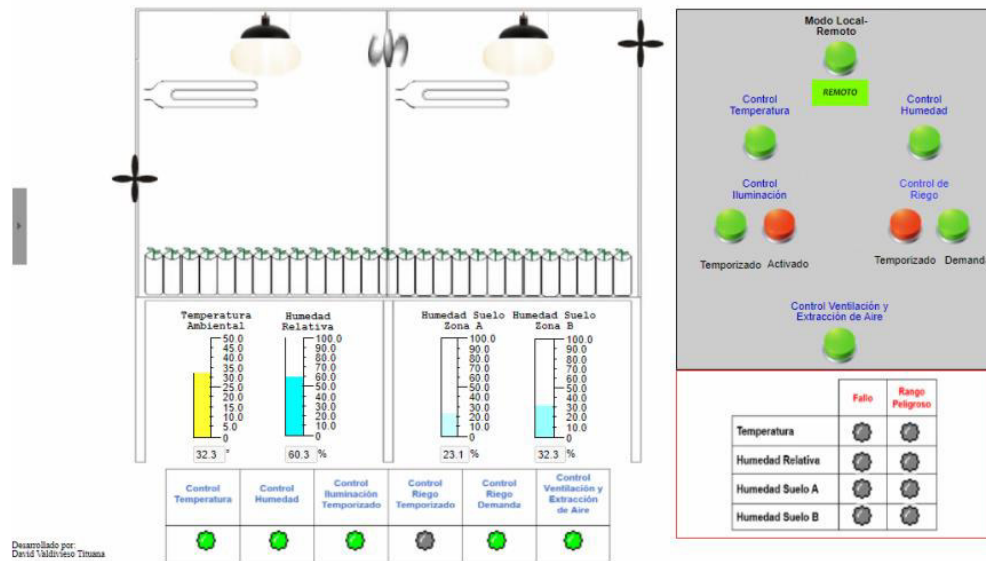


Figura 2.70. Pantalla principal del HMI

2.9.2.1. Conexión a Internet del Servidor Web

El servidor web este alojado en la tarjeta de expansión colocada dentro del controlador Logo Siemens 8, para que este sea visible en cualquier lugar del mundo con acceso a internet se debe contar con una ip publica conocida y acceso mediante un puerto en el router conectado al controlador.

En la Figura 2.71, se observa el diagrama de red para el acceso al HMI mediante internet, el servidor web se encuentra alojado en la red de área local con la IP: 192.168.100.3, para que este sea visible se abrió el puerto 2550 en el router el cual esta redireccionado a la IP 192.169.100.3 / puerto 80 (HTTP).

Adicionalmente se adquirió un servicio de DNS en www.noip.com para facilitar el acceso mediante una URL conocida.

Cabe recalcar que el servidor web cuenta con validación para el acceso mediante usuario y contraseña, lo que permite reforzar la seguridad y evitar uso indebido de la interfaz HMI.

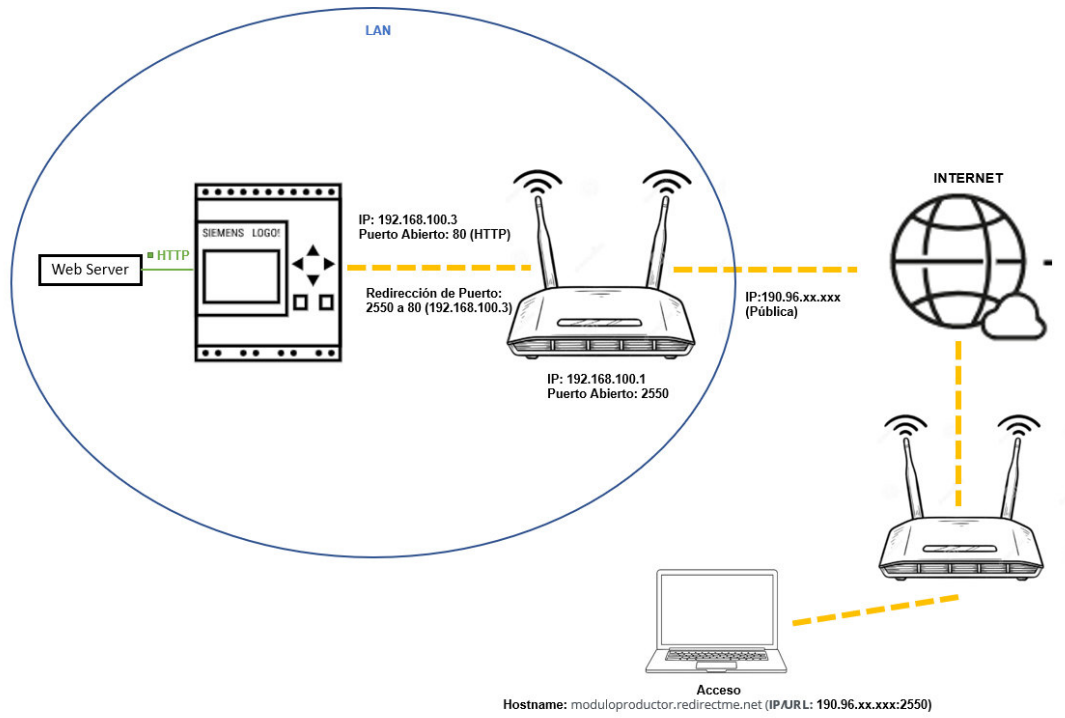


Figura 2.71. Diagrama de Red

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en el módulo productor y germinador de plántulas. El objetivo de las pruebas que se van a describir a continuación es verificar el funcionamiento de todas las partes del equipo diseñado desde el tablero de control, el sistema de adquisición de datos, el control en tiempo real, funcionamiento de interfaz HMI y finalmente se presentaran los resultados de una comparación morfológica entre plantas producidas dentro y fuera del módulo.

En cada una de las pruebas se describen los objetivos, materiales utilizados, la metodología de la prueba, los resultados obtenidos y su discusión.

La simbología y el diagrama P&ID de la planta implementada se observa en la Figura 3.1 y 3.2, respectivamente.

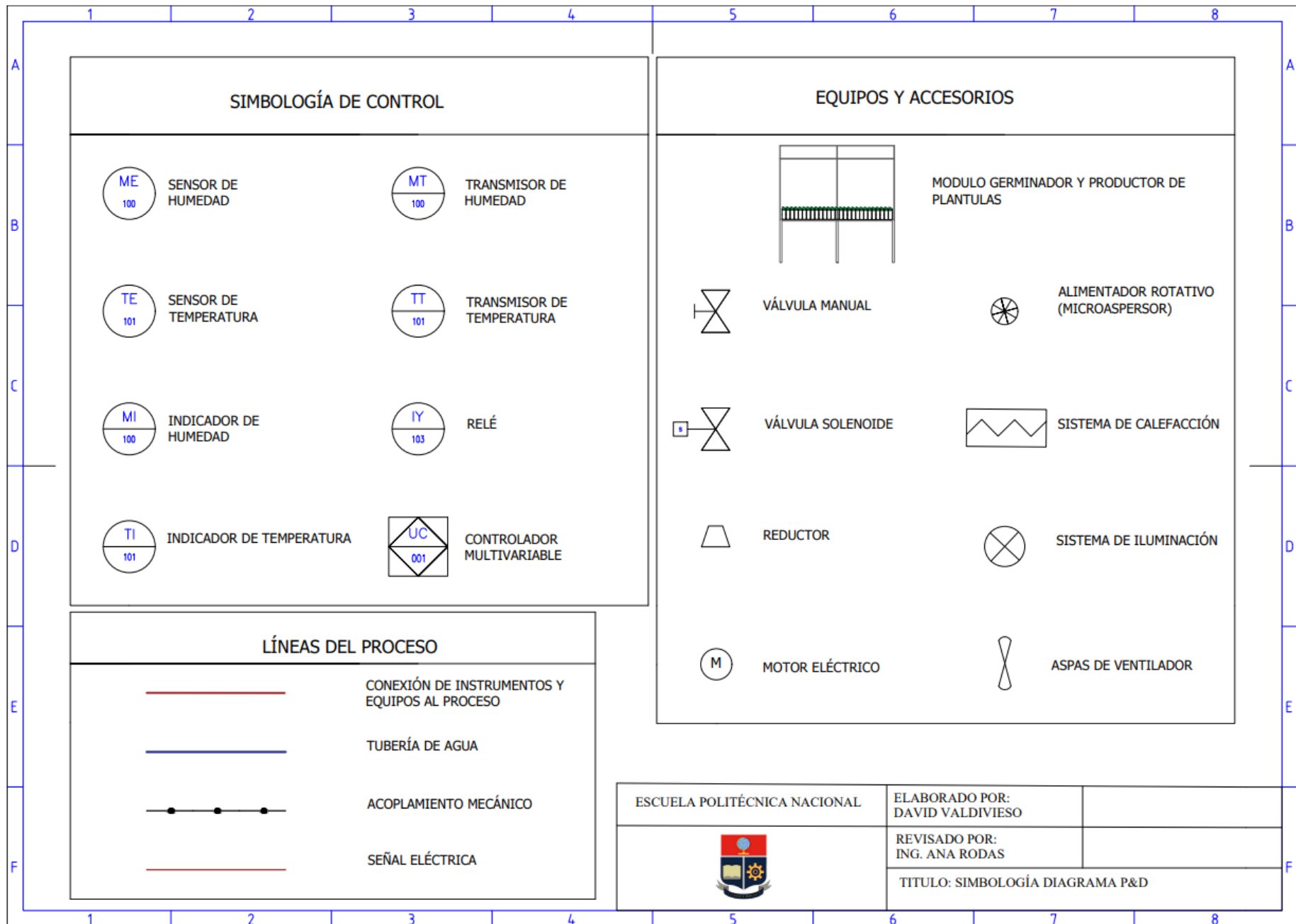


Figura 3.1. Simbología Diagrama P&D

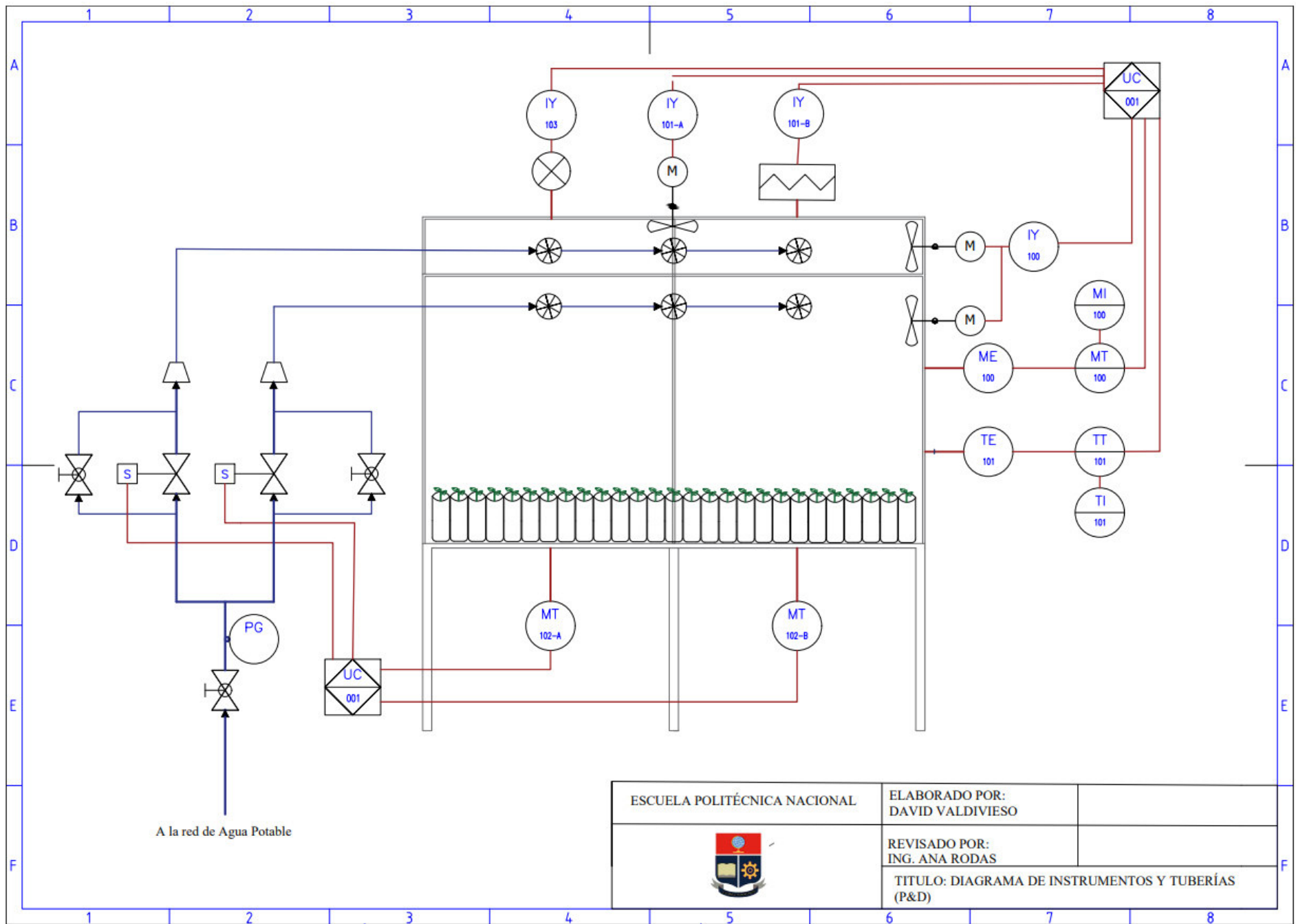


Figura 3.2. Diagrama P&D

3.1. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL TABLERO DE CONTROL Y CABLEADO DEL MÓDULO.

3.1.1. OBJETIVOS

- Constatar el funcionamiento de todos los elementos que componen el tablero de control: controlador, transmisores, relés, SSR, conexiones, luces piloto, selectores, fuente de alimentación y elementos de mando – protección.
- Verificar la correcta conexión de cada dispositivo dentro del módulo: sensores, transmisores, ventiladores, resistencias calefactoras, luminarias y válvulas solenoides.

3.1.2. MATERIALES

- Moduló Productor y Germinador de Plántulas ensamblado en su totalidad.
- Tablero de control implementado.
- Computador.
- Multímetro

3.1.3. METODOLOGÍA DE LA PRUEBA

Para observar el correcto funcionamiento de las conexiones se realizaron pruebas de continuidad en cada sección cableada del tablero de control. actuador, sensor y transmisor con la ayuda de un multímetro.

Después, se energizó el módulo observando el funcionamiento de los elementos de mando y protección implementados (Interruptor Diferencial, Termomagnéticos para control y potencia), se verificó el voltaje de la fuente de alimentación (24v).

La comprobación de los accionadores del tablero de control se realizó forzando las salidas del controlador desde la interfaz Logo Soft Confort utilizando la funcionalidad de test online; primero sin energización de la parte de potencia, donde se observó el funcionamiento de Relés, SSR, bobinas solenoides y Luces Piloto; posteriormente se energizó la parte de control para revisar la activación de ventiladores, luminarias y resistencias calefactoras.

La comprobación de selectores, sensores y transmisores se realizó observando el estado de entradas en el controlador Logo de Siemens.

3.1.4. RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 3.1. se visualiza cada elemento que se encuentra dentro del tablero de control, se determinó el correcto funcionamiento observando su funcionalidad, por ejemplo, luces piloto encendidas, continuidad en terminales NA al energizar relés, cambio de estado de entradas ante movimientos de selectores, etc.

