

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA



PUCP

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL
MICROCLIMÁTICO PARA LA PRESERVACIÓN DE ORQUÍDEAS
ENDÉMICAS DEL PERÚ EN INVERNADERO**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico

Presentado por:

Kevin Arthur Lara Jáuregui

ASESOR: Alejandro Carlos Alcócer García

Lima, diciembre del 2015



RESUMEN

El control ambiental en invernaderos permite replicar las zonas de vida o microclimas de cualquier variedad de cultivo. La estructura del invernadero brinda protección al cultivo contra los factores externos y el sistema de control monitorea y regula las variables ambientales en el interior. El cerebro del sistema de control es un microcontrolador, el cual alberga en su memoria un algoritmo que gobierna el comportamiento del invernadero.

En este trabajo se propone el diseño e implementación de un sistema de control microclimático de temperatura, humedad e iluminación para la preservación de orquídeas endémicas del Perú en un invernadero ubicado en el distrito de Ate, Lima. Se dispone de un prototipo de invernadero, propiedad de la empresa peruana Incatech S.A.C. Se planteó replicar tres de las principales zonas de vida de orquídeas endémicas del Perú mediante el control de la temperatura y humedad relativa. El algoritmo de control está basado en la lógica difusa para la temperatura y humedad. Se utilizó lógica on/off para el control de la iluminación dentro del invernadero.

El sistema de control planteado replicará y mantendrá automáticamente los parámetros de cada zona de vida alrededor de un valor medio establecido con una desviación máxima de ± 3 °C de temperatura y ± 5 % de humedad relativa. Se requiere un sistema de control que establezca la zona de vida en un tiempo menor a 15 minutos al iniciar su funcionamiento o al cambiar de una zona de vida a otra.

Para la medición de la temperatura y humedad se seleccionó el sensor DTH22 que provee un rango de medición de - 40 a 100 °C y 0 a 100% respectivamente. La medición de la intensidad luminosa se realiza mediante un fotoresistor (LDR) que permite al sistema diferenciar entre el día y la noche. Se implementó una resistencia calefactora para incrementar la temperatura interior y dos de ventiladores axiales para disminuirla. Para incrementar y disminuir la humedad relativa se utilizó un humidificador ultrasónico y un extractor de aire respectivamente. El sistema de iluminación comprende de 20 leds ultrabrillantes de color blanco distribuidos en 4 arreglos de 5 leds cada uno. Finalmente se desarrolló una interfaz gráfica para el control y monitoreo del invernadero por medio de una computadora.

Se realizaron las pruebas del sistema de control e interfaz de usuario en ambos modos. El modo automático logra replicar las tres zonas de vida de las orquídeas endémicas, el modo manual permite al operador activar y variar los actuadores a diferentes potencias.



*A mis padres que son la fuente de mi motivación, por brindarme su amor y confianza
para seguir siempre adelante.*

A mi hermana por ser parte de mi felicidad.

A mis familiares y amigos que me apoyaron en todo momento.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. ORQUÍDEAS ENDÉMICAS DEL PERÚ Y SISTEMAS DE CONTROL MICROCLIMÁTICO EN INVERNADERO.....	2
1.1. PANORAMA DE LAS ORQUÍDEAS EN EL PERÚ.....	2
1.2. IMPORTANCIA DEL CULTIVO EN INVERNADERO.....	3
1.3. SISTEMAS DE CONTROL MICROCLIMÁTICO EN INVERNADEROS.....	5
1.4. DECLARACIÓN DEL MARCO PROBLEMÁTICO.....	8
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE CONTROL MICROCLIMÁTICO EN INVERNADERO.....	9
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1.1. MODELO MATEMÁTICO DEL INVERNADERO.....	9
2.1.2. ENFOQUES DE CONTROL MICROCLIMÁTICO EN INVERNADEROS.....	13
2.1.3. PLATAFORMAS DE DESARROLLO ELECTRÓNICO.....	16
2.1.4. SENSORES DE MONITOREO AMBIENTAL.....	18
2.1.5. INTERFAZ DE CONTROL Y MONITOREO.....	22
2.2. MODELO TEÓRICO DEL SISTEMA DE CONTROL MICROCLIMÁTICO.....	24
CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL MICROCLIMÁTICO DEL INVERNADERO.....	25
3.1. OBJETIVOS.....	25
3.1.1. OBJETIVO GENERAL.....	25
3.1.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	25
3.2. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.....	25
3.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	29
3.4. CONTROL DIFUSO.....	30
3.5. SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL.....	34
3.5.1. SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD.....	34
3.5.2. SENSOR DE INTENSIDAD LUMINOSA.....	36
3.5.3. ACTUADORES.....	37
3.5.4. CONTROLADOR.....	43
3.5.5. ETAPA DE POTENCIA.....	44
3.6. DESCRIPCIÓN DE PROGRAMA PRINCIPAL DEL MICROCONTROLADOR.....	50

3.7.	INTERFAZ DE USUARIO.....	52
CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL.....		54
4.1.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO EN MODO MANUAL.....	54
4.2.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO EN MODO AUTOMÁTICO.....	57
4.3.	RESULTADOS.....	62
4.4.	COSTOS.....	62
CONCLUSIONES.....		64
RECOMENDACIONES.....		65
BIBLIOGRAFÍA.....		66
ANEXOS.....		69



ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1.1. Clasificación del invernadero por el perfil externo de su estructura.....	4
Tabla 1.2. Clasificación del invernadero por régimen térmico.....	5
Tabla 2.1. Variables de entrada del invernadero.....	9
Tabla 2.2. Variables de salida del invernadero.....	10
Tabla 2.3. Principales características de los sensores de temperatura ambiental.....	20
Tabla 2.4. Principales características de los sensores de humedad ambiental.....	21
Tabla 2.5. Principales características de los sensores de intensidad luminosa.....	22
Tabla 3.1. Características de la estructura y materiales del invernadero.....	26
Tabla 3.2. Principales zonas de vida de orquídeas endémicas en el Perú.....	26
Tabla 3.3. Sensores de Temperatura y humedad relativa para el invernadero.....	34
Tabla 3.4. Características del sensor de temperatura y humedad DHT22.....	35
Tabla 3.5. Sensores de intensidad luminosa para el invernadero.....	36
Tabla 3.6. Características de elementos de calefacción.....	37
Tabla 3.7. Características de elementos de enfriamiento.....	38
Tabla 3.8. Características de elementos de humidificación.....	39
Tabla 3.9. Características de elementos de deshumidificación.....	40
Tabla 3.10. Características de elementos de iluminación.....	42
Tabla 4.1. Parámetros de condiciones iniciales y referencia. Prueba para BH-PM.....	57
Tabla 4.2. Parámetros de condiciones iniciales y referencia. Prueba para BMH-PM.....	58
Tabla 4.3. Parámetros de condiciones iniciales y referencia. Prueba para BMH-PM.....	58
Figura 1.1. Estructura del sistema de control adaptativo difuso.....	6
Figura 1.2. Principio del proceso de aprendizaje supervisado de una red neuronal.....	7
Figura 1.3. Temperatura interna medida y predicha por el sistema de control de red neuronal.....	7
Figura 1.4. Humedad relativa interna medida y predicha por el sistema de control de red neuronal.....	7
Figura 2.1. Representación del flujo de energía y vapor de agua dentro del invernadero.....	9
Figura 2.2. Diagrama del controlador de lógica difusa para el control de temperatura en invernadero propuesto en la Universidad Tecnológica de Zhejiang.....	15
Figura 2.3. Modelo de red neuronal en invernadero, control de temperatura.....	16
Figura 2.4. Placa de desarrollo: Arduino Mega 2560, basado en ATmega1280.....	17
Figura 2.5. Entorno de desarrollo integrado de Arduino.....	17
Figura 2.6. Placa de desarrollo Pingüino32, basado en PIC32MX440F256H.....	17

Figura 2.7. Entorno de desarrollo integrado de Píngüino.....	18
Figura 2.8. Sistema SCADA en un invernadero para el control y monitoreo de la temperatura, humedad y CO2.....	23
Figura 2.9. Interfaz de monitoreo de un invernadero basado en LabView™.....	23
Figura 2.10. Modelo teórico del sistema de control del invernadero.....	24
Figura 3.1. Invernadero tipo capilla simétrico a 2 aguas.....	25
Figura 3.2. Temperatura media en 2014 y 2015.....	27
Figura 3.3. Humedad relativa media en 2014 y 2015.....	27
Figura 3.4. Temperatura en Lima vs temperaturas por zona de vida.....	28
Figura 3.5. Humedad en Lima vs humedad relativa por zona de vida.....	28
Figura 3.6. Diagrama de bloques del sistema de control microclimático.....	29
Figura 3.7. Fusificación de la temperatura. Clasificación Instituto Geofísico del Perú (IGP).....	30
Figura 3.8. Fusificación de la humedad relativa. Clasificación de Thornthwaite.....	31
Figura 3.9. Respuesta del sistema a la variable de temperatura.....	31
Figura 3.10. Respuesta del sistema a la variable de humedad.....	32
Figura 3.11. Control de iluminación artificial en el invernadero.....	33
Figura 3.12. Sensor de humedad y temperatura DHT22.....	34
Figura 3.13. Disposición de pines y conexión entre el microcontrolador y el sensor.....	35
Figura 3.14. Sensor foto resistor o LDR.....	36
Figura 3.15. Ventilador Delta Electronics EFB0912HHE.....	38
Figura 3.16. Humidificador ultrasónico Mist Maker DK-24.....	40
Figura 3.17. Motor extractor de aire Delta Electronics BFB1012H.....	41
Figura 3.18. Etapa de potencia de la resistencia calefactora.....	44
Figura 3.19. Etapa de potencia de los 2 ventiladores enfriadores.....	45
Figura 3.20. Etapa de potencia del humidificador ultrasónico.....	46
Figura 3.21. Etapa de potencia del extractor de aire.....	47
Figura 3.22. Etapa de potencia de los leds de iluminación (principal).....	47
Figura 3.23. Etapa de potencia de los leds de iluminación.....	49
Figura 3.24. Etapa de potencia del ventilador de circulación.....	49
Figura 3.25. Diagrama de flujo del programa principal.....	51
Figura 3.26. Panel principal de la interfaz de usuario del invernadero.....	52
Figura 4.1. Archivo de texto generado por la interfaz de usuario.....	54
Figura 4.2. Interfaz de usuario: modo manual extractor máxima potencia.....	54
Figura 4.3. Curva de comportamiento de la humedad relativa. Extractor al máximo.....	55
Figura 4.4. Curva de comportamiento de la humedad. Humidificador al máximo.....	55
Figura 4.5. Curva de comportamiento de la temperatura. Resistencia calefactora al máximo.....	56

Figura 4.6. Curva de comportamiento de la temperatura. Ventiladores al máximo..... 56

Figura 4.7. Respuesta de la temperatura y humedad relativa del sistema de control, modo automático para la zona de vida BH-PM..... 57

Figura 4.8. Respuesta de la temperatura y humedad relativa del sistema de control, modo automático para la zona de vida BMH-PM..... 59

Figura 4.9. Respuesta de la temperatura y humedad relativa del sistema de control, modo automático para la zona de vida BH-TB..... 60



INTRODUCCIÓN

La presente tesis describe el diseño e implementación de un sistema de control microclimático de temperatura, humedad e iluminación para la preservación de orquídeas endémicas del Perú en un invernadero ubicado en la ciudad de Lima.

En el primer capítulo se presenta el panorama de las orquídeas endémicas del Perú, la importancia del cultivo en invernaderos y los sistemas de control ambiental que se implementan en el interior de estos. Se hace énfasis en el estado de vulnerabilidad en el que se encuentran muchas especies de orquídeas endémicas peruanas.

En el segundo capítulo se desarrolla el estado del arte de los sistemas de control microclimático en invernadero. Se describe el modelo matemático de un invernadero, los enfoques y estrategias de control utilizados en invernaderos. Se analiza las plataformas de desarrollo electrónico, sensores de monitoreo ambiental e interfaces de control y monitoreo en invernaderos.

El tercer capítulo describe el diseño del sistema de control microclimático (de temperatura, humedad e intensidad luminosa) del invernadero. Se presentan los objetivos del proyecto así como los requerimientos de diseño del sistema de control. Se selecciona la estrategia y elementos de control (sensores, actuadores y plataforma de desarrollo) así como la interfaz de usuario. Finalmente se muestran los circuitos de potencia de los elementos de actuación que regulan la temperatura, humedad e iluminación del invernadero.

En el cuarto capítulo se presentan las pruebas de funcionamiento del sistema de control e interfaz de usuario. Se muestran los resultados del comportamiento de la temperatura y humedad relativa en los modos de funcionamiento manual y automático del invernadero. Finalmente se detallan los costos de implementación del sistema de control.

CAPÍTULO 1: ORQUÍDEAS ENDÉMICAS DEL PERÚ Y SISTEMAS DE CONTROL MICROCLIMÁTICO EN INVERNADERO

1.1 PANORAMA DE LAS ORQUÍDEAS EN EL PERÚ

El Perú es un país muy ligado a la vida de las orquídeas, teniendo en cuenta que posee el privilegio de contar con más de 3,500 especies de las 30,000 estimadas que se encuentran en el planeta [7]. La amplia gama de microclimas existentes en territorio Peruano permite el desarrollo de especies en áreas muy restringidas con características climáticas muy específicas, hecho que dificulta el cultivo de muchas especies fuera de su ambiente natural.

Actualmente en el Perú, la familia *Orchidaceae* se encuentra muy amenazada y con muchas especies en peligro de extinción, debido fundamentalmente a dos factores:

- i. La depredación selectiva de especies, realizada con fines de exportación por colectores comerciales.
- ii. La destrucción masiva de hábitats debido a la extracción maderera y a la agricultura migratoria, que deforesta unas 300,000 hectáreas por año, exterminando así no solamente orquídeas, sino también flora y fauna silvestre originarias del lugar. [8]

Esta situación ha ocasionado que todas las orquídeas sean incluidas en CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre) que tiene como propósito proteger a las especies de plantas y animales incluidos en sus Apéndices, contra la sobreexplotación causada por el comercio internacional y asegurar que dicho comercio sea sostenible [21].

El New York Times (2004) estimó que en el negocio del cultivo de flores, las orquídeas representan un valor de 2,000 millones de dólares anuales en el mercado mundial. Debido a la belleza y a los altos costos que alcanzan las orquídeas actualmente, son motivo de cultivo por particulares e industriales como plantas ornamentales y para la venta de flor cortada [12].

ZONAS DE VIDA DE ORQUÍDEAS ENDÉMICAS DEL PERÚ

Se considera una especie endémica aquella propia y exclusiva de determinadas localidades o regiones. Si bien la extrema riqueza de flora endémica Peruana es motivo de orgullo para el país, al mismo tiempo representa un reto muy grande para el Estado y sus aliados en la conservación [22].

La familia *Orchidaceae* constituye para la flora peruana la familia más diversa, con alrededor de 212 géneros y 2,020 especies, aunque se estima que el número real podría oscilar entre 2,500 y 3,500 especies. Dentro de estas cifras, se reconocen 775 endemismos en 137 géneros, lo que constituye a las orquídeas como la familia con más especies restringidas al Perú. Estos endemismos han sido encontrados en las regiones ecológicas denominadas: Bosque muy húmedo premontano (BMH - PM), bosque húmedo premontano (BH - PM) y bosque húmedo tropical base (BH-TB), entre los 0 y 4,600 metros de altitud. De los cuales 105 taxones se encuentran en áreas naturales protegidas. [23]

Las regiones ecológicas o zonas de vida forman parte del sistema de zonas de vida de L.R. Holdridge (Anexo 1), que comprenden parámetros como temperatura, precipitación y evapotranspiración. Analizando los parámetros de clasificación, la temperatura es el resultado de la radiación solar; la relación de evapotranspiración potencial, es decir la relación entre la evapotranspiración y la precipitación media anual, es un índice de humedad que determina las provincias de humedad [24].

La evapotranspiración potencial (ETP), es el agua que se devuelve a la atmósfera debido a procesos combinados de evaporación y transpiración, y se puede calcular así:

$$\text{ETP} = \text{Temperatura} * 58.93 \text{ (en milímetros anuales)}$$

Para determinar una zona de vida se calcula la temperatura media y la precipitación total anual y el punto donde intercepten las líneas de biotemperatura y precipitación define la localización del sitio en el diagrama y por consiguiente el mapa. (Ver Anexo 1)

1.2 IMPORTANCIA DEL CULTIVO EN INVERNADERO

Un invernadero es una estructura cerrada cubierta por materiales transparentes, dentro de la cual es posible obtener unas condiciones climáticas artificiales (microclimas) mediante la activación y desactivación manual o automatizada de dispositivos que varían los parámetros ambientales [9].