Tabla 3.1. Funcionamiento de Elementos del Tablero de Control

Elemento	Etiqueta	Conexión Correcta		Funcionamiento	
		Sí	No	Sí	No
Selector 2 Posiciones	SF1	Sí	No	Sí	No
Selector 2 Posiciones	SF2	Sí	No	Sí	No
Selector 2 Posiciones	SF3	Sí	No	Sí	No
Selector 3 Posiciones	SH1	Sí	No	Sí	No
Selector 3 Posiciones	SH2	Sí	No	Sí	No
Piloto Verde	EA1	Sí	No	Sí	No
Piloto Roja	EA2	Sí	No	Sí	No
Piloto Verde	EA3	Sí	No	Sí	No
Piloto Verde	EA4	Sí	No	Sí	No
Piloto Verde	EA5	Sí	No	Sí	No
Piloto Verde	EA6	Sí	No	Sí	No
Relé Mecánico	K1	Sí	No	Sí	No
Relé Mecánico	K2	Sí	No	Sí	No
Relé Mecánico	K3	Sí	No	Sí	No
Relé de Estado Solido	K4	Sí	No	Sí	No
Fuente de Alimentación 24Vdc	GB1	Sí	No	Sí	No
Interruptor Diferencial	QA1	Sí	No	Sí	No
Termomagnético C10	QA2	Sí	No	Sí	No
Termomagnético C6	QA3	Sí	No	Sí	No
Fusible 1 A (gG)	FC1	Sí	No	Sí	No
Fusible 1 A (gG)	FC2	Sí	No	Sí	No
Fusible 1 A (gG)	FC3	Sí	No	Sí	No
Fusible 6 A (aR)	FC4	Sí	No	Sí	No

En la Tabla 3.2 se visualizan los dispositivos conectados en las entradas del controlador logo 8, el cambio de estado en entradas del controlador se observa mediante el software Logo Soft Comfort y el funcionamiento en el caso de los transmisores se define visualizando

los cambios ante variaciones de las variables físicas; en el caso de selectores con el cambio de posición.

Tabla 3.2. Funcionamiento de dispositivos de entrada al controlador

Dispositivo	Tipo de Entrada	Bornes Entrada Logo	Cambio de Estado en Entradas del Controlador		Funcionamiento	
			Sí	No	Sí	No
Transmisor de Temperatura	Analógica (0-10v)	I1	Sí	No	Sí	No
Transmisor de Humedad Ambiental	Analógica (2-10v)	I2	Sí	No	Sí	No
Selector 2 Posiciones (SF3)	Digital	I3	Sí	No	Sí	No
Selector 3 posiciones (SH2-1)	Digital	I4	Sí	No	Sí	No
Selector 3 posiciones (SH2-1)	Digital	I5	Sí	No	Sí	No
Selector 3 posiciones (SH1-1)	Digital	I6	Sí	No	Sí	No
Transmisor humedad Suelo A	Analógica (0-10v)	I7	Sí	No	Sí	No
Transmisor humedad Suelo B	Analógica (0-10v)	I8	Sí	No	Sí	No
Selector 3 posiciones (SH1-1)	Digital	I9	Sí	No	Sí	No
Selector 2 Posiciones (SF2)	Digital	I10	Sí	No	Sí	No

En la tabla 3.3. se observan los dispositivos conectados a las salidas del controlador, se analizó el comportamiento de los dispositivos al forzar las salidas del controlador y se determinó el correcto funcionamiento de los dispositivos verificando su funcionalidad, en este caso el calentamiento de resistencias calefactoras, el flujo de agua en las tuberías donde se encuentran las válvulas, el encendido de las luces piloto, el movimiento de las aspas de los ventiladores y. el encendido de luminarias

Tabla 3.3. Funcionamiento de dispositivos de salida del controlador

Dispositivo	Tipo de Salida	Accionadores	Bornes Salida Logo	Energización al forzar salidas del controlador		Funcionamiento de Dispositivos	
				Sí	No	Sí	No
Resistencias Calefactoras	Digital / Transistor	SSR	Q1	Sí	No	Sí	No
Luz Piloto Verde	Digital / Transistor	-	Q2	Sí	No	Sí	No
Luz Piloto Roja	Digital / Transistor	-	Q3	Sí	No	Sí	No

Extractor de Aire / Ventilación Forzada	Digital / Transistor	Relé	Q4	Sí	No	Sí	No
Luminarias	Digital / Relé	Relé	Q5	Sí	No	Sí	No
Ventilador	Digital / Relé	Relé	Q6	Sí	No	Sí	No
Válvula Solenoide Zona B	Digital / Relé	Bobina Solenoide	Q7	Sí	No	Sí	No
Válvula Solenoide Zona A	Digital / Relé	Bobina Solenoide	Q8	Sí	No	Sí	No

3.2. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

3.2.1. OBJETIVOS

- Constatar el funcionamiento de sensores, transmisores, conversor A/D y guardado de datos.
- Verificar los datos adquiridos de temperatura-humedad por el sistema de adquisición de datos y compararlos con un dispositivo de medida calibrado.
- Verificar los datos adquiridos de humedad suelo A/B por el sistema de adquisición de datos, al realizar una prueba de riego en fundas de cultivo con sustrato.

3.2.2. MATERIALES

- Modulo Productor y Germinador de Plántulas ensamblado en su totalidad.
- Tablero de control implementado.
- Sistema de Adquisición de datos Implementado.
- Computador.
- Termohigrómetro.
- Funda de Cultivo (10x7cm y 10x15 cm).
- Sustrato

3.2.3. METODOLOGÍA DE LA PRUEBA

Para iniciar la prueba se configuró el almacenamiento de datos del sistema con un periodo de 1 minuto para las cuatro variables físicas adquiridas por el módulo (Temperatura Ambiental, Humedad Relativa, Humedad Suelo Zona A y Humedad Suelo Zona B), se comparó los datos de temperatura ambiental y humedad relativa con un termohigrómetro digital durante 30 minutos. Los transmisores de humedad suelo no se compararon con otros dispositivos debido a que el fabricante entrega garantía de dispositivos calibrados.

Finalmente, se probó los transmisores de humedad suelo colocándolos dentro de las fundas de cultivo con sustrato en punto de marchitez permanente y se realizó un riego manual de las mismas, para observar la dinámica en la variable física con mayor detalle se cambió el periodo de adquisición de datos a 10 segundos.

3.2.4. RESULTADOS OBTENIDOS

3.2.4.1. Temperatura Ambiental

En la Figura 3.1 se visualizan los datos obtenidos en una prueba de 30 minutos donde se observó la temperatura adquirida por el sistema implementado y el dato del termohigrómetro digital, se observa que las temperaturas mantienen la misma forma y el error promedio presente es de 2,05%.

Tabla 3.4. Error Temperatura Ambiental

Tiempo [min]	Temperatura Termo higrómetro	Temperatura Adquirida	Error Relativo
0	20,9	20,4	2,39%
1	21	20,5	2,38%
2	20,7	20,2	2,42%
3	20,8	20,3	2,40%
4	20,6	20,1	2,43%
5	20,6	20,3	1,46%
6	20,5	20,2	1,46%
7	20,4	20,1	1,47%
8	20,5	20	2,44%
9	20,6	20,1	2,43%
10	20,4	20	1,96%
11	20,6	20,2	1,94%

12	20,8	20,5	1,44%
13	20,9	20,6	1,44%
14	21	20,6	1,90%
15	20,9	20,6	1,44%
16	20,9	20,5	1,91%
17	20,8	20,6	0,96%
18	21,2	20,8	1,89%
19	21,2	20,8	1,89%
20	21	20,6	1,90%
21	21,1	20,7	1,90%
22	21,1	20,7	1,90%
23	21,2	20,8	1,89%
24	21	20,6	1,90%
25	21,1	20,7	1,90%
26	21,3	20,6	3,29%
27	21,2	20,6	2,83%
28	21,1	20,7	1,90%
29	21,3	20,7	2,82%
30	21,5	20,8	3,26%
		Promedio	2,05%

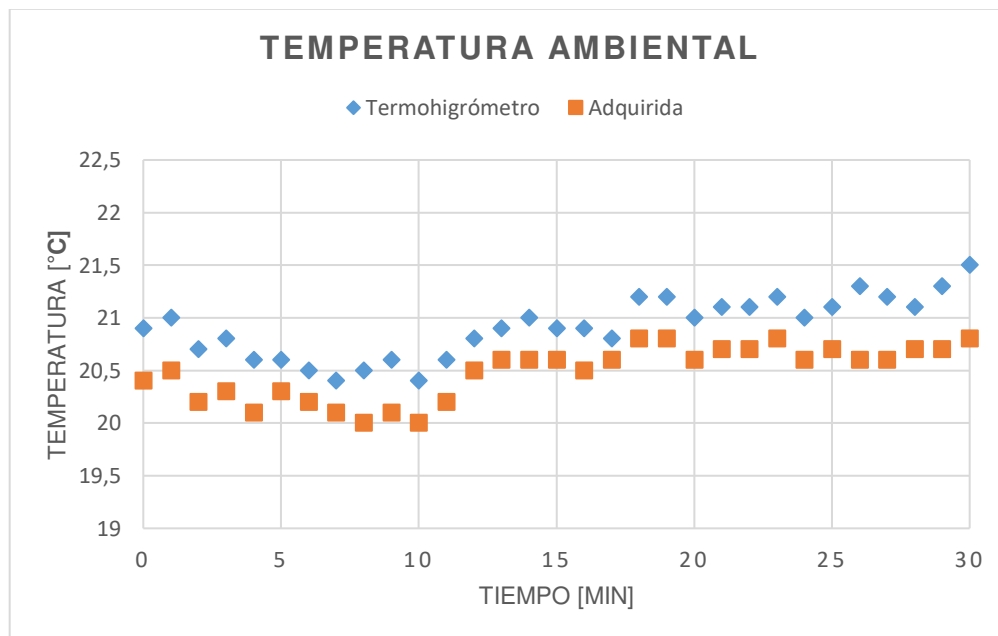


Figura 3.4. Temperatura Adquirida vs Temperatura Termohigrómetro

3.2.4.2. Humedad Relativa

En la Figura 3.5 se visualizan los datos obtenidos en una prueba de 30 minutos donde se observó la humedad relativa adquirida por el sistema implementado y el dato del termohigrómetro digital, se observa que las humedades mantienen la misma forma y el error promedio presente es de 1,07%

Tabla 3.5. Error Humedad Relativa

Tiempo [min]	Humedad Termo higrómetro	Humedad Adquirida	Error Relativo
0	81	82,3	1,60%
1	80,5	82	1,86%
2	80,6	81,7	1,36%
3	80,3	81,4	1,37%
4	79,8	80,5	0,88%
5	80,3	81	0,87%
6	79,8	80,7	1,13%
7	79,4	80,2	1,01%
8	79,5	80,5	1,26%
9	79,8	80,9	1,38%
10	79,6	80,5	1,13%
11	79,8	80,5	0,88%
12	79,9	80,4	0,63%
13	79,9	80,4	0,63%
14	79,7	80,1	0,50%
15	79,6	80	0,50%
16	79	79,5	0,63%
17	79,3	80	0,88%
18	79,2	80,3	1,39%
19	79	80	1,27%
20	79	79,8	1,01%
21	79,2	80	1,01%
22	79,2	80	1,01%
23	78,8	79,9	1,40%
24	78,5	79,8	1,66%
25	78,5	79,5	1,27%
26	78,4	79	0,77%
27	78	78,9	1,15%
28	78,2	78,9	0,90%
29	78,4	79,4	1,28%
30	78,5	78,9	0,51%
		Promedio	1,07%

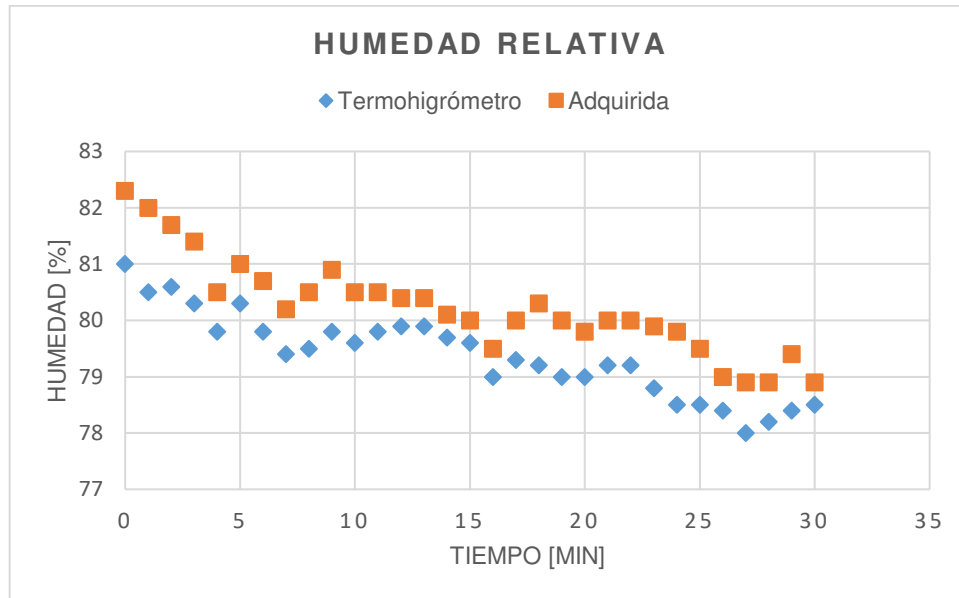


Figura 3.5. Humedad Relativa Adquirida vs Humedad Relativa Termohigrómetro

3.2.4.3. Humedad Suelo

En las Figuras 3.6 y 3.7 se observan los resultados de las pruebas realizadas al transmisor de humedad suelo implementado en el sistema, se puede visualizar el correcto funcionamiento ya que presenta un pico de humedad acorde a la prueba sometida.

La prueba se realizó con dos diferentes tamaños de fundas de cultivo, 10x7cm para el transmisor de la Zona A y 10x15 cm para el transmisor de la Zona B.

La Humedad del Suelo en la Zona A se observa en la Figura 3.3., se puede apreciar como al regar hasta el punto de saturación, el porcentaje de humedad volumétrico del sustrato que está en contacto con la sonda de medición sube a 52% y luego del drenaje del excedente se mantiene alrededor de 42%.

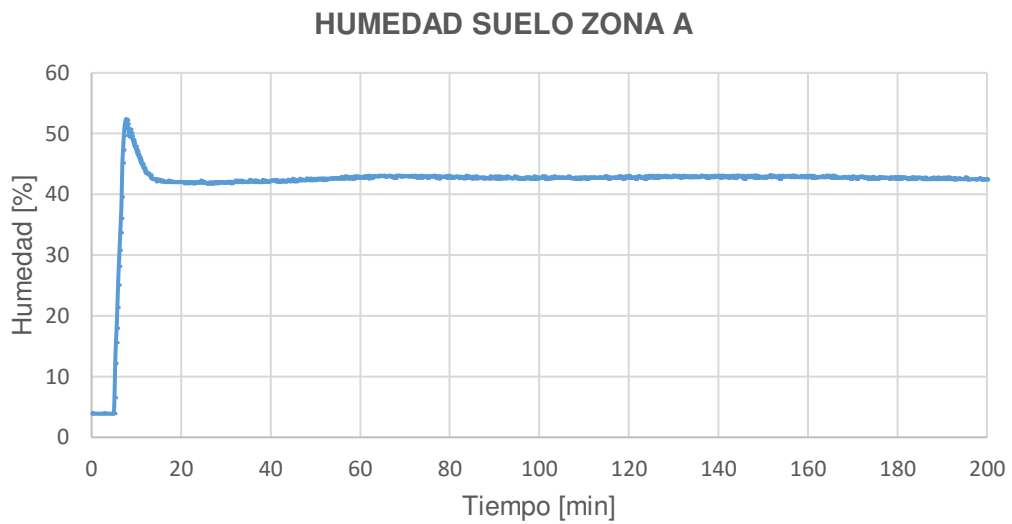


Figura. 3.6. Humedad Suelo A sometida a prueba de riego.

La Humedad del Suelo en la Zona B se observa en la Figura 3.7., se puede apreciar como al regar hasta el punto de saturación, el porcentaje de humedad volumétrica del sustrato que está en contacto con la sonda de medición sube a 50% y luego del drenaje del excedente se mantiene alrededor de 35%.

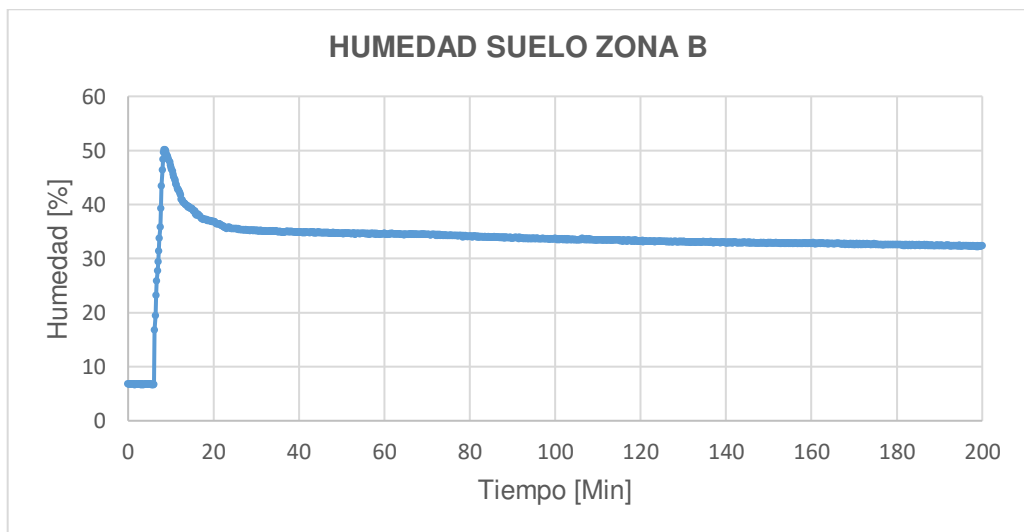


Figura. 3.7. Humedad Suelo B sometida a prueba de riego.

3.2.5. DISCUSIÓN

En esta prueba se determinó que el sistema guarda los datos en el periodo configurado y sin errores, también se revisó el funcionamiento de los transmisores de humedad suelo al realizar una prueba de riego en sustrato desde el punto de marchitez permanente hasta la capacidad de campo.

Se determinó que los procesos de medición, acondicionamiento, transmisión y adquisición de datos se realizan correctamente, los datos adquiridos de temperatura ambiental y humedad relativa comparados con un instrumento de medida calibrado, tienen la misma forma y presentan un pequeño error el cual es considerado despreciable para esta aplicación.

3.3. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL EN LÍNEA

3.3.1. OBJETIVOS

- Constatar el funcionamiento de los controladores implementados.
- Verificar que las variables físicas: temperatura ambiental, humedad relativa y humedad suelo, se mantengan en los rangos configurados para cada controlador.
- Sintonizar el controlador PI y constatar su correcto funcionamiento para mantener la temperatura dentro del módulo por las noches.
- Comprobar el correcto funcionamiento de los sistemas de control temporizado (Riego e Iluminación)
- Verificar que las variables físicas dentro del módulo no entren a rangos inseguros

3.3.2. MATERIALES

- Módulo Productor y Germinador de Plántulas ensamblado en su totalidad.
- Tablero de control implementado.
- Sistema de Adquisición de datos Implementado.
- Sistema de Control en línea
- Computador.
- Cultivos de Prueba

3.3.3. METODOLOGÍA DE LA PRUEBA

Esta prueba se realizó en varias etapas, primero comprobando el funcionamiento individual de cada variable a controlar (temperatura, humedad relativa y humedad suelo) y posteriormente se activando todos los controles simultáneamente para observar el comportamiento del sistema final implementado.

La prueba del control de temperatura comenzó sintonizando del controlador PI, para ello se obtuvo la curva de reacción realizando una perturbación en el módulo (resistencias de calefacción encendidas), luego se aproximó a un modelo de primero orden con retardo usando el método de dos puntos de Smith, después se encontraron las constantes del regulador mediante Dahlin, finalmente se probó el sistema y se lo sometido a cambios de valores de referencia y perturbaciones propias de esta aplicación (riego de plántulas). Durante el día se comprobó que la temperatura se mantenga en el rango asignado que es desde 23 hasta 35 grados centígrados

La prueba de control de riego comenzó con encontrar los límites de humedad suelo para las fundas de cultivo que posteriormente se utilizaran en las pruebas con plántulas reales, para ello se realizó un ensayo similar al anterior donde se riega desde el punto de marchitez permanente (sustrato seco) hasta el punto de saturación, luego se observa el comportamiento a lo largo de los días. Con los datos obtenidos se configuro el controlador y se observó su comportamiento en las fundas de cultivo de prueba colocadas.

La prueba de control de riego e iluminación temporizado consistió en observar la activación de los dispositivos (luminarias y válvulas) en los horarios configurados.

Se comprobó el control de ventilación y extracción de aire observando la activación de los ventiladores axiales según las configuraciones asignadas.

La prueba de control de humedad relativa consistió en observar la activación del sistema de ventilación y extracción de aire al elevarse la variable fuera del valor configurado.

Finalmente, se realizó una prueba de varios días con todos los sistemas de control funcionando al mismo tiempo para observar su comportamiento.

3.3.3.1. Sintonización de PI

El control está dividido en dos secciones, un controlador por histéresis que comanda la ventilación y extracción de aire (durante el día) y un controlador PI que regula la temperatura principalmente por las noches.

A continuación, se observa el procedimiento para encontrar las constantes del modelo de primer orden con retardo que se observa la ecuación 3.1, con el método de Smith.

El punto inicial de la temperatura dentro del módulo es de 16,2 °C y el punto donde se estabiliza ante la perturbación es de 19,8 °C, se realiza todos los cálculos en $[10 \times \text{°C}]$ debido a que el controlador trabaja solo con valores enteros.

Las ecuaciones 3.2 y 3.3 permiten encontrar los puntos necesarios para realizar el modelado. En la Figura 3.8. se observa la curva de reacción resultante al encender las resistencias calefactoras, también se visualizan los puntos encontrados al 28,3% y 63,2%, los cuales sirven para determinar el modelo de primer orden con retardo usando el método de dos puntos de Smith.

$$G_p(s) = \frac{k_p * e^{-\theta*s}}{\tau * s + 1} \quad (3.1)$$

$$t(0) = 161$$

$$y(\text{inicial}) = 161$$

$$y(\text{final}) = 198$$

$$y(1) = 0.283 * (y(\text{final}) - y(\text{inicial})) + y(0) \quad (3.2)$$

$$y(2) = 0.632 * (y(\text{final}) - y(\text{inicial})) + y(0) \quad (3.3)$$

$$y(1) = (0.283 * 37) + 161 = 171,4$$

$$y(2) = (0.632 * 37) + 161 = 184,3$$

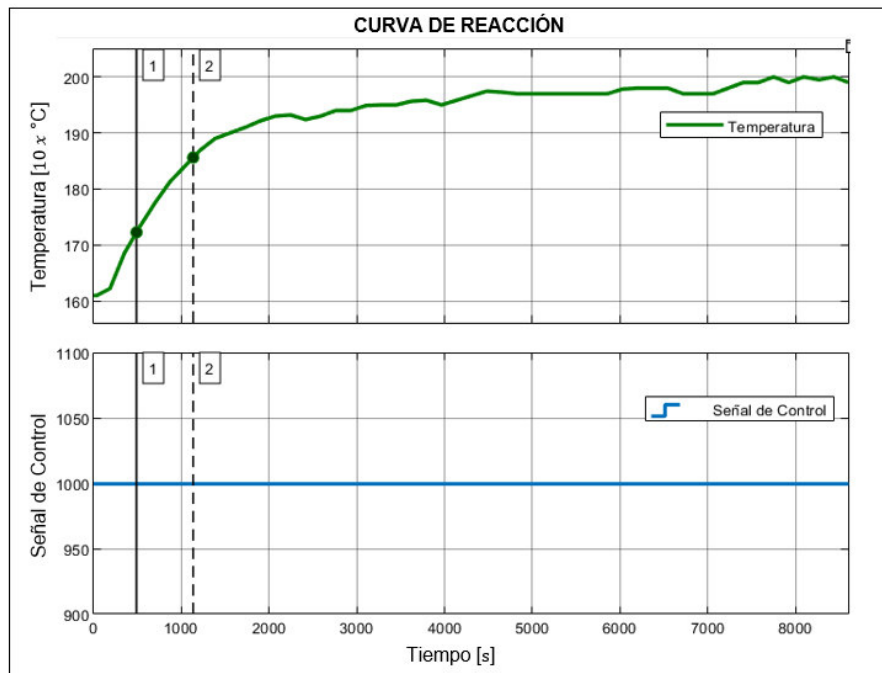


Figura 3.8. Curva de reacción

En la tabla 3.6, se encuentran descritos los puntos al 28,3% y 63,2% de la curva de reacción de la temperatura sometida a la perturbación.

Tabla 3.6. Puntos para modelado

Punto	Tiempo	Valor Temperatura
1 (28,3%)	490s	171,4
2 (63,2%)	1135s	184,3

Se debe considerar el tiempo transcurrido desde la perturbación, en este caso $t_0 = 320$ segundos este tiempo fue tomado desde que se encendió las resistencias calefactoras hasta observar una variación en la temperatura dentro del módulo.

Las ecuaciones siguientes son las que se utilizan para encontrar los parámetros del modelo; el tiempo inicial t_1 y t_2 se obtiene restando el valor de tiempo encontrado mediante cursores en la curva de reacción de la Figura 3.8 con el valor t_0 , pero se toma en cuenta que en el gráfico no se presenta todo el tiempo transcurrido desde la perturbación, solamente 12 segundos del total de 320 segundos.

$$t_1 = 490 - 12 = 478$$

$$t_2 = 1135 - 12 = 1123$$

$$\tau = 1.5(t_2 - t_1) = 1.5(1123 - 478) = 967.5 \quad (3.4)$$

$$\theta = t_2 - \tau = 1123 - 967.5 = 155.5 \quad (3.5)$$

$$k_p = \frac{\Delta}{\delta} = \frac{37}{1000} = 0.037 \quad (3.6)$$

$$Gp(s) = \frac{0.037 * e^{-155*s}}{967.5 * s + 1} \quad (3.7)$$

En la ecuación 3.9 se encuentra el modelo del sistema y en la Figura 3.6. se visualiza la validación del mismo, donde se observa que tienen similar forma y retraso.

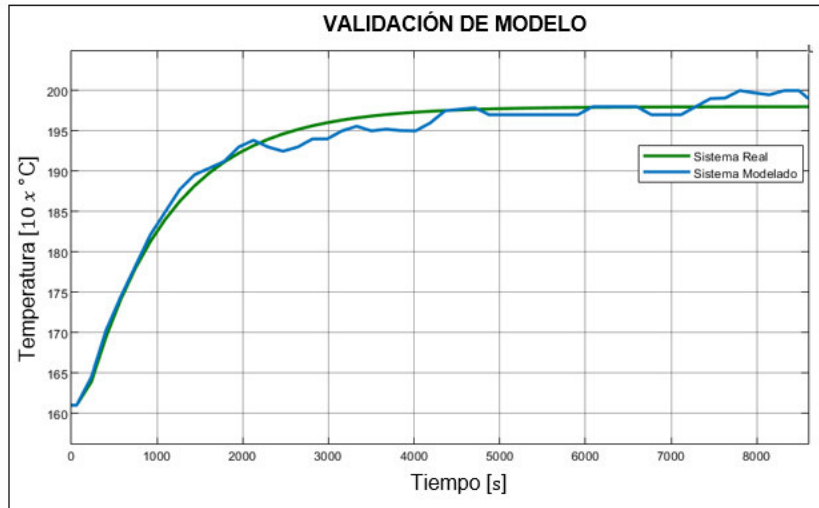


Figura 3.9. Validación del Modelo

Finalmente, en las ecuaciones 3.8 y 3.9 se encuentran los parámetros del regulador PI mediante las ecuaciones de Dahlin.

$$K_c = \frac{1}{2K} \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{-1} = \frac{1}{2 \times 0.037} \left(\frac{320}{967.5} \right)^{-1} \rightarrow P = K_c = 40.85 \quad (3.8)$$

$$T_i = \tau = 967.5 \rightarrow I = \frac{K_c}{T_i} = 0.042 \quad (3.9)$$

3.3.4. RESULTADOS OBTENIDOS

3.3.4.1. Control de Temperatura

En la Figura 3.10 se observan los resultados al activar el control de temperatura por la noche cuando la temperatura se encontraba a 16,1 grados centígrados ingresando un valor referencial de 23 grados centígrados, se visualiza un correcto funcionamiento del controlador debido a que lo largo de toda la noche e inicio de la mañana se mantuvo la temperatura en el valor de referencia

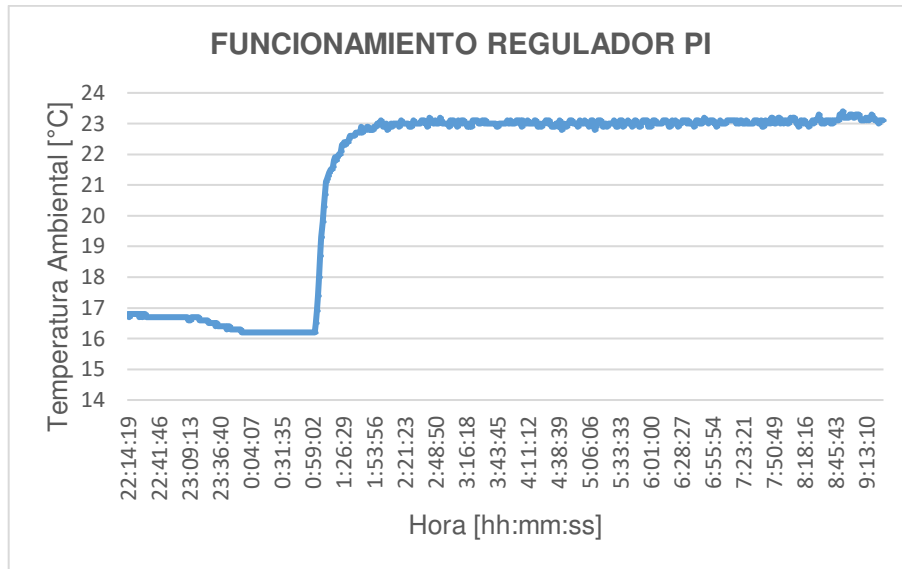


Figura 3.10. Funcionamiento del Regulador PI

En la Figura 3.11 se observa el comportamiento del regulador PI al ser sometido a una perturbación (riego mediante nebulización de las plántulas). La línea en color naranja corresponde a la humedad del suelo y la línea en color azul a la temperatura, el momento que inicio el riego (0:09:57) y en el que finaliza (0:30:17), se observa variaciones en la temperatura que se compensan por el regulador PI.

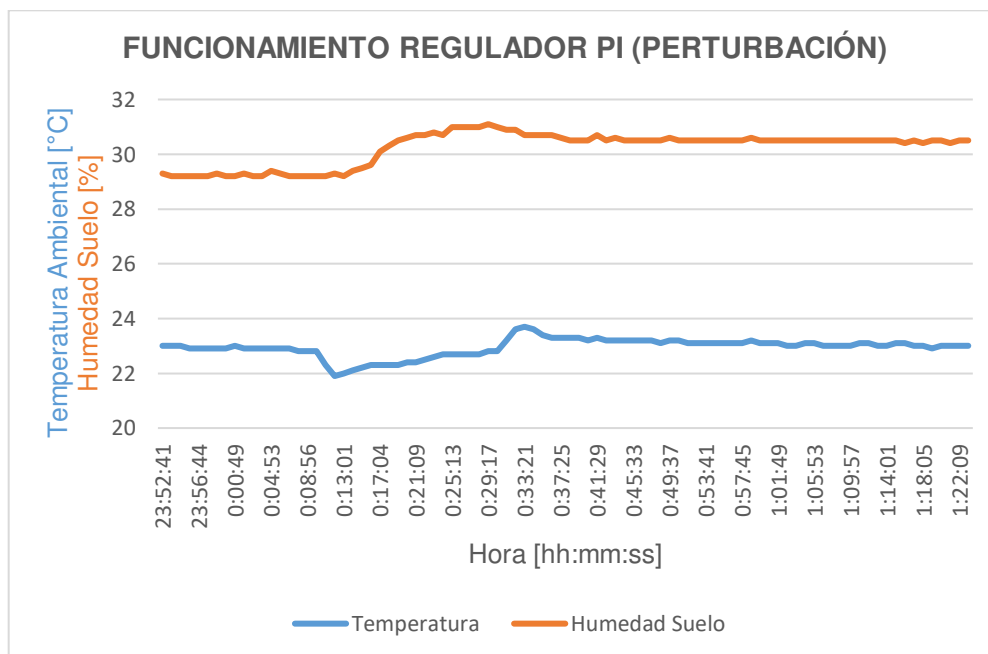


Figura 3.11. Funcionamiento de Regulador PI ante Perturbación

En la Figura 3.12 se aprecia el funcionamiento del regulador PI ante cambios de valores de referencia.