Una de las más importantes ventajas de los invernaderos es la protección de los cultivos contra las condiciones ambientales externas tales como sol, lluvia, animales, plagas, etc. De ahí que, con este tipo de sistema, se obtiene una producción de mejor calidad que aquellas relacionadas con el cultivo a campo abierto [3].

Los invernaderos permiten el desarrollo de cultivos durante todo el año mediante sistemas de control de riego y temperatura. Este sistema puede ayudar a los agricultores a incrementar su producción y mejorar su medio de subsistencia al mismo tiempo que minimiza las pérdidas.

La misma área de terreno de un invernadero puede proveer de 5 a 10 veces más que un terreno agrícola convencional [19]. Además de proveer protección contra plagas e inclemencias del tiempo, los invernaderos reducen las pérdidas de agua en las plantas hasta en un 30% mediante la reducción de la evapotranspiración lo que permite la expansión de tierras cultivables de áreas anteriormente consideradas inapropiadas para la agricultura [4].

El incremento de la implementación de invernaderos para mejorar las condiciones de cultivo en distintas zonas geográficas a nivel mundial ha dado cabida a diferentes tipos de estructura y materiales que se han ido adaptando a las condiciones ambientales del área de implementación (niveles de radiación solar, precipitación, velocidad del viento, etc.), así como a las características de la especie a cultivar.

La evolución de los invernaderos para diferentes zonas geográficas posibilita clasificarlos por perfil externo de su estructura y régimen térmico como se describen en las tablas 1.1 y 1.2 respectivamente.

Tabla 1.1. Clasificación del invernadero por el perfil externo de su estructura. [25]

Tipo	Características
Plano o tipo parral	Se encuentra constituida por dos partes diferenciadas, una estructura vertical y otra horizontal. La estructura vertical está constituida por soportes rígidos, la estructura horizontal está constituida por mallas de alambre galvanizado superpuesta que sirven para portar y sujetar la lámina de plástico. Se utiliza en zonas poco lluviosas. Son conocidos por su mala ventilación y por la difícil instalación de ventanas cenitales.
Raspa y amagado	Capacidad de evacuar el agua de lluvia. Tiene más altura que el tipo parral por lo que el volumen de aire es mayor y térmicamente funciona mejor. Su éxito se debe a su sencillez y bajo coste. Permite la implantación de sistemas de control y mejora ambiental.
Capilla	Este es el típico invernadero de cubierta plana a una o dos aguas que se utiliza sobre todo con vidrio y con cualquier plástico incluidos los rígidos. Evacuan muy bien la lluvia, una gran ventaja es la colocación de ventanas verticales y cenitales que facilitan mucho la ventilación.

Túnel o semicilíndrico	Se caracteriza por la forma de su cubierta en forma de medio cilindro alargado. La ventilación en mediante ventanas cenitales que se abren hacia el exterior del invernadero y la mecanización de labores en su interior son cómodas.
------------------------	---

Tabla 1.2. Clasificación del invernadero por régimen térmico. [14]

Tipo	Características
Frio	El más económico de mantener, consiste en una estructura que solo recibe el calor del sol. Se usa para sembrar o almacenar plantas de semillero en épocas fuera de su temporada.
Fresco	Mantiene una temperatura mínima de 5-7°C. Se calienta con calor adicional solo por las noches en zonas de clima frio. Se usa para proteger plantas sensibles a las heladas; en verano para cultivos de estación templada; en otoño e invierno para cultivos de clima fresco.
Templado	Mantiene durante día y noche temperatura mínima de 13°C con calor adicional. Se usa para cultivo de hortalizas y muchas plantas anuales.
Cálido	Costoso de mantener, mantiene una temperatura mínima de 18°C con ayuda de calor adicional. Posee sensores de medición climática. Se usa para el cultivo de plantas tropicales y sub tropicales. De uso general en la agricultura.

1.3 SISTEMAS DE CONTROL MICROCLIMÁTICO EN INVERNADEROS

Las variables climáticas tales como temperatura, humedad e iluminación influyen en el desarrollo del cultivo. El control sobre estos parámetros ayuda a mantener las condiciones óptimas dentro del invernadero. Sin embargo la priorización de uno o más de estos parámetros depende de las características del cultivo, a mayor cantidad de parámetros a controlar, el algoritmo del sistema de control aumenta su complejidad.

Un sistema de control permite monitorear las variables climáticas y regularlas mediante elementos de actuación instalados en el interior del invernadero. El tiempo de respuesta, precisión y eficiencia son atribuidos al método o estrategia de control implementado en el invernadero, así como a los elementos de medición (sensores) y regulación (actuadores).

Un sistema de control microclimático hace uso de elementos de medición (sensores), para monitorear las condiciones ambientales dentro del invernadero. La información obtenida es acondicionada y enviada al microcontrolador del sistema que procesa los datos de acuerdo al algoritmo de control programado; seguidamente procede a enviar señales de control hacia los elementos de actuación para mantener las variables ambientales requeridas.

En la Universidad de Tecnología Shenyang en China se propuso un controlador microclimático basado en un algoritmo adaptativo difuso para el control de la temperatura dentro del invernadero, que varía en el tiempo de acuerdo al crecimiento del cultivo. El algoritmo adaptativo difuso permite al controlador la habilidad de aprendizaje adaptativo, que depende de los datos de información para ajustar los parámetros de control del sistema. Comparado con el algoritmo de control adaptativo tradicional, el control adaptativo difuso puede hacer uso de la información difusa del lenguaje común que los expertos proveen. Así que es apropiado para el control de invernaderos en donde existe un alto grado de incertidumbre y perturbaciones aleatorias [26].

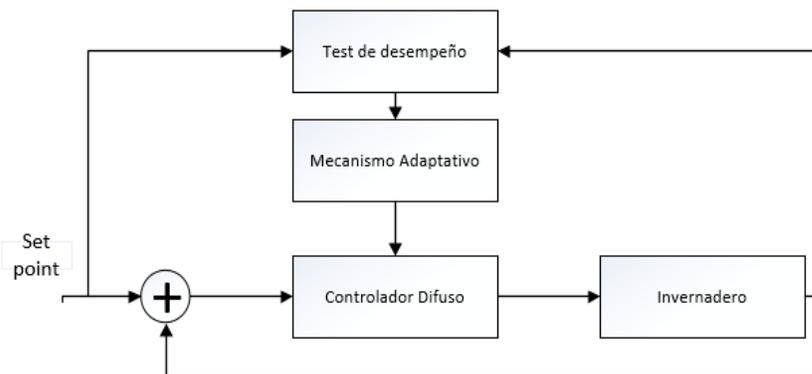


Figura 1.1. Estructura del sistema de control adaptativo difuso [26].

La Universidad Ismail Moulay, ubicada en Meknes, Morocco, el grupo de Sensores, Electrónica e Instrumentación del departamento de Física implementó un modelo dinámico de red neuronal para el control de temperatura y humedad de un invernadero. El modelo neuronal diseñado fue entrenado acorde al algoritmo de Levenberg - Marquardt que actualiza los valores de pesos y enlaces de la red como se muestra en la figura 1.2.

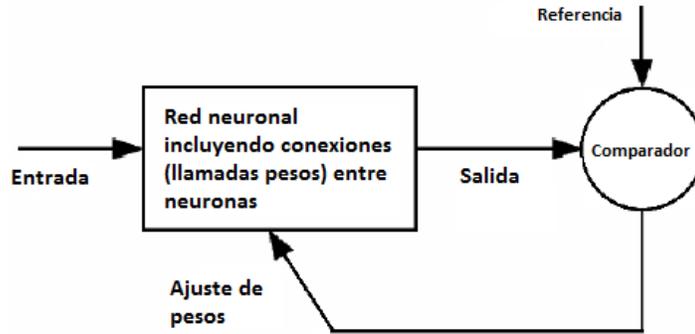


Figura 1.2. Principio del proceso de aprendizaje supervisado de una red neuronal [27]

La base de datos recogida para este experimento consistía en dos grupos: 17,280 datos de entrada/salida (datos del primer y segundo día de registro) por red de aprendizaje y 8,640 entrada/salida para evaluación (datos del tercer día de registro).

Los resultados del mejor modelo de red fue la red con el mínimo error medio cuadrático de 4.05×10^{-4} para la temperatura (figura 1.3) y 11×10^{-4} para la humedad relativa interna (figura 1.4). Se usaron 12 neuronas ocultas en las capas ocultas del modelo como un valor óptimo para el sistema [27].

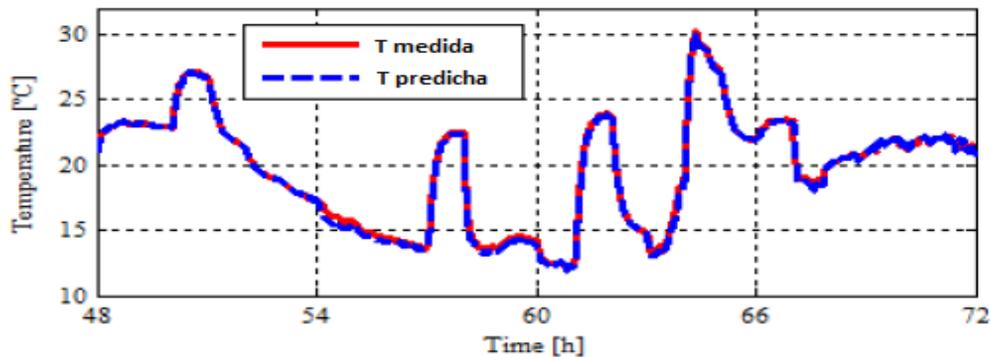


Figura 1.3. Temperatura interna medida y predicha por el sistema de control de red neuronal.

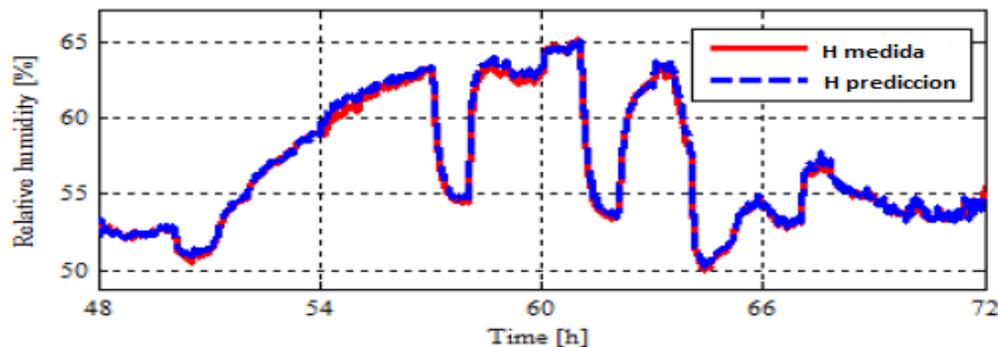


Figura 1.4. Humedad relativa interna medida y predicha por el sistema de control de red neuronal.

1.4 DECLARACIÓN DEL MARCO PROBLEMÁTICO

El Perú se encuentra entre los diez países con mayor biodiversidad. A lo largo de su territorio se encuentran 84 de las 117 zonas de vida del planeta en donde habitan especies de flora y fauna exclusivas de nuestro país.

Un claro ejemplo de ello es la existencia de alrededor del 10% de orquídeas del mundo, de las cuales el 25% son especies endémicas [28], 775 endemismos aproximadamente repartidos en 137 géneros y que habitan principalmente en zonas de vida con niveles de humedad mayores a 60% y temperaturas que oscilan entre los 6 a 27°C.

Sin embargo, la enorme variabilidad de orquídeas en territorio peruano se contrapone con sus bajos niveles de abundancia y con su alta sensibilidad a cambios ambientales, así como a la calidad del hábitat. Una de las mayores amenazas es la sobreexplotación para el comercio y la minería y tala ilegal en áreas de conservación que en los últimos años agudiza el problema de la pérdida en la biodiversidad no sólo de orquídeas sino también de los ecosistemas circundantes [21].

La Autoridad Administrativa CITES ha incluido a todas las especies de orquídeas peruanas dentro del apéndice de Convención sobre el Comercio internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre que tiene como propósito proteger a las especies de plantas y animales contra la sobreexplotación causada por el comercio internacional y asegurar dicho comercio sostenible.

Sin embargo no basta con controlar el comercio, sino también es necesario promover la conservación y el manejo de las poblaciones silvestres de orquídeas a través de la implementación de centros de propagación artificial como los invernaderos. [21]

Los invernaderos como solución para el cultivo de orquídeas, brindan protección en toda época del año y proveen las condiciones ambientales óptimas mediante la implementación de un sistema de control microclimático. En este contexto las orquídeas se verán beneficiadas mediante la replicación artificial de sus hábitats.

La implementación de un sistema de control microclimático que replique las principales zonas de vida de orquídeas endémicas peruanas promoverá su cultivo y conservación sostenible frente a las amenazas a las que se encuentran expuestas actualmente.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE CONTROL MICROCLIMÁTICO EN INVERNADERO

2.1 ESTADO DEL ARTE

2.1.1 MODELO MATEMÁTICO DEL INVERNADERO

El modelo matemático que describe el estado del microclima del invernadero descrito en la Figura 2.1 consiste en un sistema de dos ecuaciones de primer orden y que derivan del principio de balance de masa y energía [2].

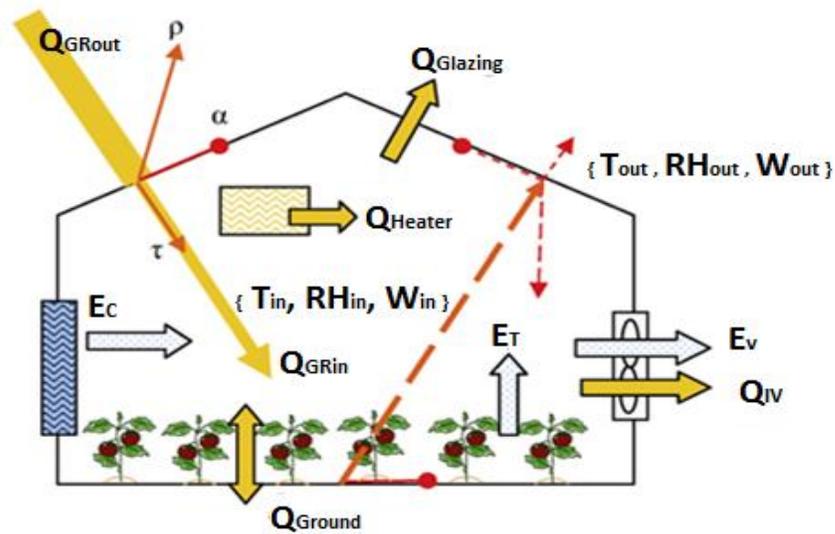


Figura 2.1. Representación del flujo de energía y vapor de agua dentro del invernadero [2].

Los parámetros descritos por las ecuaciones de estado incluyen:

- T_{in} : Temperatura del aire ($^{\circ}C$)
- W_{in} : Humedad absoluta ($g_{agua} kg_{aire\ seco}^{-1}$)
- T_f : Temperatura de la superficie del suelo ($^{\circ}C$)

Tabla 2.1. Variables de entrada del invernadero correspondientes a la figura 2.1

	Variables primarias	Unidades	Variables derivadas	Unidades
Entradas (inputs)	Tiempo	segundos	-	-
	Q_{GRout}	$(W\ m^{-2})$	W_{out}	$g_{agua} kg_{aire\ seco}^{-1}$
	T_{out}	$^{\circ}C$	W_{Sout}	$g_{agua} kg_{aire\ seco}^{-1}$
	RH_{out}	%	VPD_{out}	KPa

Tabla2.2. Variables de salida del invernadero correspondientes a la figura 2.1.