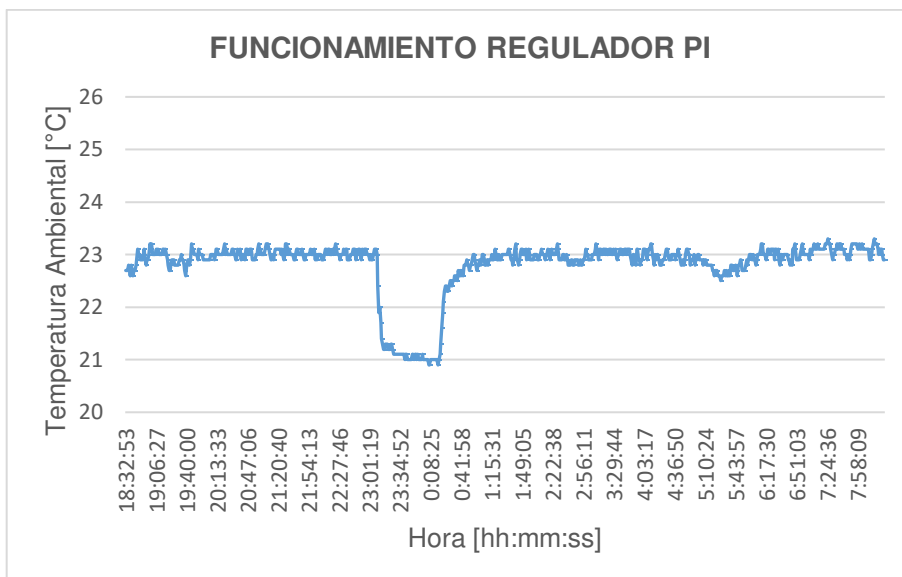


Figura 3.12. Funcionamiento de Regulador PI ante cambios de Valores de referencia

En la Figura 3.13 se observa el control de temperatura implementado a lo largo de tres días. Se observan las dos partes de la lógica de control funcionando, en la noche el regulador PI manteniendo la temperatura en el valor de referencia (23 grados centígrados) y durante el día el control de histéresis que evita que aumente excesivamente la temperatura dentro del módulo. Para esta prueba se configuró la temperatura máxima de 35 °C y temperatura ideal durante el día de 33 °C.

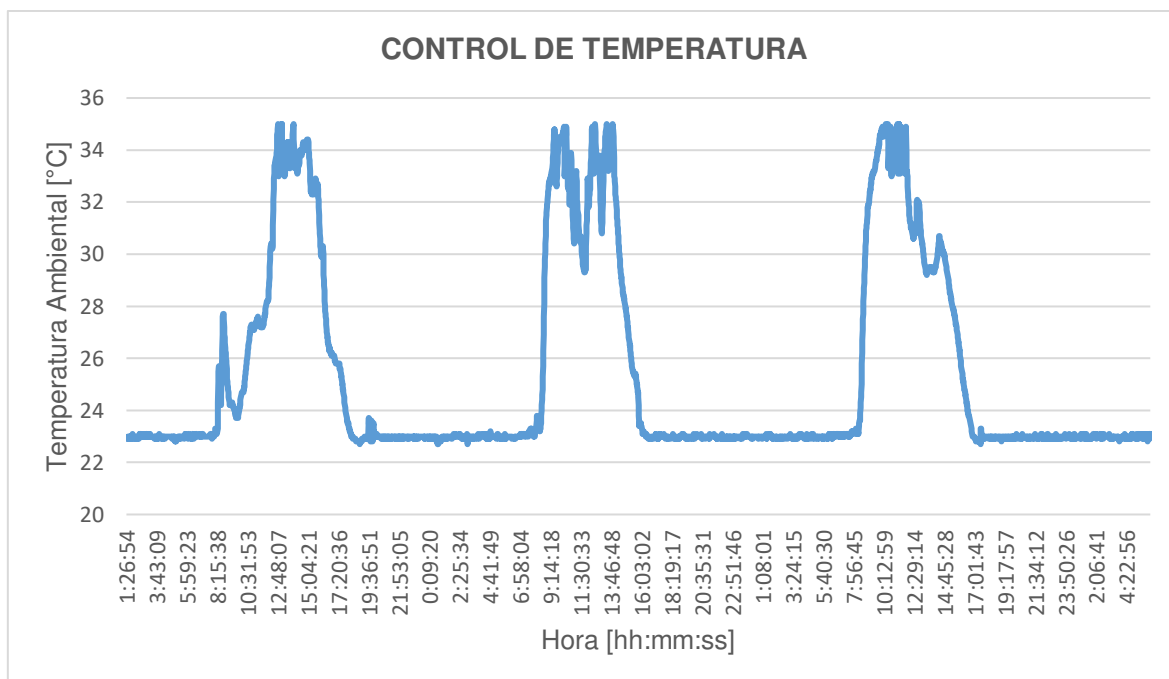


Figura 3.13. Control de Temperatura

3.3.4.2. Control de Humedad Suelo

Riego por Demanda

En la Tabla 3.7. se observan los resultados al realizar la prueba de riego para determinar la capacidad de campo, el punto máximo de humedad y el punto de marchitez permanente, estos datos permiten asignar límites seguros de humedad suelo en el controlador para beneficio de las plántulas y generar un riego eficiente.

Tabla 3.7. Resultados Prueba de Humedad en Sustrato

Funda de Cultivo (10x7cm)	Humedad Suelo Zona A
Punto máximo de Humedad (Saturación)	52,20%
Punto de Humedad luego de un día de Riego (Capacidad de Campo)	40,00%
Punto mínimo de Humedad (Punto de Marchitez Permanente)	6,40%
Funda de Cultivo (10x15cm)	Humedad Suelo Zona B
Punto máximo de Humedad (Saturación)	50,20%
Punto de Humedad luego de un día de Riego (Capacidad de Campo)	31,90%
Punto mínimo de Humedad (Punto de Marchitez Permanente)	4,20%

Tomando en cuenta los resultados de la Tabla 3.7. y la opinión de expertos, se ha asignado el umbral de riego que se observa en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Umbral de Riego

Tamaño de Funda	Límite Inferior [%]	Límite Superior [%]
10x7cm	25	35
10x15cm	20	35

En la Figura 3.14, se observa la señal obtenida de humedad suelo en la Zona A, donde se encuentra la funda de cultivo de 10x7cm. Se puede apreciar claramente el funcionamiento del control por histéresis implementado, también se determina que, al ser una funda de cultivo pequeña, mantiene de mejor forma el agua y se riega automáticamente alrededor de 3 veces diarias.

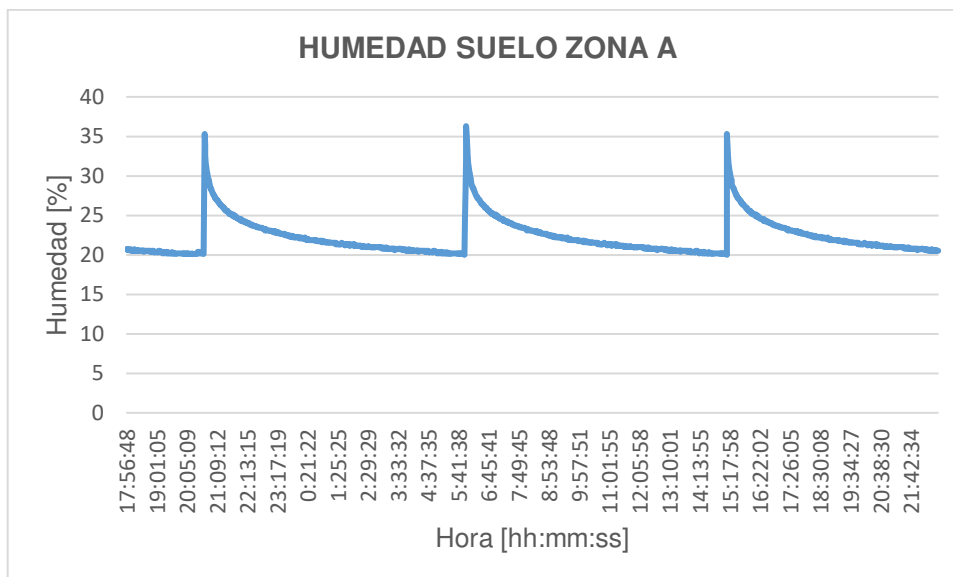


Figura 3.14. Humedad Suelo Zona A (Histéresis 20-35%)

En la Figura 3.15, se observa la señal obtenida de humedad suelo en la Zona B, donde se encuentra la funda de cultivo de 10x15cm, se puede apreciar claramente el funcionamiento del control por histéresis implementado, también se determina que, al ser una funda de cultivo mediana, se necesita una mayor frecuencia de riego para que se mantengan en los rangos configurados la humedad del suelo.

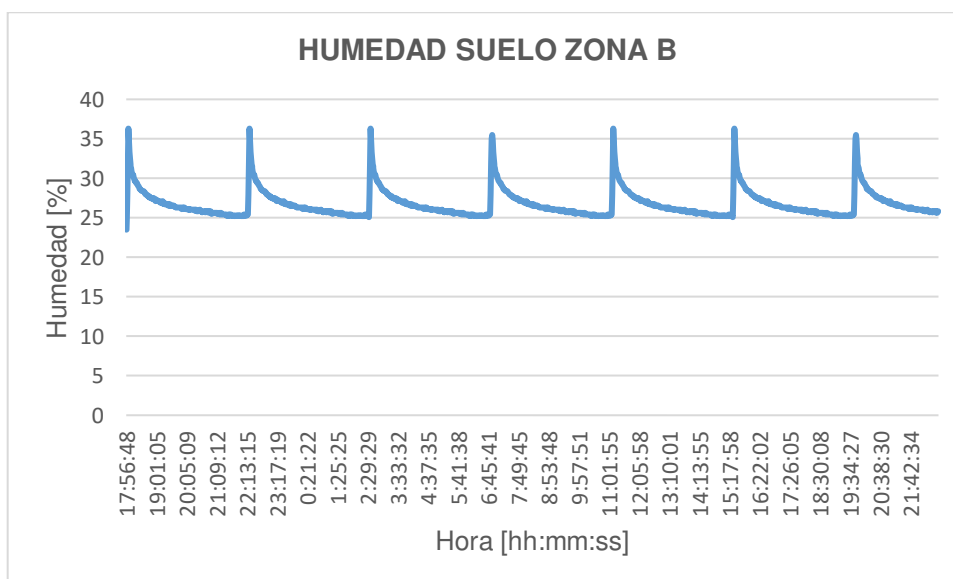


Figura 3.15. Humedad Suelo Zona B (Histéresis 25-35%)

Riego Temporizado

En la Tabla 3.9, se describen tres pruebas realizadas para observar la activación de las válvulas solenoides en los horarios configurados.

Tabla. 3.9. Funcionamiento del Control de Riego Temporizado

Prueba	Horario	Hora de Conexión	Hora de Desconexión	Funcionamiento Válvula Zona A		Funcionamiento Válvula Zona B	
1	Lunes Miércoles Viernes	20h00	20h10	Sí	No	Sí	No
2	Martes Jueves Sábado	00h00	00h05	Sí	No	Sí	No
3	Todos los días	16h00	16h07	Sí	No	Sí	No

3.3.4.3. Control de Iluminación

En la Tabla 3.10, se describe el comportamiento del control de iluminación temporizado verificando el funcionamiento de las luminarias, se probó para los horarios configurables con los que cuenta el sistema.

Tabla. 3.10. Funcionamiento del Control de Iluminación Temporizado

Prueba	Horario 1	Hora de Conexión	Hora de Desconexión	Funcionamiento Luminarias	
1	Lunes Miércoles Viernes	20h00	22h00	Sí	No
2	Todos los días	08h00	09h00	Sí	No
Prueba	Horario 1	Hora de Conexión	Hora de Desconexión	Funcionamiento Luminarias	
1	Martes	18h00	20h00	Sí	No

	Jueves Sábado				
2	Todos los días	12h00	15h00	Sí	No

3.3.4.4. Control de Humedad Relativa

En la Tabla 3.11 se describen las pruebas realizadas, los valores referenciales configurados, el funcionamiento de ventiladores axiales y el comportamiento de la variable física dentro del módulo.

Tabla. 3.11. Funcionamiento del Control de Humedad Ambiental

Tiempo Activado	Tiempo desactivado	Cumple Horario	Funcionamiento de Sistema de Ventilación y Extracción de Aire		Comportamiento de Humedad Relativa
95%	40%		Sí	No	Al llegar a 95% se encienden los ventiladores axiales, pero el valor mínimo configurado no se alcanza sin presencia de radiación solar o calefacción (Ventiladores Funcionando en exceso)
95%	90%		Sí	No	Al llegar a 95% se encienden los ventiladores axiales, luego de un tiempo se apagan si la HR llega a 90%
70%	65%		Sí	No	Al llegar a 70% se encienden los ventiladores axiales, la desactivación depende en gran medida de las condiciones ambientales (lluvia, radiación solar)

3.3.4.5. Control de Ventilación y Extracción de Aire

En la Tabla 3.12 se observan las pruebas realizadas en el sistema de ventilación y extracción de aire, para ella se colocó el horario permitido todos los días de 10h00 a 16h00.

Tabla. 3.12. Funcionamiento del Control de Ventilación y Extracción de Aire

Tiempo Activado	Tiempo desactivado	Cumple Horario Permitido de Funcionamiento		Funcionamiento de Sistema de Ventilación y Extracción de Aire	
		Sí	No	Sí	No
5 min	120 min	Sí	No	Sí	No
3 min	60 min	Sí	No	Sí	No

3.3.4.6. Prueba de varios días con Sistemas de Control activos.

Esta prueba se llevó a cabo en conjunto con el ensayo de producir plántulas reales, para ello se colocó los valores de referencia de acuerdo a la Tabla 3.14.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en varios días con los sistemas de control activados (Temperatura, Humedad Ambiental, Riego por Demanda, Ventilación y Extracción de Aire)

En la Figura 3.16, se visualiza la temperatura ambiental, esta variable cumple con los valores configurados, no llega a rangos peligrosos y se puede observar los controladores correctamente, por las noches se observa perturbaciones causadas por el riego mediante nebulización de las plántulas.

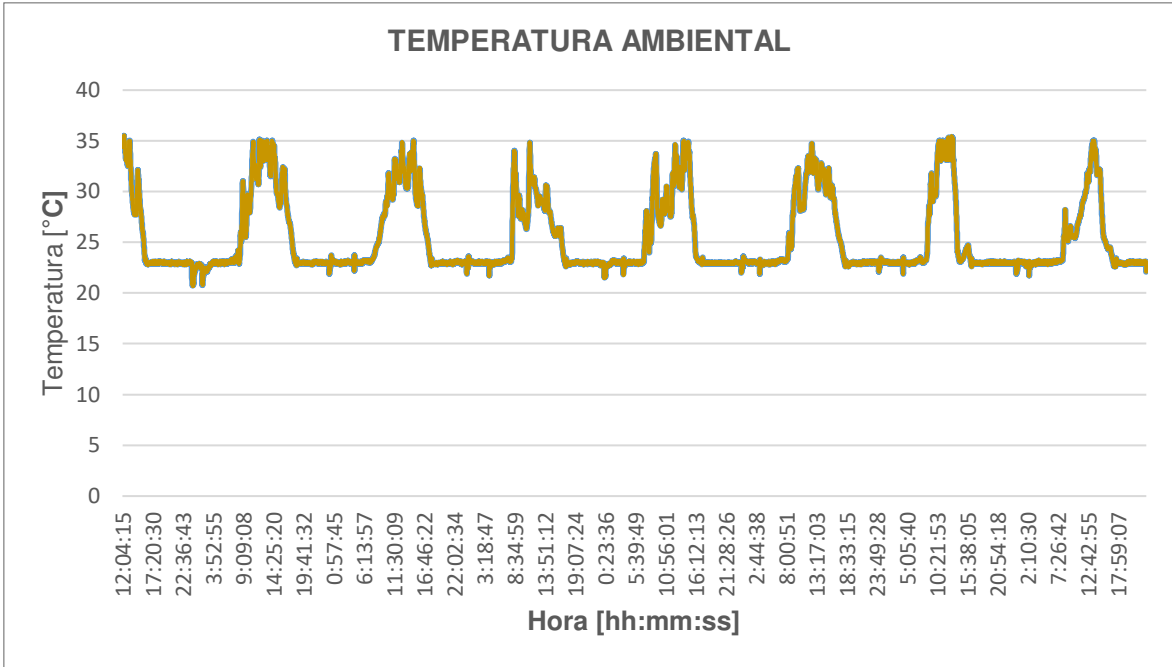


Figura 3.16. Temperatura Ambiental

La humedad del Suelo en la Zona A y Zona B observada en la Figura 3.17 y Figura 3.18 respectivamente, se mantienen en los rangos asignados, para esta prueba se configuro el riego de 00h10 a 04h20 con un tiempo máximo de una hora, dado que en este los emisores de agua colocados son nebulizadores el riego es más lento y genera picos de humedad relativa (Figura 3.19). Las fundas de cultivo utilizadas y las variables configuradas se describen detalladamente en las pruebas de control de riego (Sección 3.3.4.2)

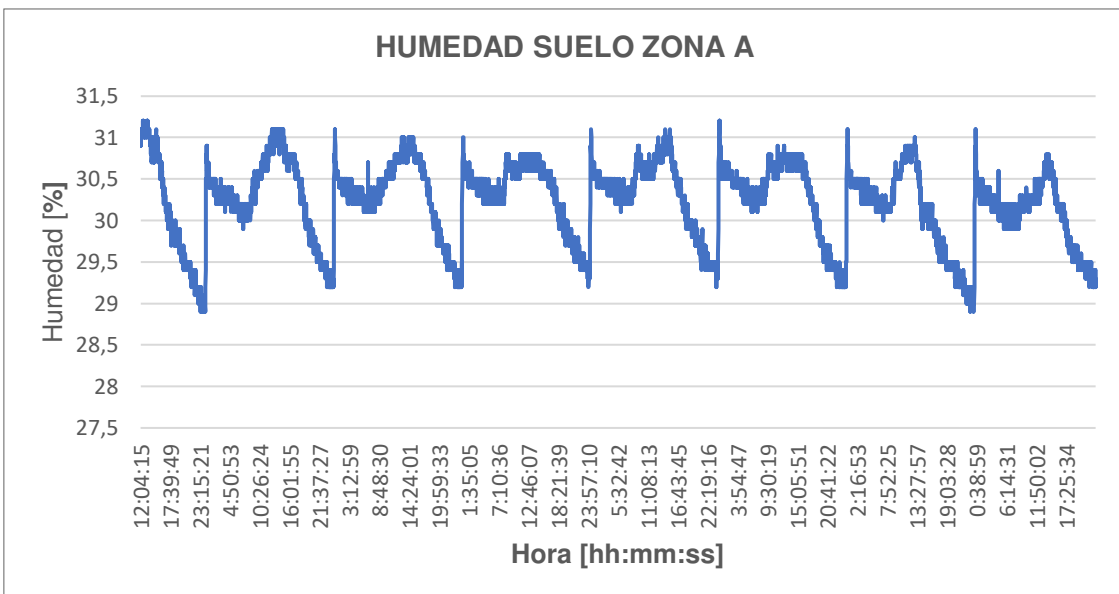


Figura 3.17. Humedad Suelo A

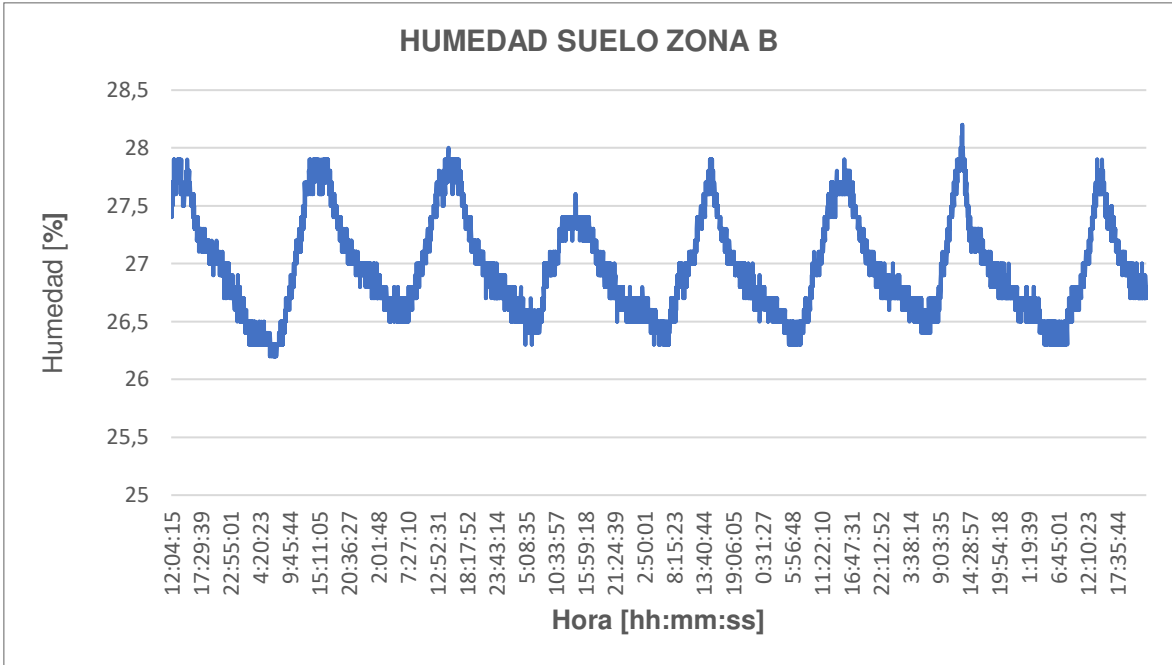


Figura 3.18. Humedad Suelo B

La humedad relativa dentro del módulo es una variable de control indirecto, se aprovecha la calefacción nocturna para evitar que llegue a rangos peligrosos. En la Figura 3.19 se observa como la forma de esta variable está relacionada con la temperatura ambiental observada en la Figura 3.16 y los picos que se visualizan por la noche relacionados con el riego. El control de humedad relativa mediante la activación del sistema de ventilación y extracción de aire tiene un horario de funcionamiento permitido solamente para el día (08h00 – 18h00) debido a la calefacción del módulo.

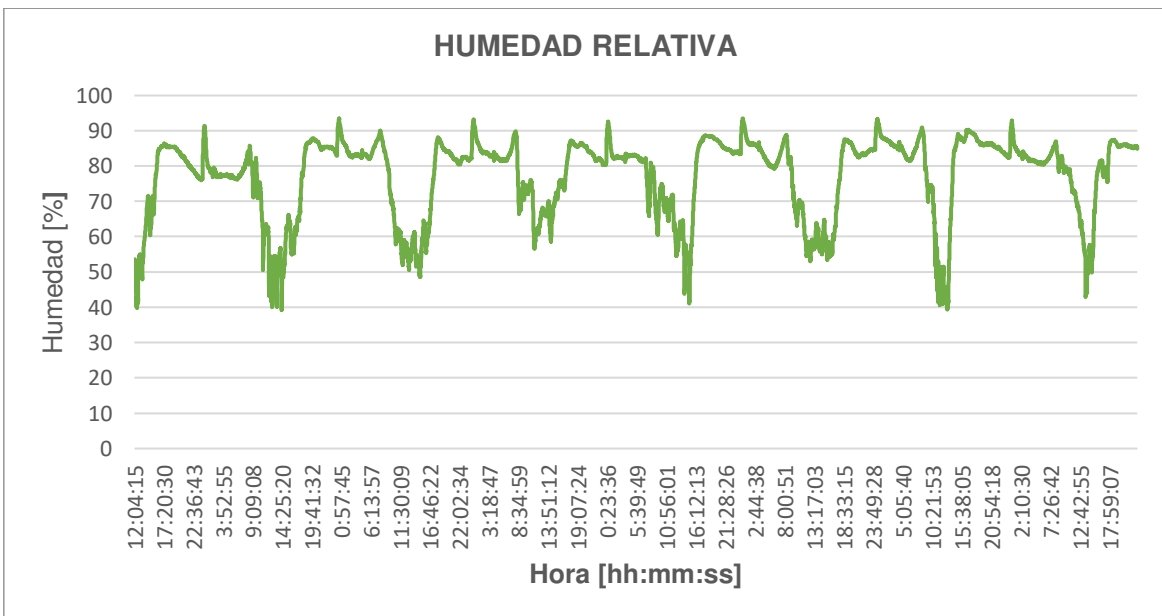


Figura 3.19. Humedad Relativa

3.3.5. DISCUSIÓN

Los controladores implementados funcionan correctamente y mantienen a las plántulas en rangos que permiten acelerar el crecimiento, las variables físicas temperatura ambiental, humedad relativa, humedad del suelo no llegan a rangos peligrosos en ningún momento mientras los sistemas de control están activos

El regulador PI de temperatura funciona correctamente sometido a condiciones propias de esta aplicación, Los controladores temporizados y las restricciones de horarios de funcionamiento permitido para los sistemas de control funcionan correctamente, El comportamiento de todos los elementos que integran el módulo tuvieron un gran desempeño y no presentaron fallas en un ensayo real de producción de plántulas.

3.4. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LA INTERFAZ HMI

3.4.1. OBJETIVOS

- Constatar el funcionamiento de la Interfaz HMI
- Verificar el envío y recepción de datos.
- Constatar el funcionamiento del Mando Local/Remoto

3.4.2. MATERIALES

-Módulo Productor de Plántulas completamente Implementado

-Computador

3.4.3. METODOLOGÍA DE LA PRUEBA

La prueba inicia al conectar mediante la interfaz ethernet la computadora al controlador Logo Siemens, luego se instala el archivo generado en el software Logo Web Editor modificando de este modo la interfaz del servidor web.

Se procede a hacer uso de la herramienta de test online del software Logo Soft Comfort para verificar el envío y recepción de datos.

Se observa el funcionamiento de luminarias, válvulas solenoides, ventiladores y resistencias calefactoras para verificar el funcionamiento del mando local/ remoto y los comandos para forzar el encendido de actuadores,

3.4.4. RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 3.13, se observa que todos los datos de valores configurables que tiene la interfaz HMI se envían y reciben correctamente.

Tabla 3.13. Verificación de envío y recepción de datos HMI

Función	Bloque Programación	Parámetro	Tipo	Dirección VM	Envío/ Recepción	
					Sí	No
Humedad Suelo Máxima Zona A	Conmutador analógico de valor umbral	ON	Word	2	Sí	No
Humedad Suelo Mínima Zona A	Conmutador analógico de valor umbral	OFF	Word	4	Sí	No
Humedad Suelo Máxima Zona B	Conmutador analógico de valor umbral	ON	Word	6	Sí	No
Humedad Suelo Mínima Zona B	Conmutador analógico de valor umbral	OFF	Word	8	Sí	No
Riego Temporizado / Zona A / Día de la Semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	10	Sí	No
Riego Temporizado / Zona A / Momento de Conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	11	Sí	No
Riego Temporizado / Zona A / Momento de Desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	13	Sí	No
Riego Temporizado / Zona B / Día de la Semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	15	Sí	No
Riego Temporizado / Zona B / Momento de Conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	16	Sí	No
Riego Temporizado / Zona B / Momento de Desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	18	Sí	No
Temperatura ideal Noche	Regulador PI	Consigna (SP)	Word	20	Sí	No
Temperatura Máxima día	Conmutador analógico de valor umbral	ON	Word	22	Sí	No
Temperatura Día	Conmutador analógico de valor umbral	OFF	Word	24	Sí	No

Horario Permitido Riego / Demanda / Día de la Semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	26	Sí	No
Horario Permitido Riego / Demanda / Momento de Conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	27	Sí	No
Horario Permitido Riego / Demanda / Momento de Desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	29	Sí	No
Humedad Ambiental/ Horario Permitido/ Día de la semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	31	Sí	No
Humedad Ambiental/ Horario Permitido/ Momento de conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	32	Sí	No
Humedad Ambiental/ Horario Permitido/ Momento de desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	34	Sí	No
Humedad Máxima	Conmutador analógico de valor umbral	ON	Word	36	Sí	No
Humedad Ideal	Conmutador analógico de valor umbral	OFF	Word	38	Sí	No
Ventilación y Extracción de Aire / Horario Permitido/ Día de la semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	51	Sí	No
Ventilación y Extracción de Aire / Horario Permitido/Momento de conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	52	Sí	No
Ventilación y Extracción de Aire / Horario Permitido/ Momento de desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión1	Word	54	Sí	No
Iluminación Temporizada/ Horario 1/ Día de la semana	Temporizador semanal	Día de la semana1	Byte	56	Sí	No
Iluminación Temporizada/ Horario 1/ Momento de conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión1	Word	57	Sí	No

Iluminación Temporizada/ Horario 1/ Momento de desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión ¹	Word	59	Sí	No
Iluminación Temporizada/ Horario 2/ Día de la semana	Temporizador semanal	Día de la semana ¹	Byte	61	Sí	No
Iluminación Temporizada/ Horario 2/ Momento de conexión	Temporizador semanal	Momento de conexión ¹	Word	62	Sí	No
Iluminación Temporizada/ Horario 2/ Momento de desconexión	Temporizador semanal	Momento de desconexión ¹	Word	64	Sí	No
Ganancia del regulador (Kc)	Regulador PI	Ganancia del regulador (KC)	Word	66	Sí	No
Tiempo integral (TI) segundos	Regulador PI	Tiempo integral (TI)	Word	68	Sí	No
Salida del Regulador PI	Regulador PI	Aq	Word	70	Sí	No
Periodo de la modulación de ancho de pulsos	PWM	Tiempo periódico:	Word	72	Sí	No
Rango mínimo PWM	PWM	Rango mín.:	Word	74	Sí	No
Rango máximo de PWM	PWM	Rango máx.:	Word	76	Sí	No
Histéresis Ventilador Interno (Valor on)	Conmutador analógico de valor umbral	ON	Word	78	Sí	No
Histéresis Ventilador Interno (Valor off)	Conmutador analógico de valor umbral	OFF	Word	80	Sí	No

En la Tabla 3.14, se observa que los comandos de forzar actuadores y comandos de control remoto se envían y reciben correctamente. Además, se determina que al efectuar los cambios desde el HMI se cumplen las funciones programadas.

Tabla 3.14. Verificación de comandos y control remoto desde HMI

Función	Tipo	Dirección VM	Envío / Recepción		Cumple Función	
			Sí	No	Sí	No
Forzar encendido de Ventilador Interior	Booleano	0.0	Sí	No	Sí	No

Forzar encendido de Extractor y Ventilación Forzada	Booleano	0.1	Sí	No	Sí	No
Forzar encendido de válvula Zona A	Booleano	0.2	Sí	No	Sí	No
Forzar encendido de válvula Zona B	Booleano	0.3	Sí	No	Sí	No
Forzar encendido de Luminarias	Booleano	0.4	Sí	No	Sí	No
Mando Remoto/ Activación Control de Calefacción	Booleano	0.5	Sí	No	Sí	No
Mando Remoto/ Activación Control de Humedad Ambiental	Booleano	0.6	Sí	No	Sí	No
Mando Remoto/ Activación Control de Riego Temporizado	Booleano	0.7	Sí	No	Sí	No
Mando Remoto/ Activación Control de Riego por Demanda	Booleano	1.0	Sí	No	Sí	No
Mando Remoto/ Activación Control de Iluminación Temporizado	Booleano	1.1	Sí	No	Sí	No
Mando Remoto/ Activación Control de Iluminación Activo	Booleano	1.2	Sí	No	Sí	No
Cambio de Modo (Local-Remoto)	Booleano	1.3	Sí	No	Sí	No
Forzar encendido de Resistencias Calefactoras	Booleano	1.4	Sí	No	Sí	No
Activación Control de Ventilación y Extracción de Aire	Booleano	1.5	Sí	No	Sí	No
Comando Activación Riego por Demanda Zona A	Booleano	1.6	Sí	No	Sí	No
Comando Activación Riego por Demanda Zona B	Booleano	1.7	Sí	No	Sí	No

Tiempo Encendido / Control Ventilación y Extracción de aire	Word	100	Sí	No	Sí	No
Tiempo Off/ Ventilación y Extracción de aire	Word	102	Sí	No	Sí	No

3.4.5. DISCUSIÓN

Se verificó el correcto funcionamiento de la interfaz HMI, además se observó que todas las variables configurables se envían y se reciben sin problemas.