	Variables primarias	Unidades	Variables derivadas	Unidades
Salidas (outputs)			Q_{GRin}	$(W m^{-2})$
	T_{in}	$^{\circ}C$	$W_{S_{in}}$	$g_{agua} kg_{aire\ seco}^{-1}$
	W_{in}	$g_{agua} kg_{aire\ seco}^{-1}$	RH_{in}	%
	T_f	$^{\circ}C$	VPD_{in}	kPa

Donde:

VPD_{in} : Déficit de presión de vapor dentro del invernadero (kPa)

VPD_{out} : Déficit de presión de vapor fuera del invernadero (kPa)

RH_{in} : Humedad relativa dentro del invernadero (%)

RH_{out} : Humedad relativa fuera del invernadero (%)

ECUACIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA

Una ecuación de balance de energía simplificada y aumentada para describir el microclima puede ser expresada como (ASAE, 2003):

$$Q_{GRin} + Q_{Heater} = Q_{IV} + Q_{Glazing} \quad (1)$$

Donde:

Q_{GRin} : Radiación global absorbida dentro del invernadero ($W m^{-2}$)

Q_{Heater} : Energía térmica producida por el sistema de calefacción ($W m^{-2}$)

Q_{IV} : Intercambio de energía por la infiltración y ventilación ($W m^{-2}$)

$Q_{Glazing}$: Calor perdido a través del vidrio ($W m^{-2}$)

Asumimos que la radiación neta de onda larga emitida o almacenada por las plantas, estructura y el cristal es despreciable, como la magnitud de la radiación emitida por cada componente es del mismo orden y se cancelan entre sí.

La radiación global absorbida dentro del invernadero es:

$$Q_{GRin} = \tau_c * (1 - \rho_g) Q_{GRout} \quad (2)$$

Donde:

τ_c : Transmitancia de la radiación solar del material de acristalamiento

ρ_g : Reflectancia de la radiación solar sobre la superficie del suelo

Q_{GRout} : Radiación global exterior (W m⁻²)

Las pérdidas de calor debido a la ventilación e infiltración se estiman por:

$$Q_{IV} = L * E + q_v * C_p * \rho * (T_{in} - T_{out}) \quad (3)$$

Donde:

L : Calor latente de la evaporación del agua (J kg⁻¹)

E : Tasa de evapotranspiración dentro del invernadero (kg m⁻² s⁻¹)

q_v : Tasa de ventilación (m³ m⁻² s⁻¹)

C_p : Calor específico del aire húmedo (J kg⁻¹ K⁻¹)

ρ : Masa específica del aire (kg_{aire seco} m⁻³)

$T_{in} - T_{out}$: Diferencia de temperatura del aire interior y exterior (°C)

El flujo de calor perdido a través del cristal se define como:

$$Q_{Glazing} = k * w * (T_{in} - T_{out}) \quad (4)$$

Donde:

k : Coeficiente de transferencia de calor total (W m⁻² °C⁻¹)

w : Proporción entre las superficies de cristal (A_{gl}) y el suelo (A_{fl})

La radiación térmica producida por el sistema de calefacción (aire caliente) se define como:

$$Q_{Heater} = N_H * \frac{H_{cap}}{A_{fl}} \quad (5)$$

Donde:

N_H : Número de fuentes de calefacción

H_{cap} : Capacidad predefinida de cada fuente de calefacción

A_{fl} : Área de la superficie del suelo del invernadero (m²)

ECUACIÓN DE BALANCE DE MASA (VAPOR DE AGUA)

Para el balance de masa de aire dentro del invernadero se asume que no ocurre condensación en la superficie interior del acristalamiento (debido a la ventilación artificial), ni se produce evaporación desde la superficie del suelo (debido al acristalamiento) y que las únicas fuentes de agua para el ambiente aéreo se introducen mediante el sistema de enfriamiento por evaporación (E_C) y/o la transpiración de las plantas (E_T). La única pérdida de agua del sistema ocurre debido a la ventilación (E_V)

$$E_C + E_T = E_V \quad (6)$$

Entonces, la ecuación de balance de masa resultante será:

$$W_{in} * q_v * \rho + E_T = W_{out} * q_v * \rho \quad (7)$$

Donde:

W_{in} y W_{out} : Humedad absoluta del aire dentro y fuera del invernadero ($g_{agua} kg_{aire\ seco}^{-1}$)

ρ : Masa específica del aire ($kg_{aire\ seco} m^{-3}$)

MODELO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

Tal como describió Jolliet (1999), el factor que muestra la más alta correlación con la transpiración es la radiación solar interior. Se asume que la transpiración es una función lineal de la radiación solar dentro del invernadero.

La transpiración del cultivo en intervalos de 15 minutos, se calcula con la siguiente ecuación de regresión:

$$E_T = \begin{cases} 0,0003 * \tau_C * Q_{GRout} + 0.0021 & \text{para cultivos grandes} \\ 0,0006 * \tau_C * Q_{GRout} + 0.0004 & \text{para cultivos pequeños} \\ 0 & \text{sin cultivos} \end{cases} \quad (8)$$

Considerando el microclima del invernadero (aire encerrado por el acristalamiento del invernadero) como el volumen de control con propiedades homogéneas de temperatura y humedad absoluta dentro del espacio entero. Se concluye que el sistema puede ser descrito mediante las siguientes ecuaciones (Takakura and Fang, 2002); (Takakura e hijo, 2004)

$$Q_{GRin} + Q_{Heater} = L * E - (T_{in} - T_{out}) * (q_v * C_p * \rho + w * k) \quad (9)$$

$$0,0006 * \tau_C * Q_{GRout} + 0.0004 = (W_{out} - W_{in}) * q_v * \rho \quad (10)$$

Donde:

C_p : Calor específico del aire ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)

Se observa la relación e influencia de la temperatura y humedad dentro del invernadero como los parámetros que determinarán su comportamiento.

2.1.2 ENFOQUES DE CONTROL MICROCLIMÁTICO EN INVERNADEROS

Los nuevos enfoques de investigación de control climático en invernaderos están basados en el principio de optimización, por ejemplo: para reducción de energía (Aaslyng , 2003; de Zwart, 1996; Körner, 2003) y consumo de agua (Blasco, 2007); para uso óptimo de CO₂ (Jones, 1989; Linker, 1998; Seginer,1986), o control de humedad (Daskalov, 2006; Jolliet, 1994; Korner y Challa, 2003; Stanghellini, 1992). Otros sistemas de control ambiental implementan diferentes tipos de criterio de control tales como control óptimo de base económica (Tap, 2000; van Henten, 1994), control adaptativo (Udink ten Cate, 1983), control jerárquico multi-objetivo (Ramirez-Arias, 2005), o control predictivo no lineal (El-Ghoumari, 2003). Todas estas aproximaciones ofrecen ventajas de hacer un uso eficiente del recurso en estudio, al maximizar el rendimiento de producción o minimizar el costo de producción, sobre los invernaderos tradicionales donde los puntos de ajuste son definidos por la experiencia del agricultor. [2]

Como resumió von Zabeltitz (1999), distintos modelos de invernadero, basados en ecuaciones de balance de masa y energía, han sido investigados en el pasado y pueden ser clasificados como modelos estáticos y dinámicos. Los modelos más complejos están relacionados a los cultivos dinámicos e incluye distintas variables de estado describiendo el comportamiento del sistema en el tiempo.

En general, un invernadero es un sistema complejo no lineal, que podría ser fuertemente influenciado por el ambiente exterior y por los efectos operacionales de los dispositivos en su interior [10]. Así que es muy difícil de encontrar un algoritmo que satisfaga a un nivel deseado el sistema de control microclimático. Muchos métodos o estrategias de control han sido propuestos por los investigadores. Durante las décadas pasadas, las técnicas del proceso de control en la industria han logrado grandes avances además del mecanismo de control Proporcional Integral Derivativo (PID).

El controlador PID es todavía la forma más efectiva de controlar el microclima en el invernadero gracias a su estabilidad y simplicidad. Sin embargo los parámetros PID no pueden ser determinados por un cierto principio, son definidos usualmente por el método de ensayo y

error o algún método heurístico de ajuste automático. Cómo obtener los parámetros PID óptimos es discutido por un gran número de investigadores. Algunas investigaciones utilizan Matlab para simular los resultados de control PID, y luego ajustan los valores PID de acuerdo a la realimentación. Sin embargo Matlab no es una simulación real, ya que necesita que el usuario proporcione un modelo de control (o función de transferencia) para simular el resultado de control. Este método, es obviamente, impreciso y tiene una gran cantidad de incertidumbre [9].

El modelo climático del invernadero describe la dependencia de la temperatura del aire, humedad, etc. en el interior del invernadero frente a las condiciones climáticas exteriores y el equipamiento de control usando ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden. Estas ecuaciones son formuladas como resultado de un balance de masa y energía de muchos procesos físicos y biológicos.

El avance en la tecnología de sensores, computadoras, métodos de comunicación y automatización ofrece una amplia variedad de opciones para sistemas de control moderno en invernaderos. En vista de que es un sistema no lineal y variante en el tiempo, es conveniente adoptar métodos de control inteligente tales como:

i. CONTROLADORES DE LÓGICA DIFUSA

Un sistema de control de lógica difusa apunta a la formalización del modo de razonamiento humano y permite representar la incertidumbre. Se aplica en el modelamiento de sistemas cuando la información es escasa, imprecisa y/o el comportamiento del sistema es descrito por un modelo matemático complejo.

El modelamiento difuso posee grandes ventajas, como mecanismos de expresiones entendibles del razonamiento humano, la habilidad de adoptar información lingüística de expertos y combinarla con datos numéricos y la capacidad de aproximar funciones no lineales mediante simples modelos [1].

El proceso de lógica difusa consta generalmente de las siguientes operaciones:

- Fusificación: Se relaciona las entradas numéricas a funciones asociadas de entrada, es decir se determinan los grados de pertenencia de las entradas a los conjuntos difusos asociados.
- Evaluación de reglas: Se aplican los operadores difusos a los antecedentes de las reglas difusas de las entradas del sistema.

- Agregación de salidas: Se unifican las salidas de todas las reglas, es decir se combinan las funciones de pertenencia de todos los consecuentes para obtener un único conjunto difuso por cada variable de salida,
- De-fusificación: El resultado final es necesario expresarlo mediante un valor crisp. es decir se cuantifica el conjunto difuso usando un método conocido como centroide, que calcula el punto donde una línea vertical divide el conjunto en dos áreas con igual masa.

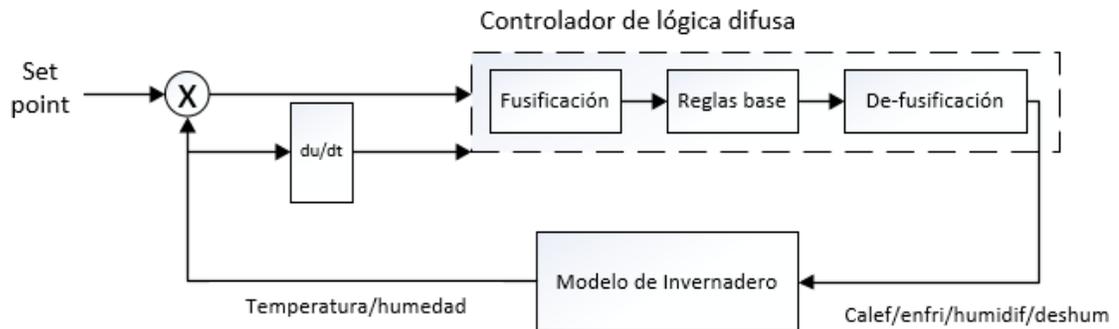


Figura 2.2. Diagrama del controlador de lógica difusa para el control de temperatura en invernadero propuesto en la Universidad Tecnológica de Zhejiang [26].

ii. CONTROLADORES DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las redes neuronales son una herramienta de análisis estadístico que permiten la construcción de un modelo de comportamiento a partir de una determinada cantidad de ejemplos de dicho comportamiento.

La idea es desarrollar un sistema formado por pequeñas unidades de cálculo, en cierta medida muy simples, y hacer mediante conexiones entre ellas que todo el conjunto sea capaz de resolver cierta clase de problema. Una red neuronal está constituida por nodos o unidades que se encuentran unidas mediante conexiones. A cada conexión se le asigna un peso numérico. Los pesos constituyen el principal recuerdo de memoria a largo plazo en las redes neuronales; el aprendizaje, normalmente se realiza mediante la actualización de tales pesos [27].

En general, para describir la operación de una red neuronal artificial, se deben mencionar al menos tres propiedades básicas: la función de transición, la topología de red (depende del tipo de aplicación) y el método de entrenamiento (supervisado o no supervisado). En la figura 2.3 se muestra el modelamiento de un invernadero con una red neuronal propuesto en el Instituto Nacional de Ciencias y Tecnología Aplicada (I.N.S.A.) en Túnez

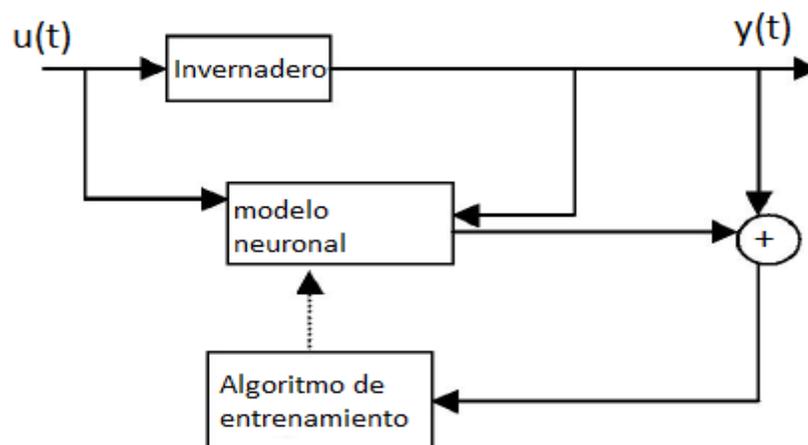


Figura 2.3. Modelo de red neuronal en invernadero, control de temperatura [29].

2.1.3 PLATAFORMAS DE DESARROLLO ELECTRÓNICO

Las plataformas de desarrollo cumplen un importante rol dentro de la industria Electrónica, permitiendo reducir los tiempos involucrados en el diseño de una solución, aumentando la confiabilidad y velocidad de fabricación de un prototipo y, en ocasiones, transformándose en la base del producto final mismo. Con estas placas, el desarrollador puede concentrarse en afinar las prestaciones de su diseño, más que en implementar funcionalidades de bajo nivel, pues éstas ya han sido resueltas por los fabricantes de la plataforma [30].

Por lo general, estas son placas que integran microcontroladores, circuitos y componentes electrónicos que le proporcionan diversas capacidades básicas, como alimentación de energía o comunicación. De este modo, los desarrolladores ya no necesitan dedicarse a implementar una determinada funcionalidad para un proyecto, sino que simplemente deben elegir la plataforma de desarrollo que funcione con el microcontrolador de su preferencia y que cuente con las prestaciones adecuadas.

ARDUINO

Arduino es una plataforma de hardware libre, basado en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo. El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida, Las prestaciones de las placas varían de acuerdo al microcontrolador que utilizan, tamaño, velocidad de procesamiento, número de entradas y salidas, etc. Los microcontroladores más usados son Atmega328P, Atmega32U y Atmega168



Figura 2.4. Placa de desarrollo: Arduino Mega 2560, basado en ATmega1280.

Por otro lado, el software de Arduino consiste en un entorno de desarrollo integrado (IDE) escrito en JAVA y basado en Processing y otros softwares de código abierto. Este software puede ser usado con todas las placas de Arduino en sus diferentes versiones.

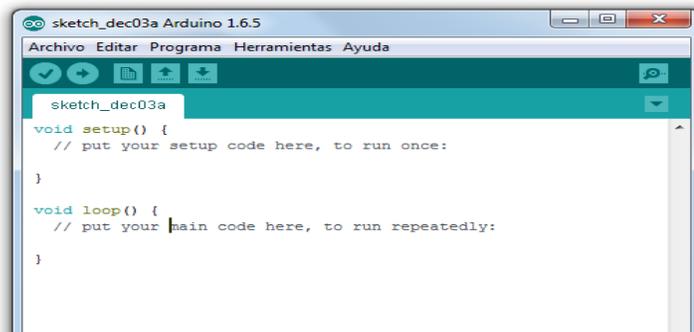


Figura 2.5. Entorno de desarrollo integrado de Arduino.

PINGÜINO

Pingüino es una plataforma de hardware y software libre de prototipado electrónico similar a Arduino y compatible con ella. El hardware está basado en una placa con microcontroladores ©Microchip de 8 o 32 bits (conocido comercialmente como PIC). Utiliza el módulo integrado USB del microcontrolador dándole mayor flexibilidad.