Los comandos de control remoto y forzar entradas se envían y se ejecutan adecuadamente.

3.5. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO CON PLÁNTULAS REALES

3.5.1. OBJETIVOS

-Comparar características morfológicas de plántulas producidas dentro y fuera del módulo implementado.

-Probar el funcionamiento del módulo en su capacidad máxima con dos especies de plántulas.

3.5.2. MATERIALES

-Módulo Productor y Germinador de Plántulas totalmente implementado.

-Área de cultivo con fundas de vivero preparadas para siembra y producción.

-Sustrato

-Semillas de Café y Chirimoya

-Computadora

-Calibrador y Flexómetro

3.5.3. METODOLOGÍA DE LA PRUEBA

Esta sección explica el proceso seguido para realizar las pruebas del módulo productor y germinador con plántulas reales, se describen las actividades seguidas desde la preparación de semillas, preparación del sustrato, siembra, crecimiento de las plántulas, configuración del módulo y toma de datos.

3.5.3.1. Especies a cultivar

Tomando en cuenta que el módulo es capaz de contener a 2 especies de plántulas al mismo tiempo, se probó a su capacidad máxima usando semillas de café y chirimoya, estas especies de árboles frutales se describen a continuación.

Chirimoyo

El chirimoyo es un árbol de crecimiento erguido que puede alcanzar una altura promedio entre 4 a 9m, este árbol produce un fruto de gran demanda en la zona sur del país, el fruto puede llegar a pesar de 500-2700 gr, el árbol es de procedencia subtropical, se inclina por las exigencias climáticas con pocas variaciones de temperatura y humedad. Se desarrolla en suelos de diferentes tipos: arenosos, arcillosos, para el crecimiento se necesita un sustrato rico en nutrientes y con buena aireación de las raíces, la temperatura de crecimiento optima es de 15-25 grados y la humedad relativa entre 65% a 80%. La germinación de esta especie es considerada errática, es decir se aprecian diferencias notables en la germinación.

Café

El café es un arbusto robusto o árbol pequeño, de crecimiento recto que puede alcanzar los 10 metros en estado silvestre, para el cultivo se los mantiene de tamaño reducido (3 metros). El fruto es una baya, que se desarrolla en aproximadamente 15 semanas a partir de la floración. El café crece de mejor manera en suelo profundo, bien drenado, con una humedad relativa entre el 70 a 95% a una temperatura ambiental entre los 16 a 23 grados centígrados.

3.5.3.2. Preparaciones Iniciales

Como se describió anteriormente, múltiples factores influyen en la germinación y crecimiento de plántulas por lo que es muy importante las preparaciones iniciales de las mismas las que consisten en acondicionar las semillas a germinar y preparar el sustrato.

Preparación de semillas

Las semillas de café se las extrajo de frutos recién cosechados en estado de madurez fisiológica, fueron fermentadas en agua por 36 horas y posteriormente se lavaron, finalmente se realizó un secado al ambiente y en sombra, la preparación de semillas de café se observa en la Figura 3.20. Para la preparación de las semillas de chirimoya se siguió el mismo proceso, con la diferencia en el tiempo de fermentación (72 horas).



Figura 3.20. Preparación de semillas de café

Preparación del sustrato

El sustrato fue preparado con una mezcla de 25% Turba, 25% humus, 25% arena de cantera y 25% de tierra de montaña, el sustrato preparado y enfundado se puede observar en la Figura 3.21.



Figura 3.21. Fundas de Cultivo preparadas

3.5.3.3. Dimensionamiento del cultivo

Se colocó el café en la Zona A y la chirimoya en la Zona B, cabe recalcar que las necesidades de temperatura y humedad relativa de las dos especies permiten colocarlas al mismo tiempo en el módulo.

Se colocó 400 fundas de cultivo (10x7cm) para el café y 110 fundas de tamaño (10x15cm) para las chirimoyas.

3.5.3.4. Configuraciones del Módulo

Con las necesidades de temperatura y humedad resumidas en la Tabla 3.15, se procedió a configurar los valores de referencia que se observan en la Tabla 3.16.

Tabla 3.15. Necesidades de Temperatura y Humedad

Cultivo	Humedad Relativa	Temperatura Ambiental
Café	70-95%	16-23 grados C
Chirimoya	65-85%	14-25 grados C

Tabla 3.16. Configuraciones del Módulo

Función	Valor Configurado	Razón
Humedad Suelo Máxima Zona A	35	Cálculos de Capacidad de Campo
Humedad Suelo Mínima Zona A	25	Cálculos de Capacidad de Campo
Humedad Suelo Máxima Zona B	35	Cálculos de Capacidad de Campo
Humedad Suelo Mínima Zona B	20	Cálculos de Capacidad de Campo
Riego Temporizado / Zona A / Día de la Semana	Apagado	Riego Demanda Activo
Riego Temporizado / Zona A / Momento de Conexión	Apagado	Riego Demanda Activo
Riego Temporizado / Zona A / Momento de Desconexión	Apagado	Riego Demanda Activo
Riego Temporizado / Zona B / Día de la Semana	Apagado	Riego Demanda Activo

Riego Temporizado / Zona B / Momento de Conexión	Apagado	Riego Demanda Activo
Riego Temporizado / Zona B / Momento de Desconexión	Apagado	Riego Demanda Activo
Temperatura ideal Noche	23 grados	Necesidades de Plántulas
Temperatura Máxima día	35 grados	Rango Seguro para Plántulas
Temperatura Día	25 grados	Temperatura ideal durante día
Horario Permitido Riego / Demanda / Día de la Semana	Lunes Miércoles Sábado	Días de riego
Horario Permitido Riego / Demanda / Momento de Conexión	0h10	Presión constante en red de agua / evitar hongos en plántulas
Horario Permitido Riego / Demanda / Momento de Desconexión	5h00	Presión constante en red de agua / evitar hongos en plántulas
Humedad Ambiental/ Horario Permitido/ Día de la semana	Todos los días	Necesidades de Plántulas
Humedad Ambiental/ Horario Permitido/ Momento de conexión	9h00	Debido a que por la noche la calefacción ayuda al control de humedad
Humedad Ambiental/ Horario Permitido/ Momento de desconexión	19h00	Debido a que por la noche la calefacción ayuda al control de humedad
Humedad Máxima	90	Necesidades de plántulas
Humedad Ideal	85	Restricciones del Módulo

3.5.3.5. Toma de datos.

El cultivo dimensionado corresponde a 400 plántulas de café y 110 plántulas de chirimoya, por lo que es muy complicado realizar un seguimiento de cada una de ellas, debido a esto se ha seleccionado una muestra aleatoria de 20 plántulas de cada especie dentro del módulo y se ha colocado fuera otras 20 para realizar la comparación.

Los datos se obtuvieron por conteo de la emergencia de las plántulas, número de hojas, midiendo con flexómetro la altura de la plántula, empezando desde el punto de salida del sustrato hasta la parte más alta, la medición del diámetro del tallo, longitud de hoja y ancho de hoja se obtuvo usando un calibrador (Figura 3.22).

Para obtener el dato de longitud y ancho de la hoja se seleccionó una verdadera de la plántula y se la marco para realizar la toma de datos de la misma hoja. El número de hojas se determinó observando la plántula, para el análisis no se tomaron en cuenta hojas seminales, solamente verdaderas. La medición del diámetro del tallo se la realizó a nivel del cuello de la plántula.

El desarrollo de las plántulas es evaluado en base a la fenología, para la toma de datos se subdividió en 5 estados diferentes, desde la emisión del hipocótilo (eje del embrión de la plántula) hasta la formación de hojas verdaderas. Los estados se observan en la Tabla 3.17

Tabla 3.17. Estado de Plántulas






Estado	Foto Referencial
1. Brote del Hipocotilo en el sustrato	
2. Crecimiento y proceso de levantamiento del Hipocotilo	
3. Lavantamiento completo del Hipocotilo	
4. Brote de Hojas seminales	
5. Brote de Hojas verdaderas	



Figura. 3.22. Calibrador

3.5.3.6. Determinación de Porcentaje de Emergencia (Germinación)

Esta prueba se realizó utilizando el método de conteo las plántulas que emergieron tanto dentro como fuera del módulo y tomando en cuenta el total del cultivo dimensionado.

3.5.4. RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 3.18 se observan las fechas importantes de las pruebas realizadas, desde la siembra, germinación, el inicio de toma de datos y el final de la toma de datos.

Tabla 3.18. Fechas Importantes de Pruebas realizadas

	Siembra	Emergencia	Inicio de toma de datos	Final de toma de datos
Café dentro del Módulo	24/07/2021	7/09/2021 - 14/09/2021	14/09/2021	24/11/2021
Café fuera del Módulo	24/07/2021	14/09/2021 - 22/09/2021	22/09/2021	24/11/2021
Chirimoya dentro del Módulo	24/07/2021	27/08/2021- 03/09/2021	03/09/2021	27/10/2021
Chirimoya fuera del Módulo	24/07/2021	27/08/2021 – 03/09/2021	03/09/2021	27/10/2021

En la Tabla 3.19, se presentan los días transcurridos desde la siembra, emergencia, inicio de toma de datos y final de toma de datos. No se aprecia diferencia en la emergencia de la Chirimoya dentro y fuera del módulo, mientras que el café dentro del módulo germinó 8 días antes. También se observa que el cultivo de Chirimoya creció con mayor rapidez.

El final de la toma de datos está limitado por los estados definidos en la Tabla 3.17, es decir solo se realizó mediciones hasta que las plántulas desarrollaron hojas verdaderas.

Tabla 3.19. Días transcurridos desde la siembra

Plántulas	Inicio de Emergencia	Inicio de toma de datos	Final de toma de datos
Café dentro del Módulo	45 días	52 días	123 días
Café fuera del Módulo	52 días	60 días	123 días
Chirimoya dentro del Módulo	34 días	41 días	95 días
Chirimoya fuera del Módulo	34 días	41 días	95 días

3.5.4.1. Chirimoya

En la Tabla 3.20. se presentan los resultados obtenidos de las plántulas de Chirimoya dentro del Módulo (DM) y fuera (FM). Los datos observados corresponden al promedio de las medidas en 20 plántulas de la muestra, excluyendo las semillas que no emergieron. Las tablas completas se encuentran en el ANEXO

Tabla 3.20. Resultados promediados de Toma de Datos

Fecha	Estado DM	Estado FM	Altura DM [cm]	Altura FM [cm]	Diámetro tallo DM [mm]	Diámetro tallo FM [mm]	Longitud de Hoja DM [cm]	Longitud de Hoja FM [cm]	Ancho de Hoja DM [cm]	Ancho de Hoja FM [cm]	Numero de Hojas DM	Numero de Hojas FM
03/09/2021	1	1	4,2	2,5	3,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0
08/09/2021	3	2	4,2	3,2	3,1	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0
14/09/2021	3	2	5,9	4,0	3,2	2,0	3,0	1,2	2,0	0,7	2	1
22/09/2021	4	3	8,2	5,3	3,4	2,5	4,7	2,0	3,1	1,2	3	1
29/09/2021	5	4	9,2	6,2	3,6	3,0	5,3	2,4	3,3	1,4	3	1
06/10/2021	5	4	10,9	7,0	3,6	3,2	5,8	3,4	3,6	2,2	4	2
13/10/2021	5	4	12,1	7,3	3,8	3,4	6,0	3,4	3,8	2,3	5	3
18/10/2021	5	4	12,1	7,9	4,2	3,8	6,2	3,4	3,7	3,2	7	4
27/10/2021	5	5	14,9	9,1	4,4	4,0	6,2	4,7	3,9	3,2	7	5

En la Figura 3.23. se observa las gráficas obtenidas del estado de las plántulas de chirimoya dentro y fuera del módulo, se observa una diferencia de un punto los primeros 86 días de crecimiento.

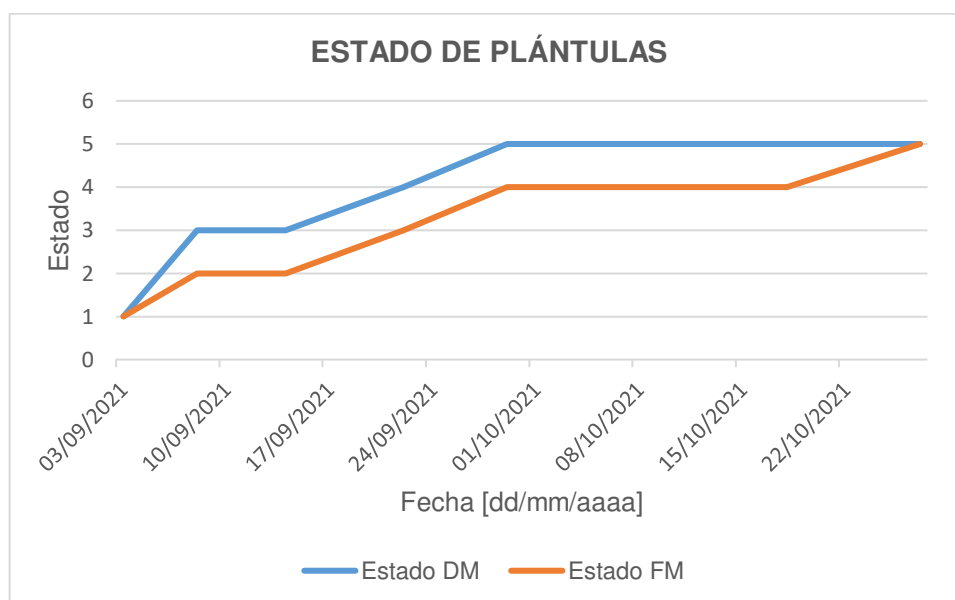


Figura 3.23. Estado de Plántulas de Chirimoya

En la Figura 3.24, se grafican las alturas de las plántulas de Chirimoya, tomando en cuenta las líneas de tendencia se determinó que la velocidad de crecimiento en la altura de las plántulas dentro del módulo es de $0,2 \frac{cm}{dia}$ mientras que para las plántulas fuera del módulo $0,11 \frac{cm}{dia}$

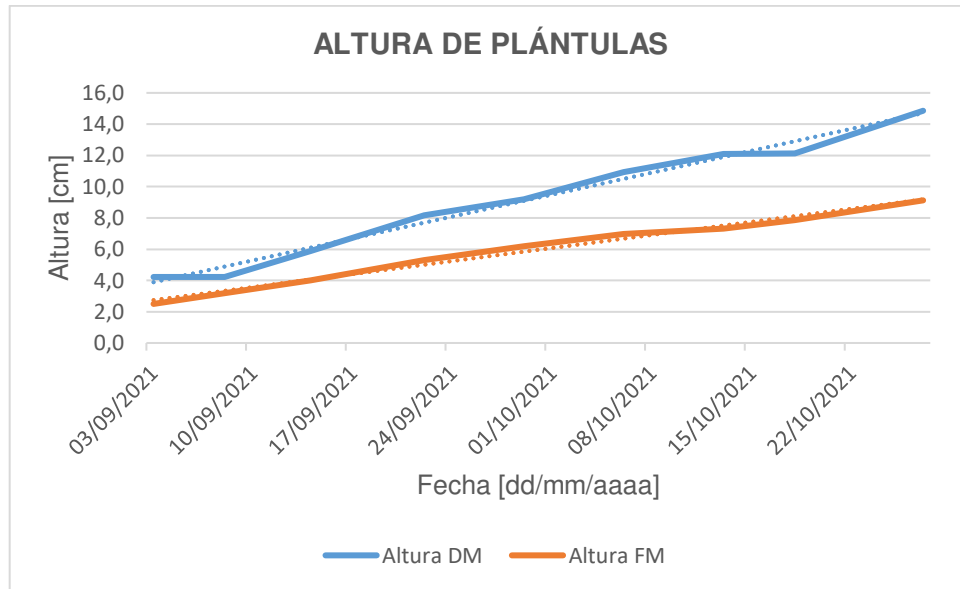


Figura 3.24. Altura de Plántulas de Chirimoya

En la Figura 3.25. se observa el crecimiento del diámetro del tallo en las plántulas de Chirimoya, no se aprecia una diferencia notable, pero se evidencia que los cultivos ubicados dentro del módulo respondieron de mejor forma.