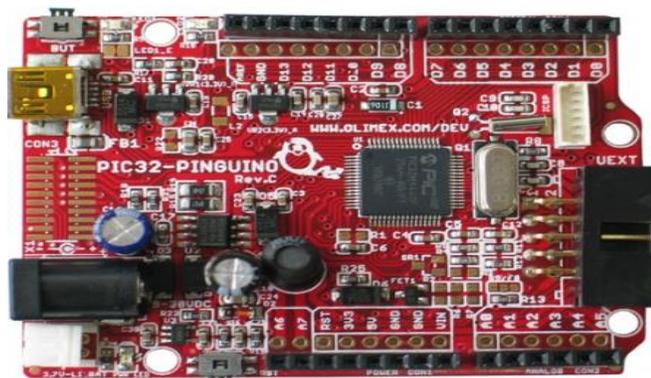


Figura 2.6. Placa de desarrollo Pingüino32, basado en PIC32MX440F256H.

El entorno de desarrollo integrado (IDE) está escrito en Python. Los códigos de programación son similares al de Arduino lo que le brinda sencillez al desarrollador para mantener un orden en su programación.

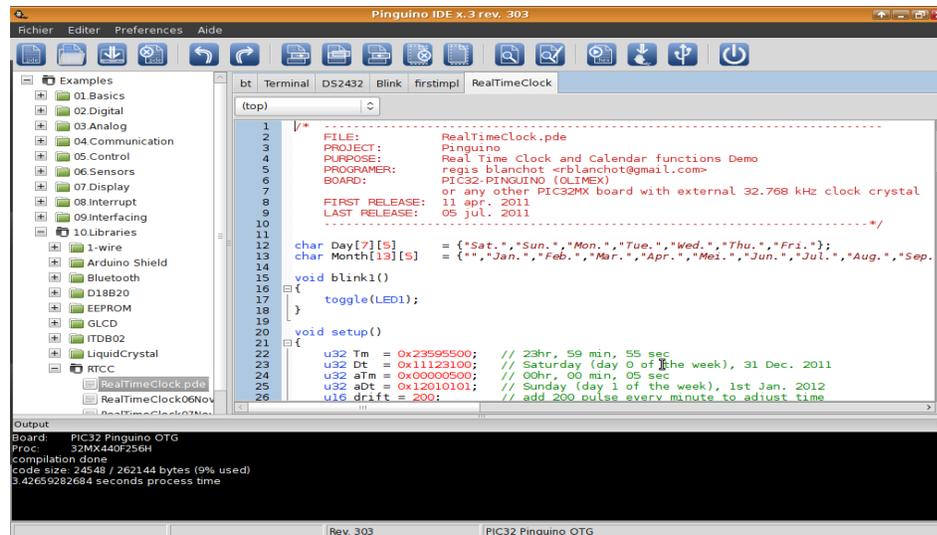


Figura 2.7. Entorno de desarrollo integrado de Pinguino.

2.1.4 SENSORES DE MONITOREO AMBIENTAL

Los sensores son componentes clave en un invernadero, uno de sus roles es monitorear las variables microclimáticas tales como: temperatura., humedad e iluminación que son, generalmente, los principales parámetros para replicar y mantener una zona de vida dentro del invernadero. Los valores serán monitoreados con precisión y cuidado por los sensores respectivos. De acuerdo a los cálculos en el algoritmo de control, se tomarán acciones si alguno de los valores se desvía de su rango definido. Estas acciones usualmente son llevadas a cabo por los actuadores de forma manual o automática. El segundo rol de los sensores es brindar retroalimentación de los actuadores, el proceso de ajuste durará un cierto periodo hasta que la variante retome un valor deseado y adecuado [18].

La verificación de los sensores de humedad y temperatura se realiza mediante la comparación de mediciones con un instrumento comercial y/o industrial confiable. Si se observan desigualdades muy marcadas en distintos escenarios, se procede a cambiar el sensor por otro en mejor estado. Si se observan mediciones aproximadas y constantes en distintos escenarios, se procede a realizar un ajuste de calibración manual. Dentro de las principales variables de medición podemos encontrar sensores de temperatura, humedad e iluminación como se detalla a continuación.

SENSORES DE TEMPERATURA ATMOSFÉRICA

La tecnología de los sensores de temperatura es una de las más usadas en el mundo. Permite medir la temperatura en diferentes aplicaciones y provee protección ante las variaciones de temperatura excesiva. Se estudian cuatro tipos de familias disponibles en el mercado. Cada familia de sensores de temperatura tiene sus ventajas y desventajas. Dependiendo de la aplicación, un sensor puede ser más adecuado que otro [20].

a) Termocuplas

Una termocupla es la unión entre dos cables de metales diferentes. El punto de contacto entre los dos cables genera un voltaje que es proporcional a la temperatura. Las termocuplas son adecuadas para medir en un amplio rango de temperatura, de hasta 2,300°C. Son menos adecuadas para aplicaciones en donde la diferencia de temperaturas pequeñas necesita ser medida con alta precisión.

b) Detectores de temperatura resistivos (Resistive temperature detector -RTD)

Los RTDs son ampliamente usados en muchas aplicaciones industriales tales como aire acondicionado, procesamiento de alimentos, producción textil, microelectrónica, etc. Los RTDs son básicamente dispositivos resistivos sensibles a la temperatura, la resistencia aumenta con la temperatura.

c) Termistores

Similares a los RTDs, los termistores también dependen de mecanismos resistivos. Los Termistores no son tan precisos o estables como los RTDs pero son más fáciles de conectar, cuestan menos y casi todos los tableros de automatización los aceptan directamente. Los termistores están hechos de materiales semiconductores con una resistividad que es especialmente sensible a la temperatura.

d) Circuitos integrados (IC) sensores de temperatura

En aplicaciones de bajo costo, la mayoría de los sensores señalados anteriormente o son caros o requieren circuitos adicionales para su uso. Sin embargo, los circuitos integrados (IC) sensores de temperatura son completos, circuitos basados en silicio con salida digital o analógica. IC sensores de temperatura son usados a menudo en aplicaciones donde la demanda de precisión es baja.

La Tabla 2.3 resume las principales características que ofrecen las diferentes familias de sensores de temperatura ambiental.

Tabla 2.3. Principales características de los sensores de temperatura ambiental.

	Termocupla	RTD	Termistor	Circuito integrado
Rango de medición	(-180 - 1300)°C	(-200 - 700) °C	(-100 - 300) °C	(-60 - 150)°C
Linealidad	No lineal	Lineal	No lineal	Lineal
Precisión	Alta	Media	Alta	Media
Costo	Bajo	Medio	Bajo	Bajo

SENSORES DE HUMEDAD

a) Sensores de humedad capacitivos (Capacitive Humidity Sensors -CHSs)

Los sensores de humedad capacitivos (CHSs) son ampliamente usados en aplicaciones industriales, comerciales y telemetría del clima. Los CHSs consisten de un sustrato sobre el cual una fina capa de polímero u óxido de metal es depositada entre dos electrodos conductores. La superficie de medición está recubierta con un electrodo de metal poroso para protegerlo de la contaminación y exposición a la condensación. El sustrato es típicamente vidrio, cerámico, o silicio. Los cambios en la constante dieléctrica de un CHS son casi directamente proporcionales a la humedad relativa del ambiente que lo rodea.

b) Sensores de humedad resistivos (Resistive Humidity Sensors - RHSs)

Los sensores de humedad resistivos (RHSs) miden los cambios en la impedancia eléctrica de un medio higroscópico (sustancias que absorben humedad del medio circundante) tales como polímeros conductores, sal, o sustratos tratados. Estos sensores son adecuados para el uso en control y visualización de aplicaciones industriales, comerciales y residenciales.

La Tabla 2.4 resume las principales características que ofrecen las diferentes familias de sensores de humedad ambiental.

Tabla 2.4. Principales características de los sensores de humedad ambiental.

	S. Humedad Capacitivos	S. Humedad Resistivos
Rango de medición	(0 - 100) %	(0 - 100) %
Linealidad	Lineal	Lineal
Precisión	Alta	Alta
Tolerancia a condensación	Alta	Baja
Resistencia vapores contaminantes	Alta	Baja
Costo	Bajo	Bajo

SENSORES DE INTENSIDAD LUMINOSA

Las plantas usan la luz en un rango de 400 a 700 nanómetros. Este rango se conoce comúnmente como PAR (radiación fotosintéticamente activa, por sus siglas en inglés). Monitorear la radiación fotosintéticamente activa es importante para asegurar que las plantas reciban una adecuada iluminación para el proceso de fotosíntesis. Típicamente se usa en el monitoreo de invernaderos [20]. Las distintas familias de sensores se muestran a continuación:

a) Sensores fotométricos

Los sensores fotométricos miden la radiación visible o la luz observada por el ojo humano, son altamente sensibles y mayormente usados para medir las condiciones luminosas en interiores.

b) Resistencia dependiente de luz (Light Dependent Resistor - LDR)

Similar a los sensores fotométricos, LDRs miden la luz visible como se ve por el ojo humano. Un LDR es básicamente un resistor; la resistencia interna aumenta o disminuye dependiendo del nivel de intensidad luminosa que incide en la superficie del sensor.

c) Piranómetros

Los piranómetros miden la radiación solar total. Estos sensores son comúnmente usados en la agricultura, meteorología y aplicaciones de energía solar. El sensor está compuesto de un detector fotovoltaico de silicio montado en una cabeza en miniatura. La corriente de salida del sensor es directamente proporcional al nivel de radiación solar.

La Tabla 2.5 resume las principales características que ofrecen las diferentes familias de sensores de intensidad luminosa.

Tabla 2.5. Principales características de los sensores de intensidad luminosa.

	Fotómetro	LDR	Piranómetro
Sensibilidad	Alta	Media	Alta
Tiempo de respuesta	Rápido	Rápido	Rápido
Linealidad	Lineal	Lineal	Lineal
Costo	Alto	Bajo	Alto
Dimensiones	Pequeño	Pequeño	Voluminoso

2.1.5 INTERFACES DE CONTROL Y MONITOREO

Existen diferentes softwares de desarrollo que permiten implementar interfaces de control y monitoreo para las variables climáticas del invernadero.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)

El programa SCADA se utiliza para monitorear el comportamiento climático dentro del invernadero. Este dispositivo permite saber los estados de los actuadores y los valores de las variables climáticas. Además permite modificar los parámetros de control para poder así establecer condiciones climáticas específicas [31].

Un sistema SCADA implementado en un invernadero se refiere a un sistema que es usado para recolectar, monitorear y controlar los parámetros ambientales (temperatura, humedad y concentración de CO₂) en invernaderos. Generalmente, los sistemas incluyen dos jerarquías, denominadas RTU (unidades terminales remotas) y HMI (interface humano maquina).

La RTU, similar a una computadora tradicional inferior, realiza principalmente el control y adquisición de datos en el invernadero; la HMI, similar a una computadora tradicional superior, provee una buena interfaz humano- máquina, almacenamiento masivo de datos y capacidad de cálculos complejos. En la figura 2.8 se muestra el diagrama SCADA de un invernadero propuesto en el Departamento de Telecomunicaciones de la Universidad Wanli Zhejiang en China.

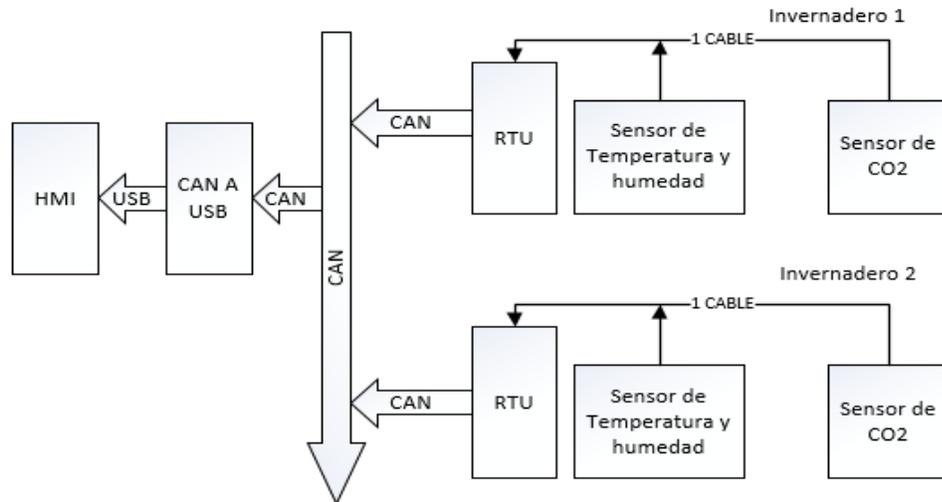


Figura 2.8. Sistema SCADA en un invernadero para el control y monitoreo de la temperatura, humedad y CO₂ [63].

LABVIEW™

LabView™ es una herramienta de programación gráfica. En esta plataforma se puede programar y crear una interfaz de usuario para poder controlar en tiempo real el encendido y apagado de los equipos dentro del invernadero. Además, se puede monitorear las variables climáticas medidas por los sensores, mediante gráficos y adquisición de datos [32]. En la figura 2.9 se muestra una interfaz de un sistema de monitoreo remoto de un invernadero basado en LabView™ en La Universidad de Agricultura del Noreste, en Harbin, China.



Figura 2.9. Interfaz de monitoreo de un invernadero basado en LabView™ [32]

2.2 MODELO TEÓRICO DEL SISTEMA DE CONTROL MICROCLIMÁTICO

Para diseñar un sistema de control microclimático de un invernadero se debe tener en cuenta las características ambientales del lugar de ubicación y los requeridos del cultivo, los parámetros ambientales que se van a controlar, la estructura y materiales del invernadero así como los elementos de control que se utilizarán.

Los elementos de control incluyen a los sensores, actuadores y controlador. El algoritmo de control que gobierna el sistema se implementa en la memoria interna del controlador, los sensores realizan la medición de los parámetros ambientales y los actuadores se encargan de mantenerlos en los rango establecidos por el usuario.

La información adquirida por los sensores es acondicionada y enviada, ya sea de manera analógica o digital al controlador para su procesamiento. El cerebro del controlador es el microcontrolador el cual ejecuta la lógica de control y genera señales que son enviadas hacia los actuadores.

Finalmente, el controlador transmite la información recolectada por los sensores hacia una interfaz de usuaria implementada en una computadora. La interfaz le permite al usuario monitorear y controlar los parámetros ambientales del invernadero mediante el envío de instrucciones a través de la comunicación serial del sistema de control.

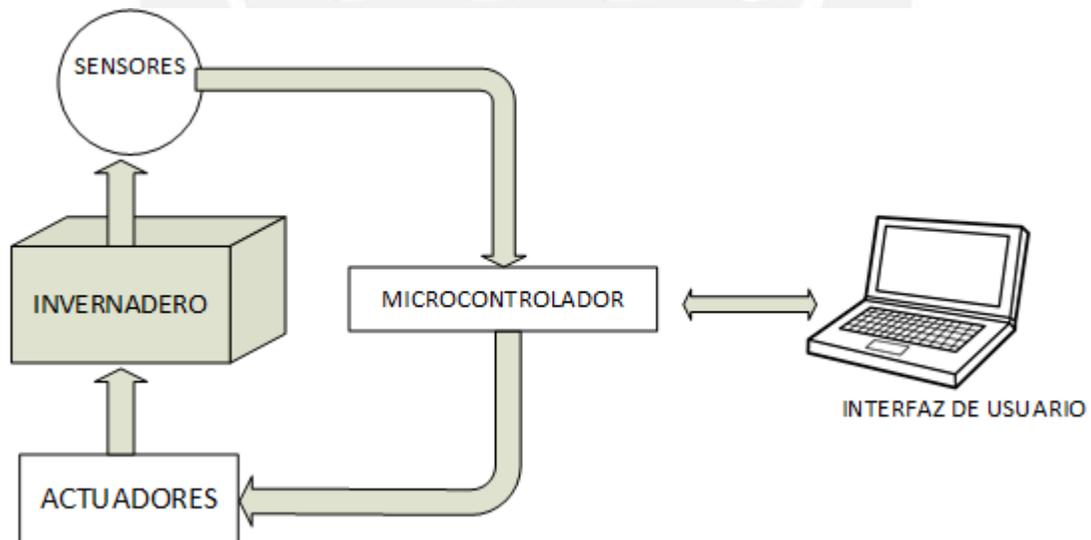


Figura 2.10. Modelo teórico del sistema de control del invernadero

CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL MICROCLIMÁTICO DEL INVERNADERO

3.1. OBJETIVOS

3.1.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de control microclimático (de temperatura, humedad e iluminación) para la preservación de orquídeas endémicas del Perú en un invernadero de Lima.