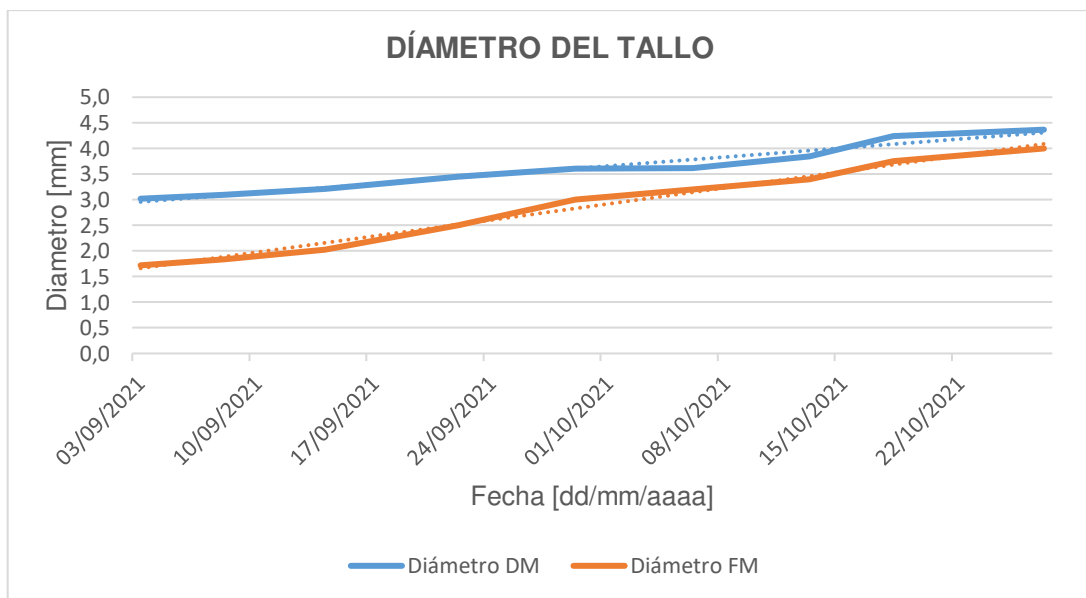


Figura 3.25. Diámetro de Plántulas de Chirimoya

En la Figura 3.26, se grafica el crecimiento de la longitud de hoja, tomando en cuenta las líneas de tendencia se determinó que la velocidad de crecimiento en la longitud de hojas en las plántulas dentro del módulo es de $0,12 \frac{cm}{día}$ mientras que para las plántulas fuera del módulo $0,08 \frac{cm}{día}$

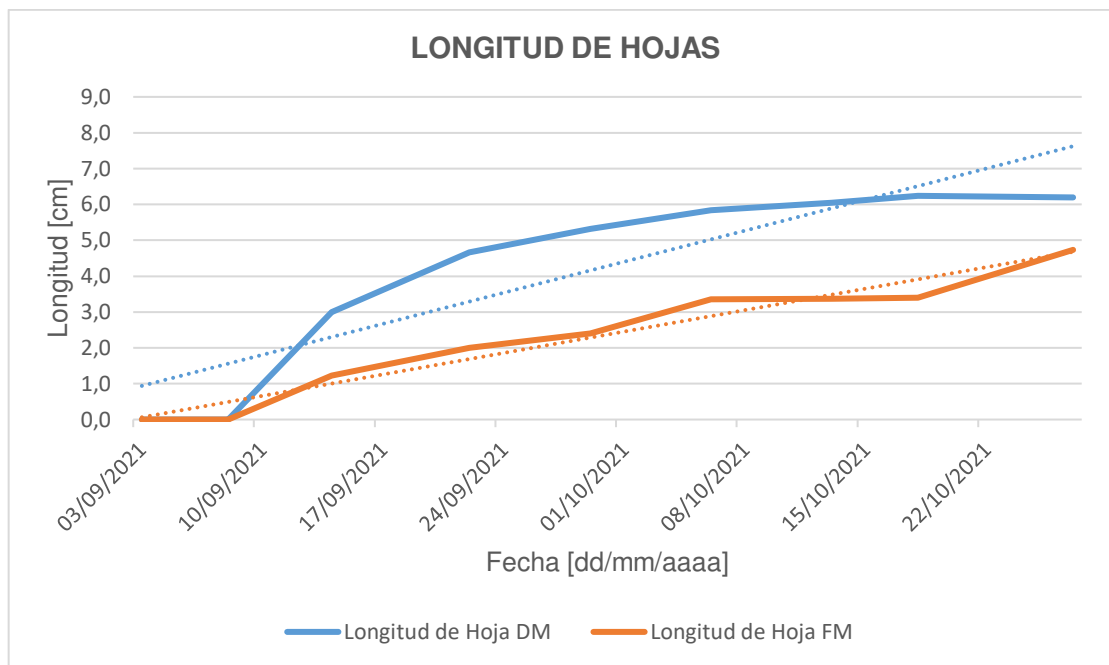


Figura 3.26. Longitud de hojas en Plántulas de Chirimoya

El crecimiento en el ancho de las hojas de las plántulas se describe en la Figura 3.27, se puede determinar usando la línea de tendencia que la velocidad de crecimiento en el ancho de hojas en las plántulas dentro del módulo es de $0,07 \frac{cm}{día}$ mientras que para las plántulas fuera del módulo $0,06 \frac{cm}{día}$

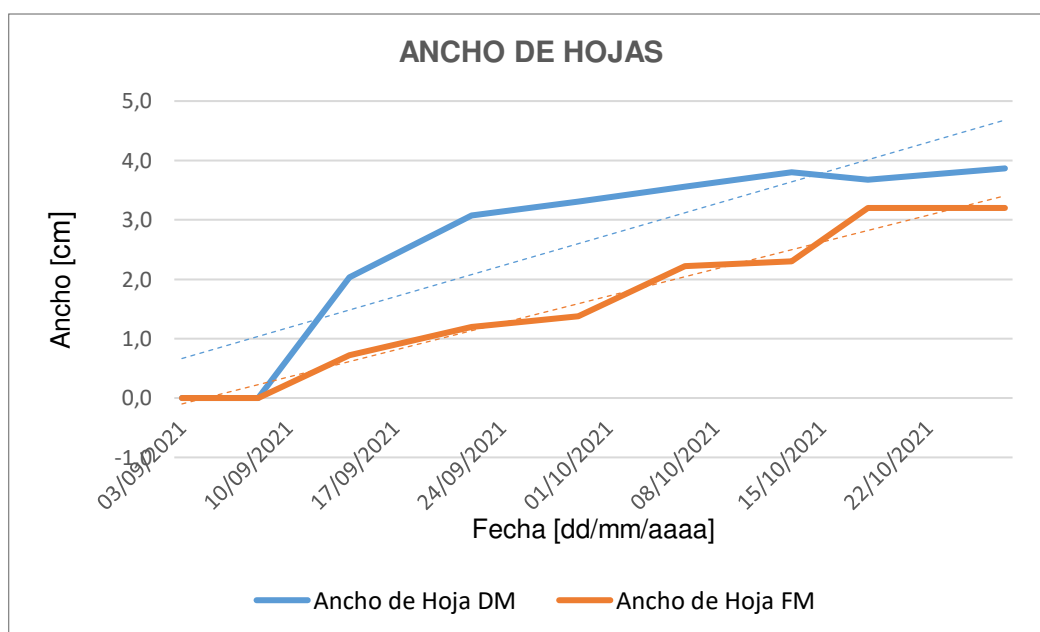


Figura 3.27. Ancho de hojas en Plántulas de Chirimoya

En la Figura 3.28, se observan el número de hojas en las plántulas dentro y fuera del módulo, se aprecia una diferencia notable de aproximadamente 3 hojas en todas las fechas donde se tomaron los datos.

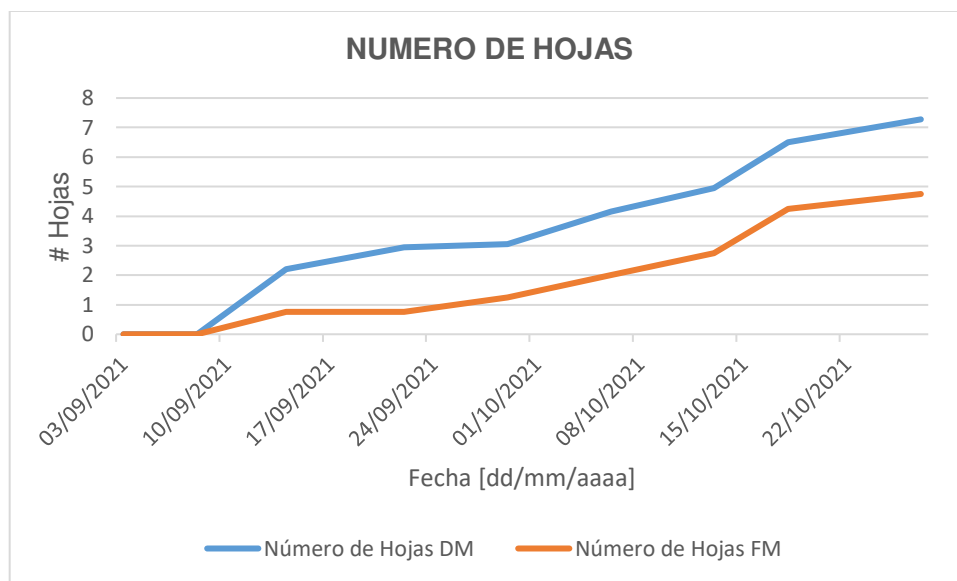


Figura 3.28. Numero de hojas en Plántulas de Chirimoya

3.5.4.2. Café

En la Tabla 3.21. se presentan los resultados obtenidos de las tomas de datos de las plántulas de café dentro del Módulo (DM) y fuera (FM), las medidas de altura, longitud y ancho de hoja están en centímetros, la medida del diámetro del tallo está en milímetros. Los datos observados corresponden al promedio de las medidas realizadas en las 20 plantas de la muestra, no se incluyeron en los cálculos semillas que no germinaron o que no se desarrollaron. Las tablas completas se encuentran en el ANEXO

A diferencia de las plántulas de Chirimoya, las plántulas de café tardaron alrededor de 12 días más en emerger, debido a esto se observa en los resultados de la Tabla 3.20 un retraso notable al comparar los resultados de las características morfológicas del Chirimoyo vistas en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21. Resultados promediados de Toma de Datos

Fecha	Estado DM	Estado FM	Altura DM	Altura FM	Diámetro DM	Diámetro FM	Longitud de Hoja DM	Longitud de Hoja FM	Ancho de Hoja DM	Ancho de Hoja FM	Número de Hojas DM	Número de Hojas FM
14/09/2021	1	0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0
22/09/2021	2	0	1,9	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0
06/10/2021	2	1	4,2	0,7	1,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0
13/10/2021	3	1	5,2	2,1	2,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0
18/10/2021	3	2	5,3	3,2	3,0	1,4	0,5	0,0	0,1	0,0	0	0
27/10/2021	4	3	5,7	4,2	3,3	2,6	1,8	1,6	1,5	0,7	0	0
03/11/2021	4	3	6,1	4,9	3,7	3,1	2,5	2,3	2,4	2,0	1	0
10/11/2021	4	3	6,3	4,9	3,9	3,2	3,9	3,1	2,6	2,2	2	2
24/22/2021	5	4	7,0	5,3	4,7	3,6	4,2	3,3	2,8	2,4	2	2

En la Figura 3.29. se observa las gráficas obtenidas del estado de las plántulas de café dentro y fuera del módulo, se observa una diferencia notable de 2 puntos los primeros 29 días, posteriormente una diferencia de 1 punto.

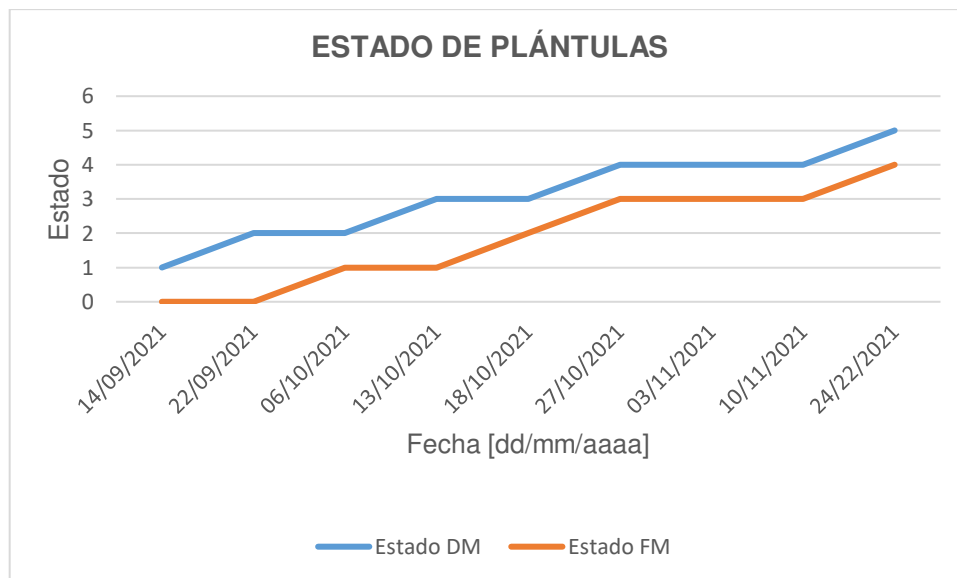


Figura 3.29. Estado de Plántulas de Café

La altura de las plántulas de café se observa en la Figura 3.30, se observa una notable diferencia de aproximadamente 2.5 cm, tomando en cuenta la línea de tendencia la velocidad de crecimiento es de $0,077 \frac{cm}{día}$ para las plántulas DM y $0,073 \frac{cm}{día}$ para las plántulas FM.

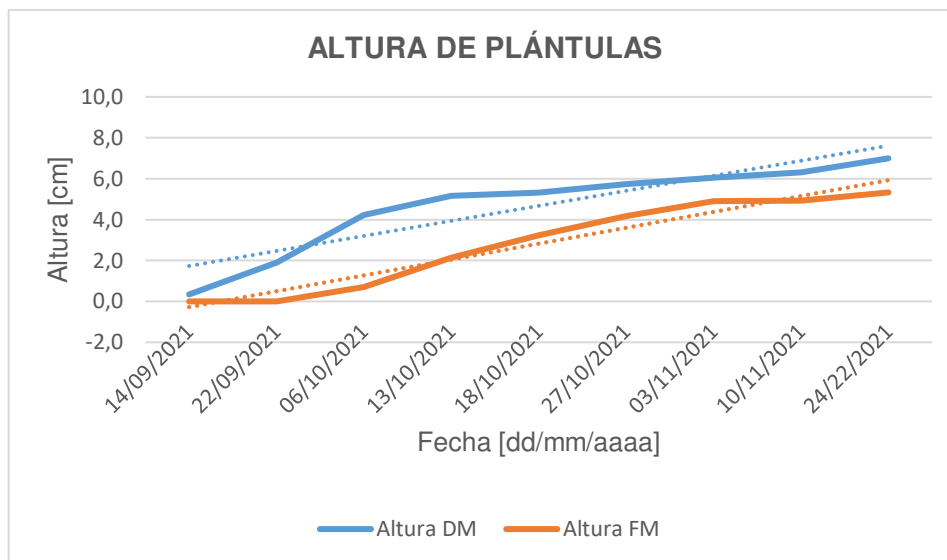


Figura 3.30. Altura de Plántulas de Café

Existe una diferencia de aproximadamente 1mm en el diámetro del tallo, siendo notorio mejor resultado en la producción de plántulas dentro del Módulo. El grafico del diámetro del tallo se observa en la Figura 3.31.

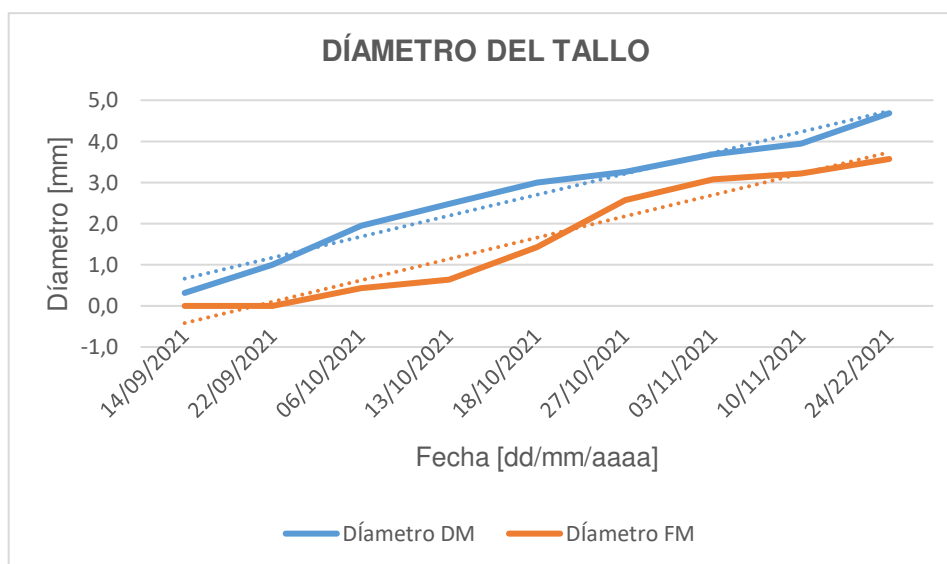


Figura 3.31. Diámetro del tallo de Plántulas de Café

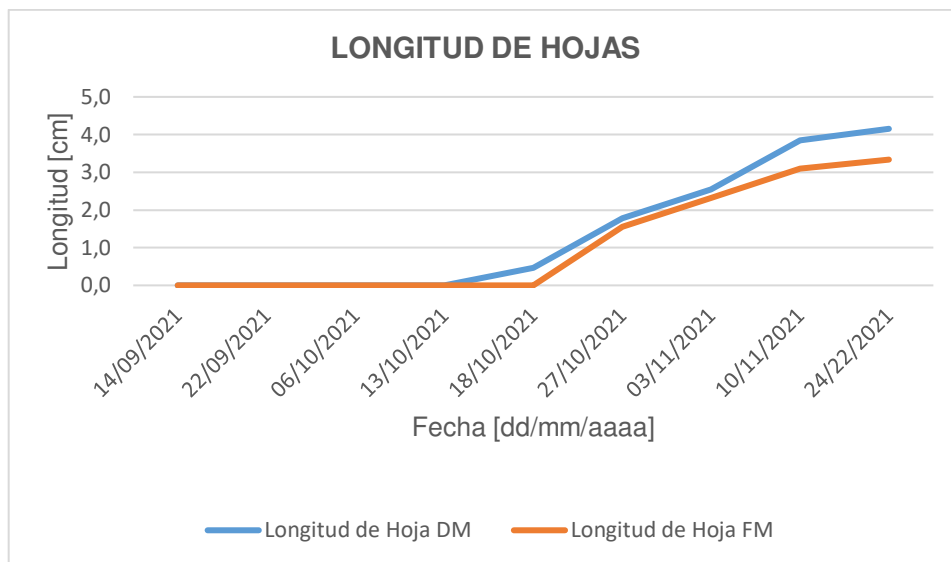


Figura 3.32. Longitud de Hojas en Plántulas de Café

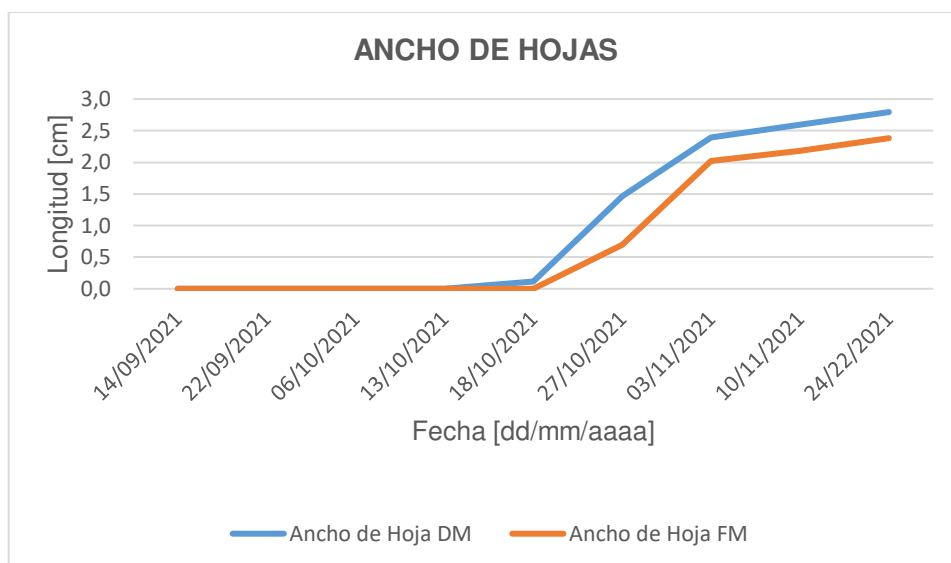


Figura 3.33. Ancho de Hojas en Plántulas de Café

En las Figuras 3.32 y 3.33 se observa el promedio del tamaño de hojas en las plántulas de café, como se mencionó anteriormente, el café se demoró más en emerger, por lo que las medidas en las hojas se tomaron desde el 18/10/2021, se visualiza un mayor crecimiento en los cultivos ubicados dentro del equipo.

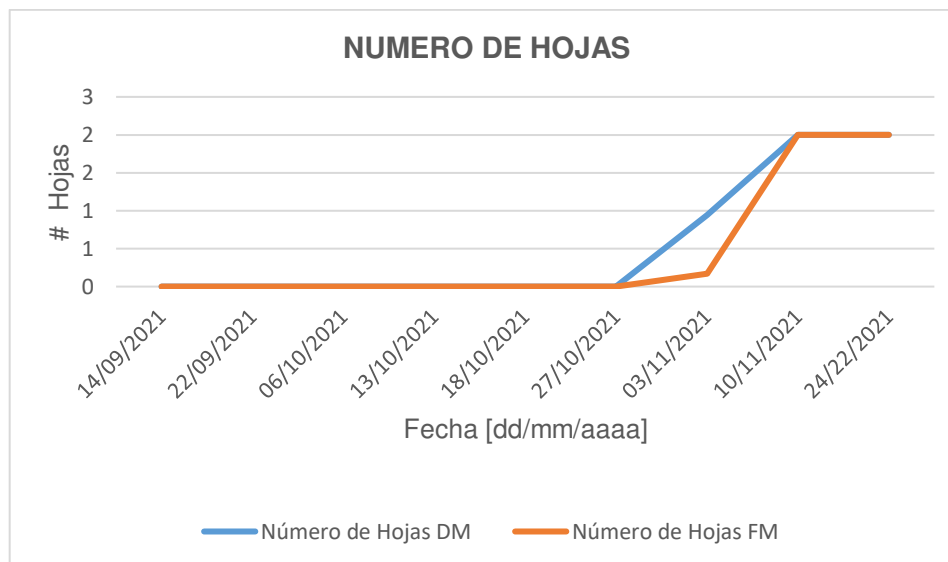


Figura 3.34. Numero de Hojas en Plántulas de Café.

En la Figura 3.34 se puede observar que no se produjo una diferencia notable en el número de hojas de las plántulas de café, esto debido al tiempo limitado de toma de datos luego del brote de las hojas verdaderas.

3.5.4.3. Porcentaje de Emergencia

En la Tabla 3.22. se detallan los porcentajes de emergencia obtenidos en las pruebas realizadas.

Tabla 3.22. Porcentajes de Emergencia

Especie	% Emergencia DM	% Emergencia FM
Chirimoya	47%	25%
Café	84%	55%

En la Figura 3.35, se evidencian las plántulas, a la izquierda las que se encuentran dentro del módulo y a la derecha las que se encuentran fuera. Se visualiza notablemente que el tamaño y cantidad de plantulas que emergieron es mayor dentro del equipo.



Figura 3.35. Imagen Plántulas dentro y Fuera del Módulo

3.5.5. DISCUSIÓN

Existe una diferencia notable entre las plántulas producidas dentro del módulo con respecto a las cultivadas fuera del mismo, se observó una velocidad de crecimiento mayor en altura, diámetro del tallo, tamaño de hojas y número de hojas tanto en la Chirimoya como el Café.

También se observó el correcto funcionamiento del módulo con dos especies de plántulas al mismo tiempo y funcionando a su máxima capacidad. Existe un mejor porcentaje de emergencia en las plántulas producidas dentro del módulo, dando como resultado 47% dentro respecto a 25% fuera del mismo para las plántulas de Chirimoya y de 84% de emergencia dentro respecto al 55% fuera del mismo para las plántulas de Café.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un módulo productor y germinador de plántulas con control de temperatura, humedad ambiental, riego e iluminación, el cual permitió generar un microclima idóneo para el crecimiento acelerado de plántulas de ciclo largo.

Se comprobó que los sensores y transmisores escogidos funcionan adecuadamente para esta aplicación, también se observó la robustez y funcionamiento de todos los elementos del sistema a lo largo de 123 días de pruebas sin presencia de fallas, cortocircuitos o errores en las mediciones.

Con el uso de transmisores de humedad suelo se implementó un control de riego por demanda, el cual monitoriza la humedad y permite aplicar técnicamente un umbral de riego tomando en cuenta las propiedades del sustrato.

Se comprobó que con los actuadores escogidos y dimensionados el módulo permite que las variables controladas se configuren en rangos apropiados que permitieron generar un sistema flexible, el cual permite introducir varias especies de plántulas especialmente de clima cálido.

El sistema de adquisición de datos funciona correctamente, generando históricos de todas las variables físicas medidas dentro del módulo. Además, la interfaz HMI permite visualizar y dar comandos en modo remoto de forma accesible y amigable al usuario.

Se concluye que la ubicación de sensores, transmisores y actuadores es idónea para la aplicación, los emisores de agua permiten regar las fundas de cultivo uniformemente.

La lógica de control implementada para mantener en rangos adecuados la temperatura ambiental, humedad relativa, humedad suelo e iluminación, permitió generar un microclima idóneo para acelerar el crecimiento de las plántulas.

El microclima generado dentro del módulo con los valores configurados a las necesidades de las plántulas escogidas para la prueba (humedad relativa, temperatura ambiental), permitió un mayor porcentaje de emergencia 22% adicional para chirimoya / 29% adicional para café y crecimiento de plántulas 0.09 cm/día adicional para chirimoya / 0.004 cm/día adicional para café (en altura).

4.2. RECOMENDACIONES

Una mejora que se puede implementar en el sistema es el uso de camas de cultivo calientes, debido a que en las pruebas no se observó gran diferencia en el tiempo de germinación de las semillas, esto porque se controla la temperatura ambiental y no la temperatura del sustrato.

Para una mejor monitorización de las plántulas se pueden incluir sensores de PH, dióxido de carbono y temperatura del sustrato, además de colocar una cámara IP que permita observar el estado de las plántulas desde la interfaz HMI.

Un trabajo futuro en el sistema es desacoplar la red de agua potable como suministro de agua, y cambiarlo por un sistema automatizado con bomba de agua y tanque para almacenamiento de aguas pluviales.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Á. H. Alarcón López, G. Arias Vargas, C. J. Díaz Ortiz, and J. D. Sotto Vergara, "Automatic Control System for Climate Variables to Optimize Greenhouse Crop Yields," *Ing. Solidar.*, vol. 14, no. 24, pp. 1–11, 2018, doi: 10.16925/in.v14i24.2158.
- [2] FAO, "Cultivo de Árboles Frutales," *MANUAL DE CAPACITACION PARA TRABAJADORES DE CAMPO EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE*, 2000. <https://www.fao.org/3/v5290s/v5290s38.htm>.
- [3] R. K. Dumroese, D. F. Jacobs, and K. M. Wilkinson, "Fases de cultivo: Establecimiento y crecimiento rápido," *Prod. plantas en viveros For.*, pp. 133–144, [Online]. Available: https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2012_dumroese_k004.pdf.
- [4] "Microclimas," *Libretilla*, 2019. <https://libretilla.com/que-es-un-microclima/>.
- [5] J. C. Arellano Beltrán, "Automatic Control System for Climate Variables to Optimize Greenhouse Crop Yields," *Univ. Autónoma Queretario*, pp. 16–32, 2017, [Online]. Available: <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1161>.
- [6] T. Qian, J. A. Dieleman, A. Elings, and L. F. M. Marcelis, "Leaf photosynthetic and morphological responses to elevated CO₂ concentration and altered fruit number in the semi-closed greenhouse," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 145, pp. 1–9, 2012, doi: 10.1016/j.scienta.2012.07.015.
- [7] D. N. Gerasimov and M. V. Lyzlova, "Adaptive control of microclimate in greenhouses," *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, vol. 53, no. 6, pp. 896–907, 2014, doi: 10.1134/S1064230714050074.
- [8] M. Suzuki *et al.*, "Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 187, pp. 44–49, 2015, doi: 10.1016/j.scienta.2015.02.035.
- [9] Skeptical Science, "Plants cannot live on CO₂ alone," 2015. <https://skepticalscience.com/co2-plant-food-advanced.htm>.
- [10] R. Paradiso and S. Proietti, "Light-Quality Manipulation to Control Plant Growth and Photomorphogenesis in Greenhouse Horticulture: The State of the Art and the Opportunities of Modern LED Systems," *J. Plant Growth Regul.*, 2021, doi:

10.1007/s00344-021-10337-y.

- [11] U. P. de Navarra, "Morfología de las Plántulas," 2016.
https://www.unavarra.es/herbario/htm/plantula_BAMH_01.htm.
- [12] Berger, "Ambiente necesario para la apropiada germinación de la semilla," 2020.
<https://www.berger.ca/es/recursos-para-los-productores/tips-y-consejos-practicos/ambiente-necesario-para-la-apropiada-germinacion-de-la-semilla/>.
- [13] J. C. Rivarola and M. de Agroindustria, "Manual de vivero," *Dir. Educ. Agrar.*, vol. 2, 2018.
- [14] P. Demin, "Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego," *Inst. Nac. Tecnol. Agropecu.*, vol. 1, p. 24, 2014, [Online]. Available:
https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_aportes_para_el_mejoramiento_del_manejo_de_los_sistemas_de_riego.pdf.
- [15] maher, "Sistemas de Riego Automático," 2021.
<https://www.maherelectronica.com/sistema-riego-automatico/>.
- [16] J. Valero and R. Picornell, *El Riego Y Sus Tecnologías*. 2010.
- [17] maher, "Programador de riego con sensores de humedad del suelo," 2021.
<https://www.maherelectronica.com/programacion-de-riegos-sensores-humedad/>.
- [18] E. O. System, "El Control de la Humedad Del Suelo: Un Factor Clave," 2020.
<https://eos.com/es/blog/humedad-del-suelo/>.
- [19] R. A. de Oliveira, M. M. Ramos, and L. A. de Aquino, *Irrigation management*. Elsevier Inc., 2015.
- [20] P. Ponce, A. Molina, and O. Mata, "Controladores inteligentes para invernadero hidropónico," *Res. Comput. Sci.*, vol. 135, no. 1, pp. 99–114, 2017.
- [21] M. de Loja, "Malacatos, Datos Generales y Geograficos," 2021.
<https://www.loja.gob.ec/contenido/malacatos>.
- [22] F. Mecánica, "Densidad del Aire," 2014.
<http://www.fullmecanica.com/definiciones/d/285-densidad-del-aire>.
- [23] Dewesoft, "Fusión de la adquisición de datos y los sistemas de control en tiempo real," 2021. <https://dewesoft.com/es/daq/fusion-de-adquisicion-de-datos-y-sistema-de-control-en-tiempo-real>.

- [24] Intagri, "Estrés Vegetal," 2015. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/estres-vegetal-parte-1-estres-por-altas-temperaturas>.
- [25] NutriControl, "La Humedad Relativa en Invernaderos," 2020, [Online]. Available: <https://nutricontrol.com/es/la-humedad-relativa-en-invernadero/>.
- [26] Siemens AG, "LOGO 8 Manual," 2019.