3.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar los sistemas de control microclimático en invernaderos.
2. Selección de sensores y actuadores.
3. Diseño del sistema de control de temperatura, humedad e iluminación.
4. Diseño de una interfaz de usuario para el control y monitoreo del invernadero.

3.2. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

REQUERIMIENTOS DEL INVERNADERO

El invernadero se encuentra ubicado en las instalaciones de la empresa Incatech S.A.C en el distrito de Ate, en la ciudad de Lima. Con las siguientes coordenadas de latitud: $12^{\circ} 3'30.58''S$ y longitud: $76^{\circ}56'18.44''O$. El invernadero es de tipo capilla a dos aguas cubierto con policarbonato transparente y de estructura metálica (figura 3.1). Su diseño permite una buena distribución de la luz en el interior, además de facilitar la instalación de un sistema de ventilación forzada en los lados laterales del invernadero.

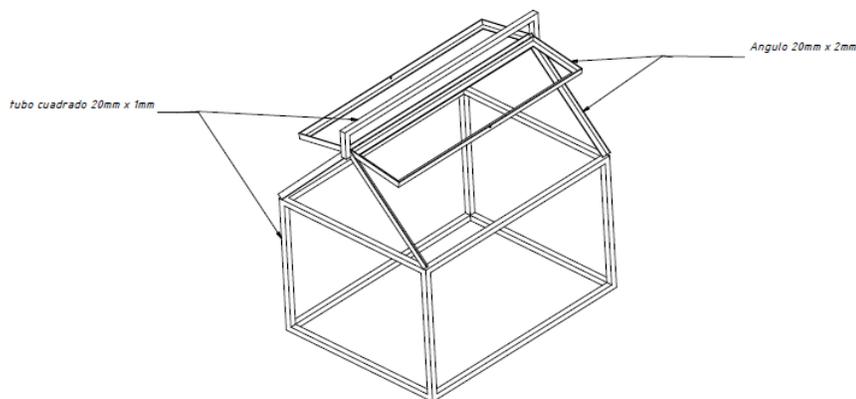


Figura 3.1. Invernadero tipo capilla simétrico a 2 aguas (Anexo 7)

Tabla 3.1. Características de la estructura y materiales del invernadero

Tipo de Estructura	Capilla, simétrica a dos aguas	
Material de cubierta	Policarbonato Alveolar Polygal	
Dimensiones	60 x 80 x 85 cm (ancho x largo x alto)	
Características	Valor	Unidades
Espesor	4	Mm
Peso	800	g/m ²
Temperatura de servicio	40 - 100	°C
Coefficiente de expansión térmica	6.7x10 ⁻⁵	m/m.°C
Aislación térmica (U)	3.9	W/m ² .°C
Coefficiente de aumento solar	0.77	
Transmisión de luz	82	%

(*) Tomado de la hojas de datos del fabricante (Anexo 18)

REQUERIMIENTOS DE LAS ZONAS DE VIDA A REPLICAR

Las zonas de vida replicar en el invernadero abarcan la mayoría de orquídeas endémicas en el Perú y se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Principales zonas de vida de orquídeas endémicas en el Perú

Zona de Vida	Altitud (msnm)	Precipitación anual (mm)	Temperatura media (°C)	Humedad relativa	EVTP
Bosque muy húmedo premontano (BMH-PM)	500 a 2500	2000- 4000	17 - 24	75 – 85 %	0.25 - 0.5
Bosque húmedo premontano (BH-PM)	500 a 2000	936 - 1968	17 - 24	50 – 75 %	0.5 - 1.0
Bosque húmedo tropical base (BH-TB)	0 a 500	2000-4000	24 - 30	50 – 75 %	0.5 – 1.0

Fuente: Diagrama bioclimático de zonas de vida del sistema Holdridge [24]. EVTP: evapotranspiración potencial

CARACTERÍSTICAS DE LA UBICACIÓN DEL INVERNADERO

La ciudad de Lima presenta una humedad relativa (HR) durante la noche y madrugada de alrededor del 90%, disminuyendo al 80% al mediodía en los días de invierno, y al 70% en los días de verano.

Las temperaturas más altas ocurren en el mes de febrero, alcanzando un valor promedio mensual para la máxima y mínima de 27 y 20 °C. Las temperaturas más bajas se presentan en el mes de agosto, alcanzando las temperaturas máximas promedio valores de 19 y 20 °C y las mínimas 14°C o 15 °C [52].

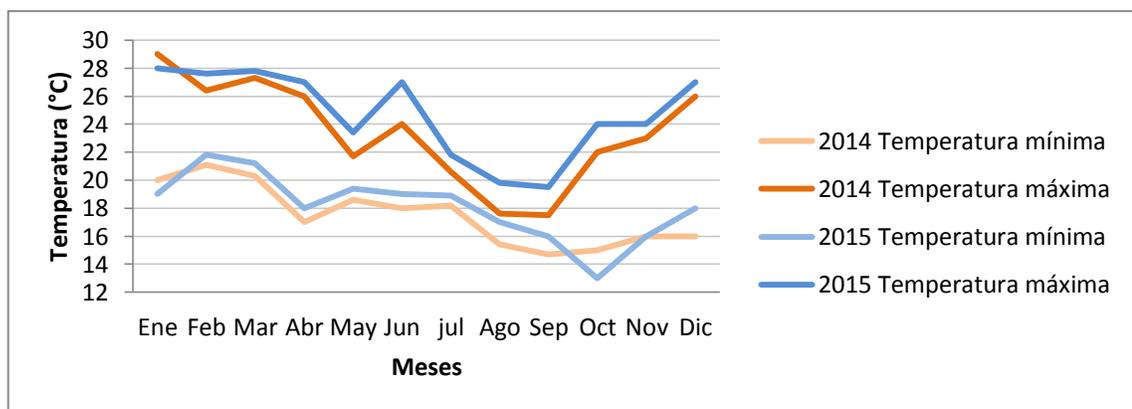


Figura 3.2. Temperatura media en 2014 y 2015 (Boletín climatológico - Senamhi).

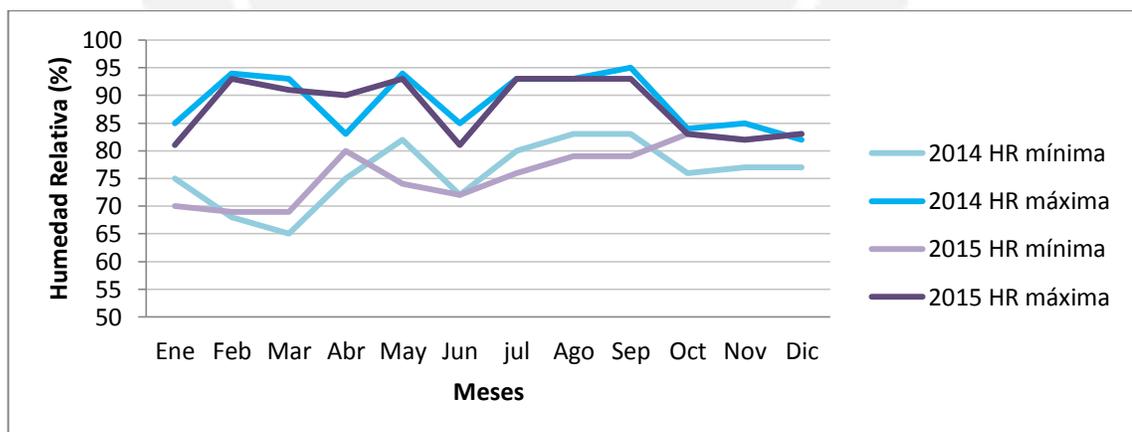


Figura 3.3. Humedad relativa media en 2014 y 2015. (Boletín climatológico - Senamhi).

Para este trabajo, se promedia la temperatura y humedad relativa del 2014 y 2015 y se comparara con las zonas de vida a replicar: Bosque muy húmedo premontano (BMH -PM), bosque húmedo premontano (BH - PM) y bosque húmedo tropical base (Tabla 3.2)

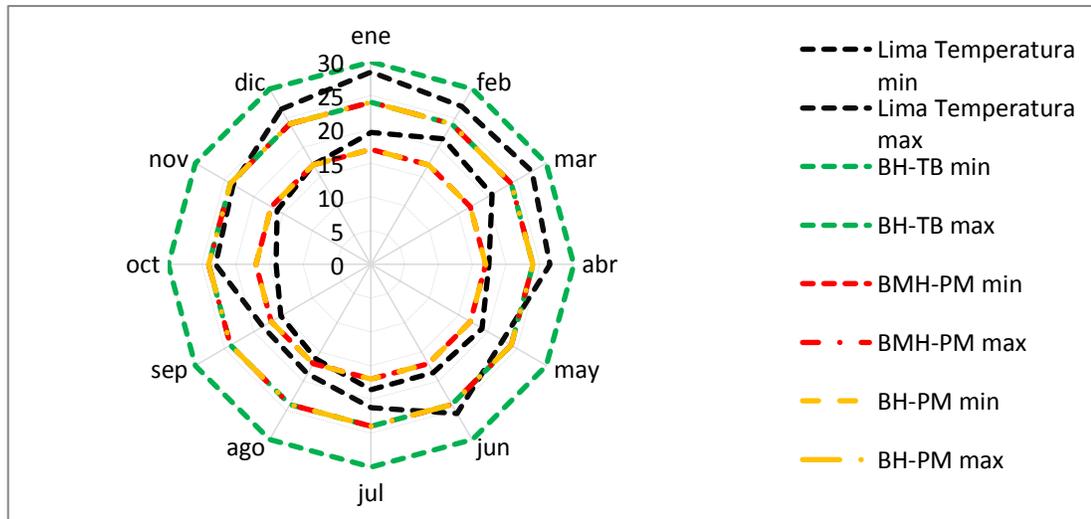


Figura 3.4. Temperatura en Lima vs temperaturas por zona de vida

De la figura 3.4. Las zonas de vida bosque húmedo premontano (BH-PM) y bosque muy húmedo premontano (BMH-PM) se encuentran dentro del rango de temperaturas de la ciudad de Lima. Sin embargo la zona de vida, bosque húmedo tropical base posee temperaturas más elevadas (BH-TB).

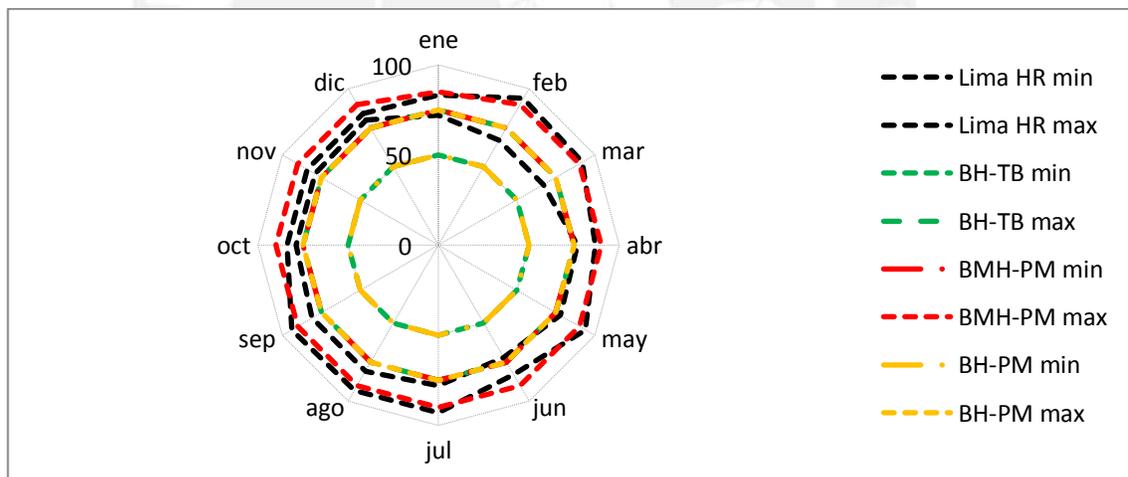


Figura 3.5. Humedad en Lima vs humedad relativa por zona de vida

De la figura 3.5, se observa que la humedad relativa de Lima abarca a la zona de vida bosque muy húmedo premontano (BMH-PM). Para los casos de bosque húmedo premontano (BH-PM) y bosque húmedo tropical base (BH-TB), la humedad relativa máxima coincide con la mínima humedad relativa de la ciudad de Lima en los meses desde enero a julio.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control microclimático está compuesto por un controlador, sensores, actuadores y una interfaz gráfica para la interacción con el usuario por medio de un computador como se observa en la figura 3.6.

Los sensores dentro del invernadero, miden la temperatura, humedad relativa e intensidad luminosa. La información adquirida se envía al microcontrolador para que ejecute los procesos de regulación de temperatura y humedad de acuerdo a la lógica programada.

La regulación de la humedad relativa se lleva a cabo mediante la activación del sistema de humidificación y deshumidificación que se accionan cuando se alcanzan los valores umbrales característicos de cada zona de vida. La regulación de la temperatura comprende el sistema de calefacción para incrementar la temperatura dentro del invernadero y el sistema de enfriamiento para disminuirla. El sistema de iluminación activa la iluminación artificial para ayudar en el proceso de fotosíntesis de las plantas.

Finalmente el microcontrolador se comunica a través del puerto serial con un computador. El computador posee una interfaz gráfica que muestra los parámetros climáticos del invernadero en tiempo real. El usuario podrá configurar el modo de operación del invernadero, elegir el tipo de microclima a replicar y la potencia de los sistemas de regulación.

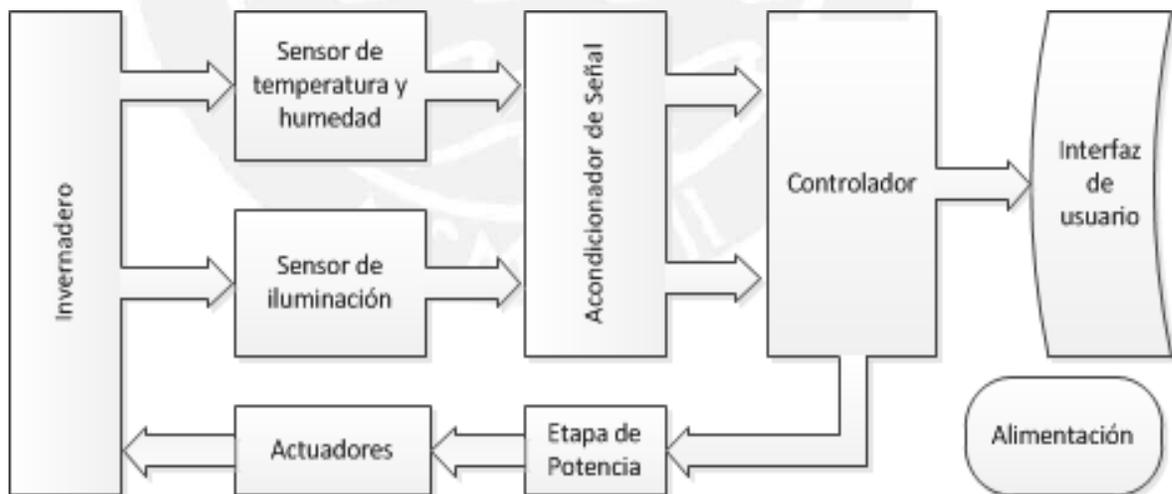


Figura 3.6. Diagrama de bloques del sistema de control microclimático

3.4. CONTROL DIFUSO

En vista de que el invernadero es un sistema no lineal, variante en el tiempo, donde las variables de control (temperatura y humedad) muestran un comportamiento dinámico y no lineal. En este trabajo se seleccionó el método de control inteligente de lógica difusa para controlar la temperatura y humedad; y lógica on/off para el control de la iluminación del invernadero.

El algoritmo de control de lógica difusa permite la habilidad de adoptar información lingüística de expertos y combinarlos con datos numéricos, la capacidad de aproximar funciones no lineales mediante simples modelos permite modelar la temperatura y humedad relativa mediante conjuntos difusos. De esta manera se podrá dar respuesta a estados de ocurrencia como temperatura: fría, templada, cálida y muy cálida; estado de humedad relativa seco, húmedo y muy húmedo.

El algoritmo de control de lógica on/off para la iluminación se seleccionó debido a que no es prioritario tener valores cuantificados a detalle de dicho parámetro. El valor del sensor de iluminación servirá de referencia para activar la iluminación artificial cuando ocurra la disminución de luminosidad durante el día, y desactivará la iluminación artificial durante las noches para permitir la floración de las orquídeas.

La temperatura se agrupa en los conjuntos difusos frío, templado, cálido y muy cálido de acuerdo a la clasificación del Instituto Geofísico del Perú (IGP), con grados de pertenencia según muestra la figura 3.7. La humedad se agrupa en los conjuntos difusos seco, húmedo y muy húmedo de acuerdo a la clasificación de Thornthwaite y con grados de pertenencia según muestra la figura 3.8.

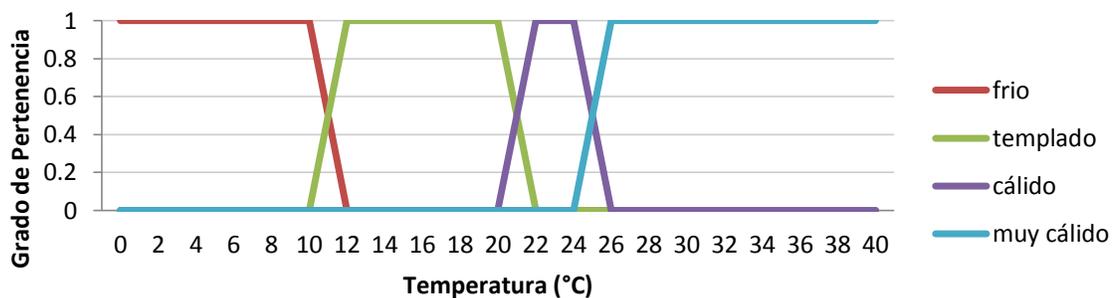


Figura 3.7. Fusificación de la temperatura. Clasificación Instituto Geofísico del Perú (IGP).

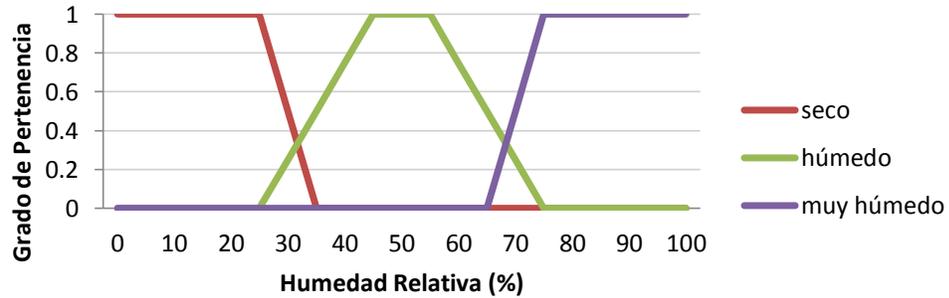


Figura 3.8. Fusificación de la humedad relativa. Clasificación de Thornthwaite.

De acuerdo a los valores de temperatura y humedad relativa mostrados en las figuras 3.7 y 3.8 respectivamente, el sistema de control activará o desactivará los sistemas de regulación para mantener las condiciones de las zonas de vida mostradas en la tabla 3.2.

La figura 3.9 muestra el proceso de regulación de temperatura de las zonas de vida; se activa la resistencia calefactora para incrementar la temperatura y los 2 ventiladores para disminuirla.

Se define E_T , la variable de error de temperatura como:

$$E_T = T_{ZV} - T_{SH}$$

En donde: T_{ZV} es temperatura media de la zona de vida y T_{SH} es el valor medido por el sensor de temperatura.

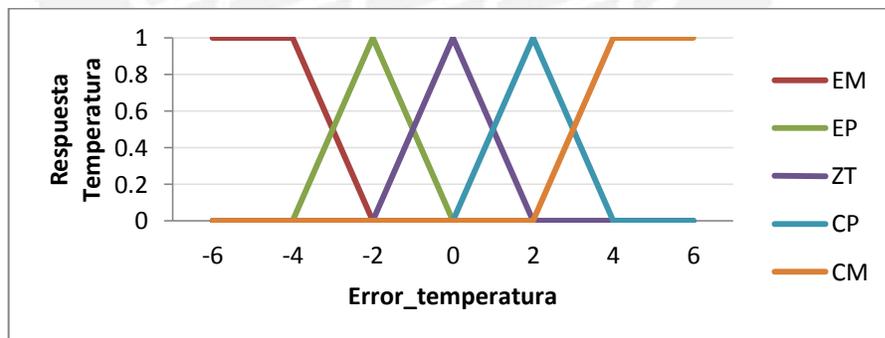


Figura 3.9. Respuesta del sistema a la variable de temperatura. EM: muy caliente, EP: poco caliente, ZT: cero, CP: poco frío y CM: muy frío.

El proceso de regulación de humedad relativa para las zonas de vida Bosque muy húmedo premontano (BMH -PM), bosque húmedo premontano (BH - PM) y bosque húmedo tropical base) se realiza mediante el control del nebulizador ultrasónico y el motor extractor de aire como se observa en la figura 3.10.

Se define E_H , la variable de error de temperatura como:

$$E_H = H_{ZV} - H_{SH}$$

En donde: H_{ZV} es la humedad relativa media de la zona de vida y H_{SH} es el valor medido por el sensor de humedad.

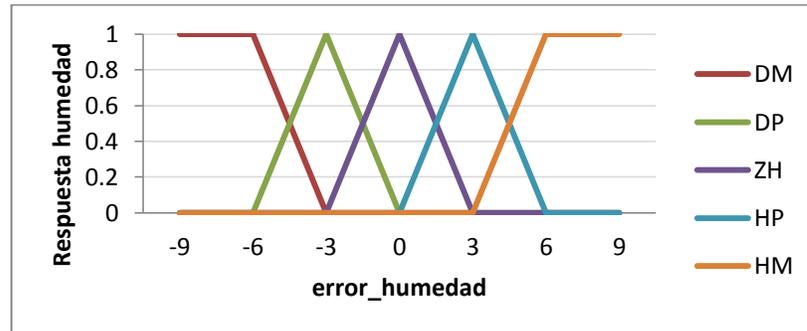


Figura 3.10. Respuesta del sistema a la variable de humedad. DM: muy húmedo, DP: poco húmedo, ZH: cero, HP: poco seco y HM: muy seco.

Las respuestas de los sistemas de regulación son generadas de acuerdo a 10 reglas dadas por el sistema experto. Estas reglas le dan al sistema la capacidad de tomar decisiones para generar las respuestas frente a los eventos que ocurran en el invernadero, estas son:

1. Deshumidificación máxima

Sistema de deshumidificación	100%	Deshumedece
Sistema de circulación	70%	Circulación de aire

2. Deshumidificación mínima

Sistema de deshumidificación	50%	Deshumedece
Sistema de circulación	30%	Circulación de aire

3. Cero Humedad

Sistema de deshumidificación	0%	Deshumedece
Sistema de circulación	0%	Circulación de aire
Sistema de circulación	30%	Circulación de aire

4. Humidificación máxima

Sistema de humidificación	100%	Humedece
Sistema de circulación	40%	Circulación de aire

5. Humidificación mínima

Sistema de humidificación	100%	Humedece
Sistema de circulación	30%	Circulación de aire

6. Enfriamiento máximo

Sistema enfriamiento	100%	Enfria
Sistema de circulación	50%	Circulación de aire
Sistema de humidificación	100%	Ayuda en enfriamiento
Sistema de deshumidificación	70%	Regula aumento de humedad

7. Enfriamiento mínimo

Sistema enfriamiento	70%	Enfria
Sistema de circulación	30%	Circulación de aire

8. Cero Temperatura

Sistema enfriamiento	0%	Enfria
Sistema de calefacción	0%	Calienta
Sistema de circulación	30%	Circulación de aire

9. Calefacción máxima

Sistema de calefacción	100%	Calienta
Sistema de circulación	40%	Circulación de aire

10. Calefacción mínima

Sistema de calefacción	100%	Calienta
Sistema de circulación	60%	Circulación de aire

El sistema de iluminación mediante lógica on/off activa la iluminación artificial cuando se detecta la disminución en la iluminación en el exterior y se desactiva cuando anochece o cuando hay luz natural suficiente de acuerdo a la figura 3.11.

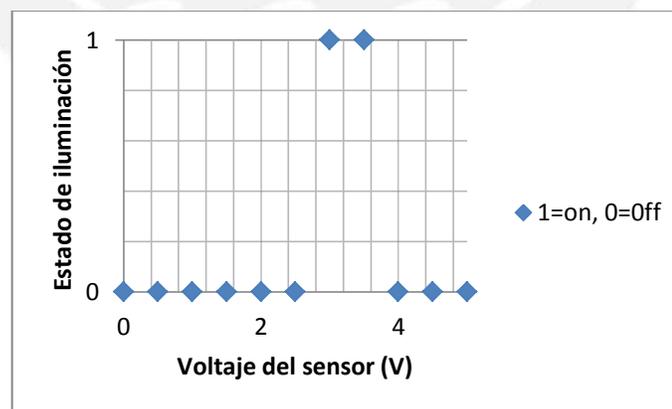


Figura 3.11. Control de iluminación artificial en el invernadero

3.5. SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL

3.5.1. SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

Para la medición de la temperatura y humedad relativa dentro del invernadero, se tomó en cuenta los circuitos integrados sensores de temperatura y humedad, mencionados en el capítulo 2. La facilidad que nos brindan en cuanto a la comunicación serial con el microcontrolador, ya que en general, no requieren de un circuito acondicionador de señal (convertor analógico-digital) se refleja en la simplicidad y el bajo costo del circuito final.

Tabla 3.3. Sensores de Temperatura y humedad relativa (HR) para el invernadero

	DHT22/ AM2302	SHT7175	SHT11
Rango de humedad relativa	(0 – 100) %	(0 – 100) %	(0 – 100) %
Rango de Temperatura	(-40 – 100) °C	(-40 – 123) °C	(-40 – 123) °C
Precisión	HR: ±2 % T: ± 0.5 °C	HR: ±1.8 % T: ± 0.3 °C	HR: ±4.5 % T: ± 0.5 °C
Sensibilidad	HR: 0.1 % T: 0.1 °C	HR: 0.05 % T: 0.01 °C	HR: 0.05 % T: 0.01 °C
Tiempo de respuesta	HR: <5 seg T: <10 seg	R: <8 seg T: <12 seg	R: <8 seg T: <18 seg
Precio (S/.)	25.00	120.00	80.00

(*)Tomado de las hojas de datos de los sensores.



Figura 3.12. Sensor de humedad y temperatura DHT22

La sensibilidad en la medición de temperatura y humedad relativa no es prioritaria en esta aplicación; sin embargo, lo es la precisión, se seleccionó el modelo DHT22, comercialmente conocido como AM2302 que ofrece una precisión menor de +- 0.5°C para la medición de temperatura y de +- 2% para la humedad relativa, tiempo de respuesta promedio menor a 7 segundos y un precio 5 veces menor al de sus pares sensores (debido a la sensibilidad de medición hasta 20 veces menor).

El modelo DHT22 presenta calibración de fábrica y compensación de temperatura, almacena el coeficiente de calibración en su memoria interna. Transmite hasta una distancia de 20m y se conecta directamente a las entradas del microcontrolador.

Tabla 3.4. Características del sensor de temperatura y humedad DHT22 (Anexo 2)

Modelo	DTH22/AMD2302
Alimentación	3.3 – 6 VDC
Elemento de medición	Polímero capacitivo
Precisión	+/- 2 % RH <+/- 0.5 °C
Repetitividad	+/- 1% RH +/- 0.2 °C
Tiempo de respuesta	<5 s para RH <10 s para °C
Dimensiones	14x18x5.5 mm

El proceso de comunicación mediante la interface serial se realiza mediante un bus de datos individual que se usa para la comunicación y sincronización entre el microcontrolador y el sensor DHT22. Cada proceso de comunicación tarda alrededor de 4ms.

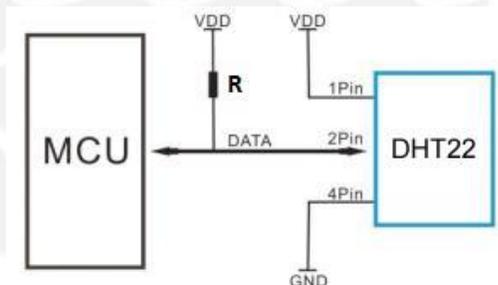


Figura 3.13. Disposición de pines y conexión entre el microcontrolador y el sensor

El sensor transmite 40 bits de datos, 16 bits para la humedad relativa, 16 bits para la temperatura y 8 bits de paridad. Como se observa en la figura 3.13, el pin 2 que transmite los datos al microcontrolador, debe conectarse a una resistencia pull up.

Para iniciar la transmisión, el microcontrolador envía un pulso durante 1ms, luego se mantiene en nivel alto durante 30 us. El sensor responde el pulso de inicio enviando un pulso en bajo, seguido por un pulso alto, ambos de 80 us. A partir de este punto se envían los datos de

temperatura y humedad relativa en los siguientes 40 bits. El ancho de pulso en alto determina si en un “0” o un “1”.

3.5.2. SENSOR DE INTENSIDAD LUMINOSA

La selección del sensor de intensidad luminosa ayudará en el proceso de activación de iluminación artificial para compensar la cantidad de lúmenes necesarios para el cultivo, así como diferenciar entre el día y la noche en el invernadero.

Tabla 3.5. Sensores de intensidad luminosa para el invernadero

	Tipo	Unidades de medición	Temperatura de operación	Potencia (mW)	Precio (S/.)
LDR	Resistivo	(1 a 10,000) K Ω	(-60) a (75) °C	250	3.00
BH1750	Circuito integrado	(65535 – 1) lux	(-45) a (85) °C	260	15.00

(*) Tomado de las hojas de datos del fabricante

Se selecciona el sensor tipo resistivo o LDR (resistencia dependiente de luz) debido a la facilidad de acondicionamiento del circuito, mediante un divisor de voltaje. Ya que, no es prioritario en este proyecto, cuantificar el valor de lúmenes durante el día, el sensor LDR es adecuado para diferenciar valores umbrales de luminosidad (referencia al día y noche).

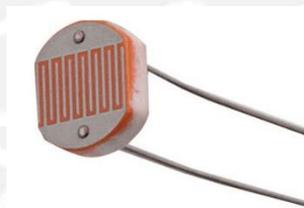


Figura 3.14. Sensor foto resistor o LDR.

Las fotoresistencias o LDRs están compuestas generalmente por sulfuro de cadmio (CdS). El cadmio que contienen reacciona ante la luz, dejando que sus electrones se muevan libremente, lo que permite el paso de la corriente. A mayor incidencia de luz en el componente, disminuirá su resistencia y a menor incidencia de luz aumenta el valor resistivo limitando el paso de corriente.

3.5.3. ACTUADORES

Para la simulación de microclimas dentro del invernadero se cuenta con 2 sistemas de regulación (temperatura y humedad relativa), iluminación y ventilación. Cada sistema consta de elementos de actuación que se activarán mediante la lógica del sistema de control.

REGULACIÓN DE TEMPERATURA

a) Sistema de calefacción:

Para la selección del elemento de calefacción se debe tener en cuenta la potencia térmica suficiente para calentar el interior del invernadero.

Tabla 3.6. Características de elementos de calefacción para el invernadero

	Alimentación	Temperatura	Potencia	Principio	Precio (S./.)
P3D-HEAT40W	12 V DC	(0 - 250) °C	40 W	cerámico	15.00
Resistencia calefactora	220 V AC	(0 - 250) °C	60 W	resistencia	10.00
Air Monster 800	220 V AC	(0 - 250) °C	800 W	Estufa de cuarzo	20.00

Cálculo de la potencia térmica: $Potencia\ Térmica = V \times \Delta T * K$

Donde, V representa el volumen del invernadero (m^3), ΔT es la diferencia de temperatura interior y exterior ($^{\circ}C$) y K es el coeficiente de dispersión [55].

De las dimensiones del invernadero se obtiene: $V = 0.350\ m^3$

La temperatura mínima en Lima se dan en agosto y octubre: $T_{min} = 14^{\circ}C$ y la temperatura máxima que requiere la zona de vida es de $T_{max} = 30^{\circ}C$ (Bosque Húmedo Tropical Base). Entonces la diferencia de temperatura es: $\Delta T = 16^{\circ}C$.

El coeficiente de dispersión policarbonato: $K = 3.9$ (ver tabla 3.1)

Potencia térmica requerida = $V \times \Delta T * K = (0.350\ m^3) \times (16^{\circ}C) \times (3.9) = 21.84\ Kcal/h$.

Potencia térmica requerida = $21.84\ Kcal/h = 25.4\ Watts$

Se selecciona la resistencia calefactora de potencia (60 W) que cubre las necesidades térmicas del invernadero (25.4 watts), se conecta a la red eléctrica sin necesidad de un regulador de voltaje y está disponible en el mercado local.

b) Sistema de enfriamiento

Para la selección del sistema de enfriamiento se utilizarán ventiladores de corriente continua que contribuirán en la circulación del aire. Se considera el tamaño del dispositivo y flujo de aire máximo.

Tabla 3.7. Características de elementos de enfriamiento.

Modelo	Voltaje (V)	Corriente (A)	Dimensiones (mm)	Flujo de Aire máximo (m ³ /min)	Presión de aire máxima (mmH ₂ O)
EFB1512LG	12	0.79	172x150x50.8	5.95	11.90
EFB0912HHE	12	0.53	92X92X38	2.25	9.42

(*) Tomado de las hojas de datos del fabricante

La energía solar recibida durante el día, eleva la temperatura interior del invernadero hasta 5°C. Con un sistema de ventiladores se puede llegar a conseguir la disminución de 5 a 6 °C moviendo caudales que representen entre 60 a 45 renovaciones por hora (r/h) del invernadero.

Se necesita:

Volumen del invernadero: $V = 0.350 \text{ m}^3$

$Q1 (60 \text{ r/h}) = V * 60 = 21 \text{ m}^3/\text{h}$

Se selecciona el ventilador Delta Electronics EFB0912HHE (figura 3.15) con flujo de aire máximo de $2.25 \text{ m}^3/\text{min}$ equivalente a $135 \text{ m}^3/\text{h} > 21 \text{ m}^3/\text{h}$.



Figura 3.15. Ventilador Delta Electronics EFB0912HHE (Anexo 3).

REGULACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA

a) Sistema de humidificación

Para la selección del dispositivo de humidificación se toma en cuenta la capacidad de convertir agua líquida en vapor, el espacio que ocupará dentro del invernadero y la influencia sobre la temperatura interna del invernadero.

Tabla 3.8. Características de elementos de humidificación

	Voltaje	Potencia	Principio	Consumo agua	Dimensiones
Devatec AC4	220 V AC	70 W	Centrifugación	4.5 L/h	31x31x48 cm
Mist Maker DK 24	24 V AC	24 W	Ultrasonido	0.57 L/h	5x5x 4.5 cm
BIONAIRE BWM401	220 V AC	-	Vaporización	0.45 L /h	15x15x30 cm

(*) Tomado de las hojas de datos del fabricante

La mínima humedad relativa alcanzada en Lima es de 65 % (enero – abril), como se observa en la Figura 3.3. Considerando la temperatura promedio mínima de operación dentro del invernadero de 20 °C (abril a noviembre). El caso más extremo requiere alcanzar una temperatura y humedad relativa de 30°C y 85% respectivamente (zona de vida BH-TB).

Datos: $T_i = 20^\circ\text{C}$, $HR_i = 65\%$ $\rightarrow \rho_{\text{vapor agua saturado}} = 17.3 \text{ g/m}^3$ (Tabla termodinámica a 20°C)

Se desea: $T_f = 30^\circ\text{C}$, $HR_f = 85\%$, $\rightarrow \rho_{\text{vapor agua saturado}} = 30.4 \text{ g/m}^3$ (a 30°C)

Entonces: $HR = (\text{Vapor_agua_presente_aire} / \text{Vapor_máximo_agua_saturado}) * 100\%$

$$\text{A } 20^\circ\text{C: } 0.65 = \text{Vapor_ini} / 17.3 \text{ g/m}^3 \quad \rightarrow \text{Vapor_ini} = 11.25 \text{ g/m}^3$$

$$\text{A } 30^\circ\text{C: } 0.85 = \text{Vapor_fin} / 30.4 \text{ g/m}^3 \quad \rightarrow \text{Vapor_fin} = 25.84 \text{ g/m}^3$$

Para el volumen del invernadero ($V = 0.350 \text{ m}^3$), se requiere producir:

$$\text{Vapor_agua_requerido} = (\text{Vapor_fin} - \text{Vapor_ini}) * 0.350 \text{ m}^3 = 14.59 * 0.350 = 5.11 \text{ g}$$

Se selecciona el humidificador Mist Maker DK-24 (figura 3.16) considerando:

- Produce vapor frío
- Consumo de agua de 0.57 L/h
- Ocupa un mínimo de espacio dentro del invernadero. Su volumen es 112.5 cm^3

El humidificador ultrasónico produce vapor de agua mediante la vibración a altas frecuencias de las moléculas de agua, por lo tanto la masa de agua consumida es igual a la masa de agua que se transforma en vapor: Considerando la temperatura de operación inicial de 20 °C

$$\text{Vapor_produc} = (\text{Consumo_agua} / \text{Vol_especifico_agua})$$

$$\text{Vapor_produc} = (0.57 \text{ L/h} / 1.002 \text{ L/Kg}) = 0.5568 \text{ Kg} / \text{h}$$

$$\text{Vap_producido} = 9.48 \text{ g/min} > \text{Vapor_agua_requerido}.$$



Figura 3.16. Humidificador ultrasónico Mist Maker DK-24 (Anexo 4).

b) Sistema de deshumidificación

Para la selección del sistema de deshumidificación se considera las dimensiones del dispositivo y el flujo de aire húmedo que se expulsará al exterior.

Tabla 3.9. Características de elementos de deshumidificación.

	Voltaje (V)	Corriente (A)	Dimensiones (mm)	Flujo de Aire Máximo (m ³ /min)	Presión de Aire Máximo (mmH ₂ O)
BFB1012H	12	1.2	97x94x33	0.72	25.43
BCB1012UH	12	3.20	97x94x25	1.00	102.95
BFB0412LE	12	0.04	42X45X19	0.046	3.23

(*) Tomado de las hojas de datos del fabricante

Nota: Se debe considerar que la humedad relativa deseada será como mínimo la humedad relativa exterior al invernadero. Para el proceso de deshumidificación se debe cumplir que:

$$W_{out} \leq W_{in} \text{ (Capítulo 2.1.1).}$$

Considerando una humedad relativa inicial de 100% dentro del invernadero (que se alcanza con el sistema de humidificación), se desea disminuir la humedad relativa a 50% (humedad mínima de las zonas de vida BH-PM y BH-TB); sin embargo la mínima humedad relativa registrada en

Lima es de 65% (de enero a abril). Se considera una temperatura de operación de 20°C, temperatura natural promedio a lo largo del año dentro del invernadero.

Datos: $T_i = 20^\circ\text{C}$, $HR_i = 100\%$ $\rightarrow \rho_{\text{vapor agua saturado}} = 17.3 \text{ g/m}^3$ (Para 20°C)

Se desea: $HR_f = 65\%$, $\rightarrow \rho_{\text{vapor agua saturado}} = 17.3 \text{ g/m}^3$ (Para 20°C)

Para 100%: $1 = \text{Vapor_ini} / 17.3 \text{ g/m}^3$ $\rightarrow \text{Vapor_ini} = 17.3 \text{ g/m}^3$

Para 65%: $0.65 = \text{Vapor_fin} / 17.3 \text{ g/m}^3$ $\rightarrow \text{Vapor_fin} = 11.25 \text{ g/m}^3$

$\text{Vapor_extra} = (\text{Vapor_ini} - \text{Vapor_fin}) * V_{\text{inv}} = 6.05 \text{ g/m}^3 * 0.350 \text{ m}^3 = 2.12 \text{ g}$

$\text{Volumen_especifico_vapor_agua a } 20^\circ\text{C} = 57.79 \text{ m}^3/\text{Kg}$ (Tablas termodinámicas)

$\text{Vol_requiere_extraer} = 0.00212 \text{ Kg} * 57.79 \text{ m}^3/\text{Kg} = 0.12 \text{ m}^3$

Para garantizar la adecuada ventilación, el caudal del extractor debe ser superior a 10 veces el volumen del aire contenido en el invernadero.

$\text{Vol_extrac} = 0.350 \text{ m}^3 * 10 = 3.5 \text{ m}^3$

Se seleccionó el motor extractor Delta Electronics BFB1012H que genera un flujo de aire máximo de $0.72 \text{ m}^3/\text{min}$ y al ser un motor de corriente continua, facilita su control mediante modulación por ancho de pulso (PWM).

El tiempo para disminuir la humedad relativa dentro del invernadero será:

$T_{\text{deshum}} = (\text{Vol_extrac}) / (\text{Flujo_aire_máx}) = (3.5 \text{ m}^3) / (0.72 \text{ m}^3/\text{min}) = 4.86 \text{ min}$



Figura 3.17. Motor extractor de aire Delta Electronics BFB1012H (Anexo 5)

SISTEMA DE ILUMINACIÓN

Para la selección de los elementos de iluminación se debe considerar la potencia de funcionamiento, el tamaño que ocupan dentro del invernadero y la intensidad luminosa que emiten.

Tabla 3.10. Características de elementos de iluminación.

	Alimentación	Potencia	Intensidad luminosa (cd)	Dimensiones (mm)
Led Ultrabrillante C503C	12 V DC	0.120 W	35	5x5x5
Lámpara halógena VIVION MR16-GU10	220 V AC	50 W	700	50x50x63
Lámpara fluorescente CFL espiral T2/E27	220 V AC	11 W	1170	46x46x93

(*) Tomado de las hojas de datos del fabricante

El sistema de iluminación servirá para compensar la intensidad luminosa de un día nublado en la ciudad de Lima. Un día nublado alcanza los 100 cd de intensidad luminosa, las orquídeas requieren entre 500 a 1000 cd durante el periodo de floración [15].

$$\text{Intensidad_requerida_promedio} \geq 750 \text{ cd}$$

$$\text{Intensidad_compensación} \geq \text{Intensidad_requerida_promedio} - \text{Intensidad_día_nublado}$$

$$\text{Intensidad_compensación} \geq 650 \text{ cd}$$

Se selecciona el led ultrabrillante C503C de color blanco (Anexo 6) debido al bajo consumo de energía (120 mW), ocupa 125 mm³ y vida útil de más de 50,000 horas.

$$\text{Intensidad_C503C} = 35 \text{ cd}$$

$$\text{Leds_necesarios} \geq \text{Intensidad_compensación} / \text{Intensidad_C50} = 650 \text{ cd} / 35 \text{ cd}$$

$$\text{Leds_necesarios} \geq 18.6 \text{ leds}$$

Se seleccionan 20 leds que compensarán en total 700 cd durante un día nublado.

3.5.4. CONTROLADOR

Para seleccionar el controlador se debe tener en cuenta el número de entradas y salidas disponibles, voltaje de alimentación y número de pines disponibles con modulación de ancho de pulso (PWM) para el control de los actuadores. Se requiere:

- Entradas analógicas: 01 sensor de iluminación (LDR)
 Entradas digitales: 01 Sensor de temperatura y humedad (DHT22)
 Salidas digitales: 01 resistencia calefactora
 01 sistema de ventiladores de enfriamiento (PWM)
 01 extractor de aire húmedo (PWM)
 01 humidificador ultrasónico
 01 sistema de iluminación (PWM)
 01 ventilador de circulación de aire (PWM)
- Total: 07 entradas/salidas digitales (04 con configuración PWM)**

Se selecciona la placa de desarrollo Arduino UNO, basado en el microcontrolador ATmega328. Las especificaciones técnicas se muestran en la tabla 3.11.

Tabla 3.11. Especificaciones técnicas de la placa de desarrollo Arduino UNO.

Microcontrolador	ATmega328P	Requerimientos de diseño
Voltaje de Operación	5 V	5 V
Pines de entrada/salida digital	14	Mayor a 7
Pines de salida con configuración PWM	6	Mayor a 4
Pines de entrada analógicas	6	Mayor a 1
Corriente DC por Pin	20 mA	-
Corriente DC para pin 3.3V	50 mA	-
Memoria Flash	32 KB (Atmega328P) 0.5 KB reservado para USB	-
SRAM	2 KB (Atmega328P)	-
EEPROM	1 KB (Atmega328P)	-
Velocidad del reloj	16 Mhz	-
Área	68.6 x 53.4 mm	-

(*) Tomado de la hoja de datos del dispositivo.

3.5.5. ETAPA DE POTENCIA

En esta etapa se encuentran los circuitos eléctricos necesarios para suministrar la potencia adecuada para el funcionamiento de los sistemas de regulación (temperatura y humedad), iluminación y circulación.

Los circuitos de potencia están alimentados por una fuente de computadora de 12 V DC en sus terminales y una corriente máxima de 5 A. Para prevenir las fallas en los circuitos de control producto de los voltajes o corrientes excesivos de los actuadores, así como de los efectos transitorios de los transistores en su conmutación se aislará ópticamente todos los elementos de actuación mediante la implementación de optocopladores. Se seleccionó el optocoplador 4N35 que opera a 6 V, que puede ser suministrado por el controlador. Soporta a su salida un voltaje de colector emisor (V_{ceo}) de hasta 70 V y corriente en el colector hasta 50 mA.

Adicionalmente se usan relay Q22FF 1Z de 12 voltios para la activación de cargas de corriente alterna. La capacidad de contacto del relay es de 15 A.

CIRCUITOS DE REGULACIÓN DE TEMPERATURA

A) CALEFACCIÓN

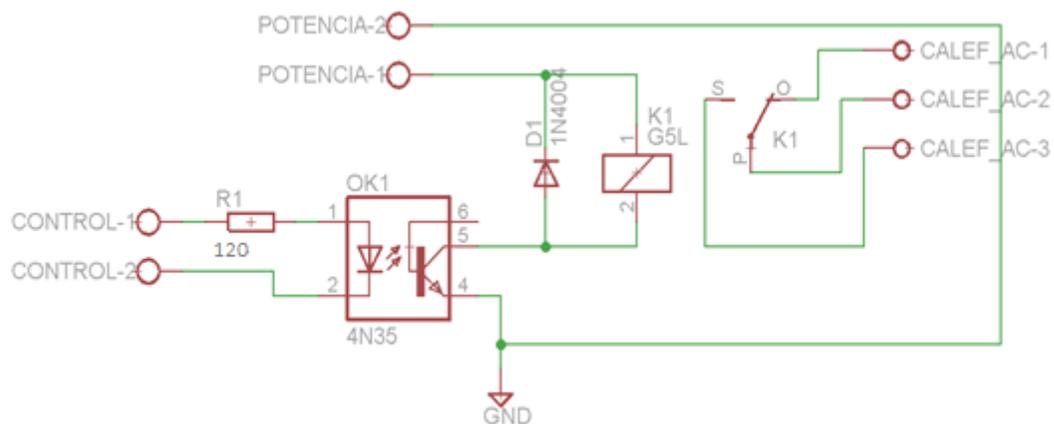


Figura 3.18. Etapa de potencia de la resistencia calefactora

Cálculo de la resistencia R_1 :

De la hoja de datos del optocoplador 4N35: $V_f=1.3$

Entonces:

$$5V = R_1 * I_f + V_f \dots \dots \dots (1)$$

$$5V = R_1 * I_f + 1.3 V$$

Si: $R_1 = 120 \Omega$, resistencia más comercial $\rightarrow I_f = 30 \text{ mA}$

De la hoja de datos del relé Q22FF para un voltaje nominal de 12 V DC en la bobina:

Resistencia de la bobina = 400Ω y voltaje de activación = 8.40 V

De la hoja de datos del optocoplador 4N35: Graficas I_f vs I_c :

Para $I_f = 30 \text{ mA} \rightarrow I_c = 27 \text{ mA}$

$$12V = 400 \Omega * I_c + V_{ce} \rightarrow V_{ce} = 1.2 V \rightarrow V_{\text{bobina}} = 0.4 * 27 \text{ mA} = 10.8 V > 8,40 V$$

La resistencia calefactora de corriente alterna consume 60 Watts a 220 V AC, entonces la corriente es: $3.7 \text{ A} < 10 \text{ A}$ que tolera el relay Q22FF.

B) ENFRIAMIENTO

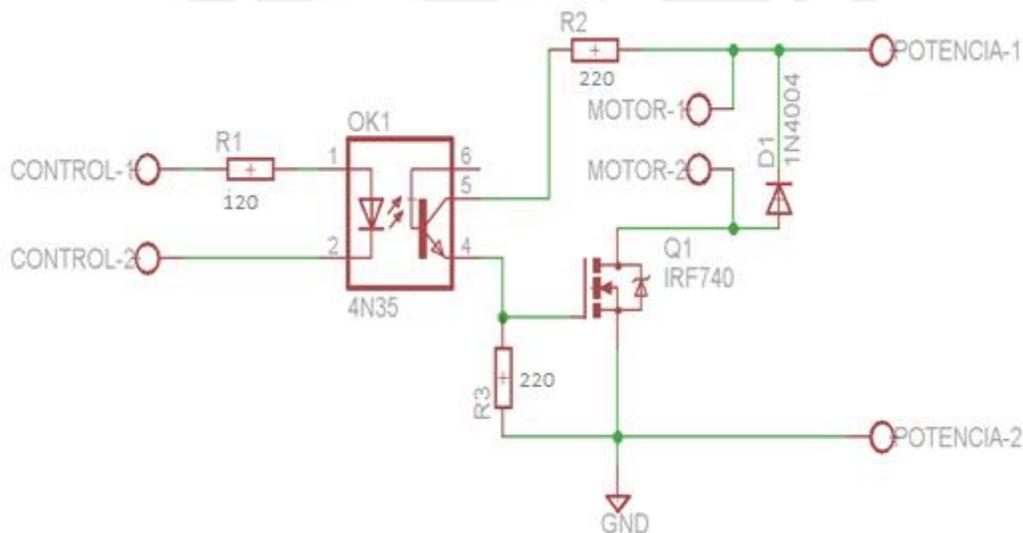


Figura 3.19. Etapa de potencia de los 2 ventiladores enfriadores.

Cálculo de la resistencia R_1 :

De (1): $R_1 = 120 \Omega$

Cálculo de R_2 y R_3 :

$$12V = R_2 * I_c + V_{ce} + I_c * R_3 \dots \dots \dots (3)$$

De la hoja de datos del optocoplador 4N35: Graficas I_f vs I_c :

Para $I_f = 30 \text{ mA} \rightarrow I_c = 27 \text{ mA}$

Se selecciona: $R_2 = R_3 = 220 \Omega$

Entonces: $V_{ce} = 12 - 0.44 \text{ K}\Omega * 27 \text{ mA} = 0.12 \text{ V}$, punto de operación del transistor

El consumo de cada ventilador es de 0.63 A, entonces el consumo total será: 1.26 A

De la hoja de datos del mosfet IRF740: $I_d = 6.3 \text{ A}$

Entonces: $6.3 \text{ A} > 1.26 \text{ A}$. Corriente suficiente para alimentar la carga

CIRCUITOS DE REGULACIÓN DE HUMEDAD

A) HUMIDIFICACIÓN

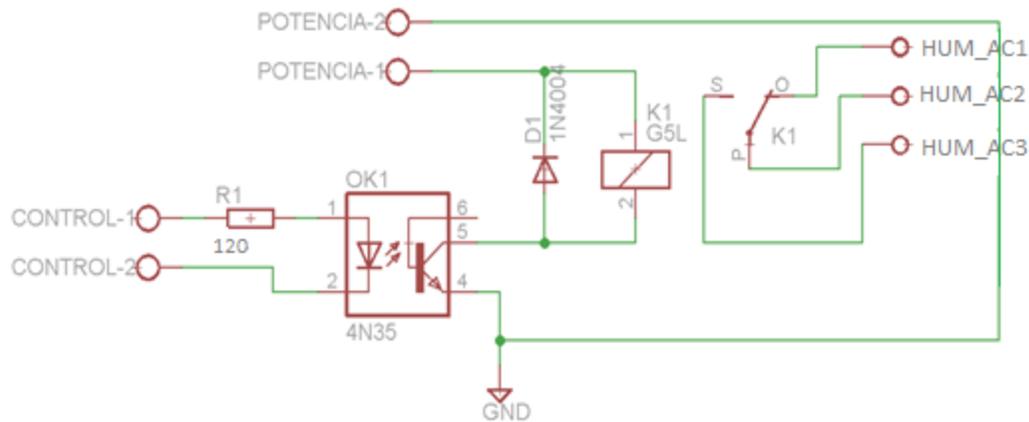


Figura 3.20. Etapa de potencia del humidificador ultrasónico.

El circuito es similar al circuito de calefacción. Entonces:

De (1): $R_1 = 120 \Omega$

El humidificador ultrasónico consume 24 Watts a 24 V AC, el dispositivo posee un transformador de voltaje 220 V AC a 24 VAC y consume una corriente aproximada de 1 A ($< 10 \text{ A Q22FF}$).

B) DESHUMIDIFICACIÓN

El diseño del circuito de deshumidificación es similar al circuito de enfriamiento, por lo tanto:

Cálculo de la resistencia R_1 :

De (1): $R_1 = 120 \Omega$

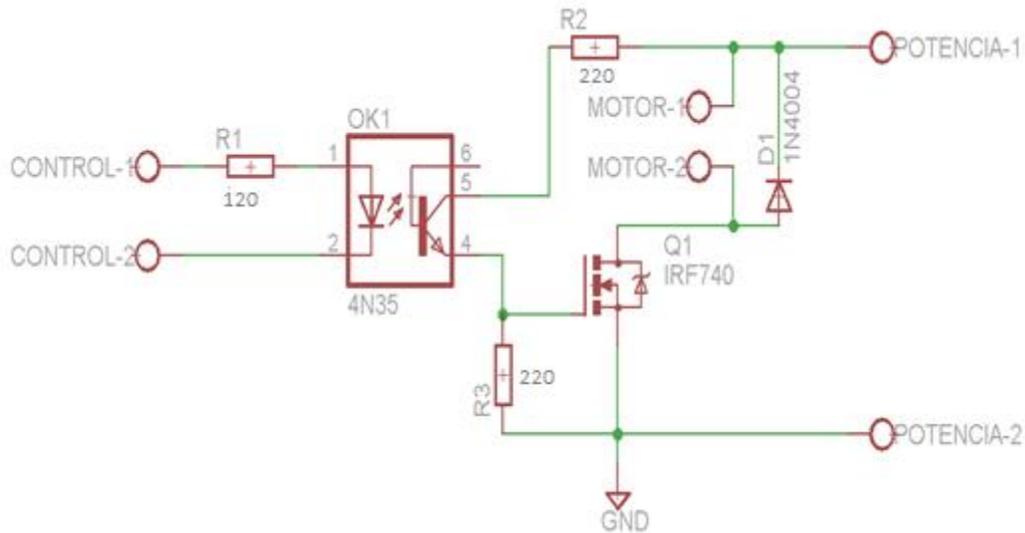


Figura 3.21. Etapa de potencia del extractor de aire

Cálculo de R_2 y R_3 :

De (3): $R_2 = R_3 = 220 \Omega$

El consumo del motor extractor de aire es de 1.2 A

De la hoja de datos del mosfet IRF740: $I_d = 6.3 \text{ A}$

Entonces: $6.3 \text{ A} > 1.2 \text{ A}$. Corriente suficiente para alimentar la carga.

CIRCUITOS DE ILUMINACIÓN:

A) Circuito Iluminación Principal (1 placa):

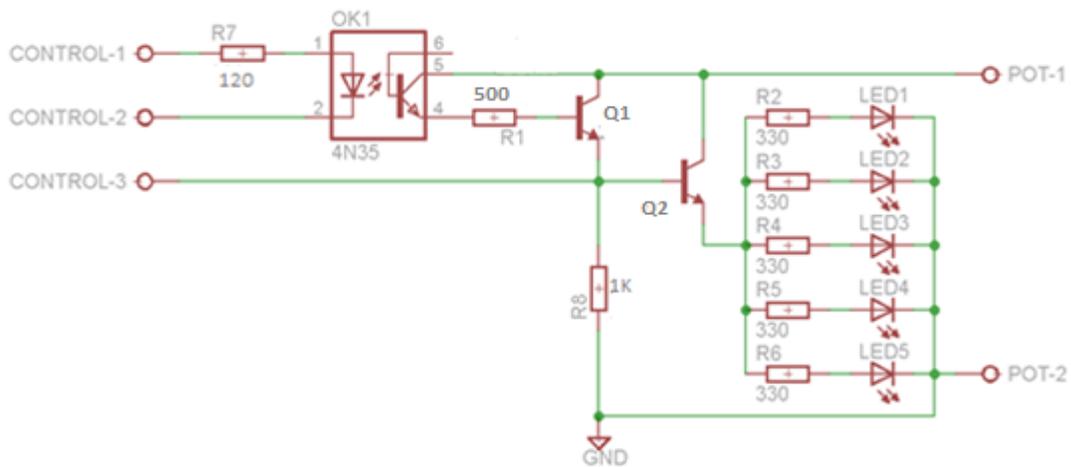


Figura 3.22. Etapa de potencia de los leds de iluminación (principal)

Cálculo de R₇:

De (1): $R_7 = 120 \Omega$

Cálculo de R₂, R₃, R₄, R₅ y R₆:

De la hoja de datos de led blanco ultrabrillante: $I_{led} = 20 \text{ mA}$ y $V_{led} = 3.6 \text{ V}$

La corriente total será: $5 \cdot 20 \text{ mA} = 100 \text{ mA}$. La corriente máxima suministrada por el transistor Q2: 2N3904 es de 200 mA.

$$\text{Sea: } V_X = R_{led} \cdot I_{led} + V_{led} \dots\dots\dots (4)$$

Se elige: $R_{led} = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 330 \Omega$

$$\rightarrow V_X = 0.33 \cdot 20 \text{ mA} + 3.6 \text{ V} = 10.2 \text{ V}$$

$$\text{Entonces: } 12 \text{ V} = V_{CE2} + V_X \rightarrow V_{CE2} = 2.8 \text{ V} > 0.2 \text{ V} (V_{SAT})$$

Calculo de R₈:

$$\text{Sea: } V_Y = V_X + 0.7 \rightarrow V_Y = 10.9 \text{ V}$$

De la hoja de datos Q2: 2N3904: Para $I_{C2} = 100 \text{ mA} \rightarrow \beta_2 = 30$

$$\text{Entonces: } I_{B2} = 100 \text{ mA} / 30 = 3.3 \text{ mA}$$

Para minimizar la corriente que circula por R₈:

$$R_8 = V_Y / I_{R8} \rightarrow \text{Si } R_8 = 1\text{K} \rightarrow I_{R8} = 10.9 \text{ mA}$$

Luego: $I_{B2} + I_{R8} = 14,2 \text{ mA} \leq I_{C1} = 100 \text{ mA}$ (corriente continua del transistor Q1: BC548)

Calculo de R₁:

$$12 \text{ V} = V_{CE} + R_1 \cdot I_C + V_Y + 0.7 \text{ V}; \text{ Donde: } V_Y = 10.9 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 0.4 \text{ V} - R_1 \cdot I_C \rightarrow I_C = I_{BQ2} = I_{C2} / \beta_1 = 0.12 \text{ mA}; \text{ (hoja de datos: } \beta_1 = 110)$$

Seleccionamos: $R_1 = 0.5 \text{ K}$

B) Circuito de iluminación secundario (3 placas):

Cálculo de R_1 , R_2 , R_3 , R_4 y R_5 :

De (4): $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5 = 0.33 \text{ K}\Omega$

$V_{\text{Signal-3}} = V_Y = 10.9 \text{ V} \rightarrow$ Transistor 2N3904 en saturación.

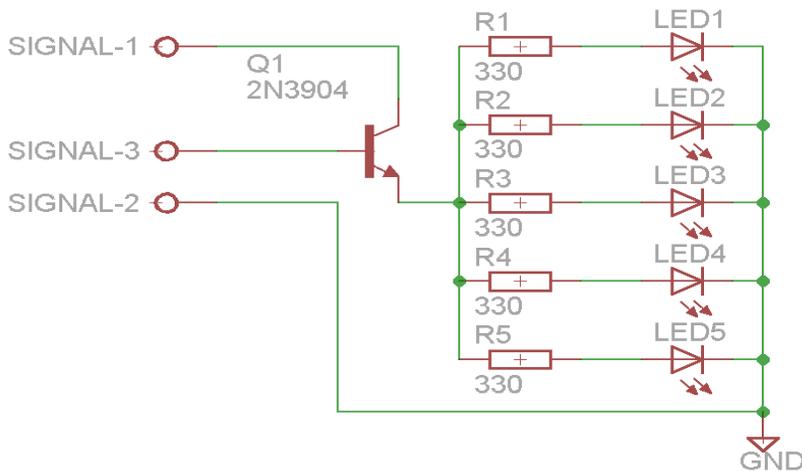


Figura 3.23. Etapa de potencia de los leds de iluminación

CIRCUITO DE CIRCULACIÓN DE AIRE:

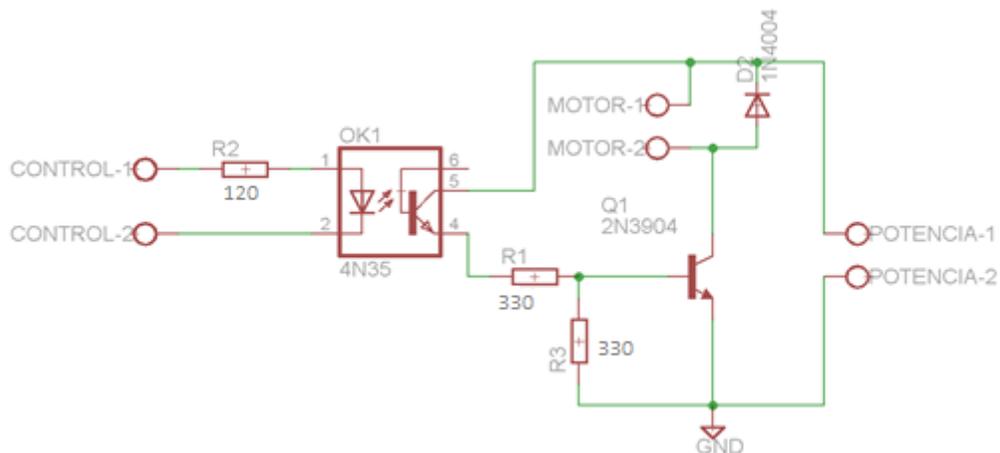


Figura 3.24. Etapa de potencia del ventilador de circulación.

De (1): $R_7 = 120 \Omega \rightarrow I_f = 30 \text{ mA}$

Cálculo de R_1 y R_3 :

Para $I_f = 30 \text{ mA} \rightarrow I_c = 27 \text{ mA}$

$$12 \text{ V} = V_{ce_0} + R_1 * I_{c_0} + 0.7 \text{ V} \Rightarrow V_{ce_0} = 11.3 \text{ V} - 27 * R_1$$

Para $R_1 = 0.33 \text{ K}\Omega$, entonces $V_{ce_0} = 2.39 \text{ V} > 0.2 \text{ V} (V_{SAT})$

Se selecciona $R_3 = 0.33 \text{ K}\Omega$, para crear un divisor de voltaje.

El ventilador consume 160 mA, corriente menor a 200 mA, que proporciona el transistor 2N3904

3.6. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA PRINCIPAL DEL MICROCONTROLADOR

A continuación, se detallan los bloques del diagrama de flujo principal:

- **Configura Serial:** Configuración de la comunicación serial entre la placa Arduino Uno y la interfaz en Processing. 9600 baudios, 8 bits de datos más un bit de parada
- **Inicializa Variables:** Carga las tablas de valores difusos de temperatura y humedad, inicializa las variables de datos y el reloj del sistema.
- **Lee serial:** Recibe los valores de estado, modo, climas y valores de actuadores enviados por el usuario a través de la interfaz.
- **Apaga Invernadero:** Pone a cero el valor de los parámetros y apaga los actuadores en funcionamiento si el usuario decide terminar el proceso.
- **Transmite datos:** La placa Arduino Uno envía los valores de temperatura y humedad, así como el estado de iluminación del invernadero cada cierto intervalo de tiempo configurado (5 segundos) en la programación.
- **Evalúa zona de vida:** En el modo de funcionamiento automático, se evalúa la zona de vida seleccionada por el usuario. Se cargan las condiciones de vida por zona.
- **Fusificación:** Se definen conjuntos difusos de temperatura y humedad. Se les asigna grados de pertenencia a cada conjunto al rango de valores de estos parámetros.
- **Evalúa reglas de vida:** Se realizan las operaciones lógicas con los conjuntos difusos para asignarles una respuesta para cada zona de vida en base a las reglas programadas.
- **Defusificación:** Se realiza la agrupación y cuantificación de las respuestas del sistema para la regulación de temperatura y humedad.
- **Replica zona de vida:** Se procede a activar los actuadores con los valores generados por el sistema de la lógica difusa.
- **Aplica valores modo manual:** Activa los actuadores usando los valores definidos por el usuario mediante la interfaz de la computadora.

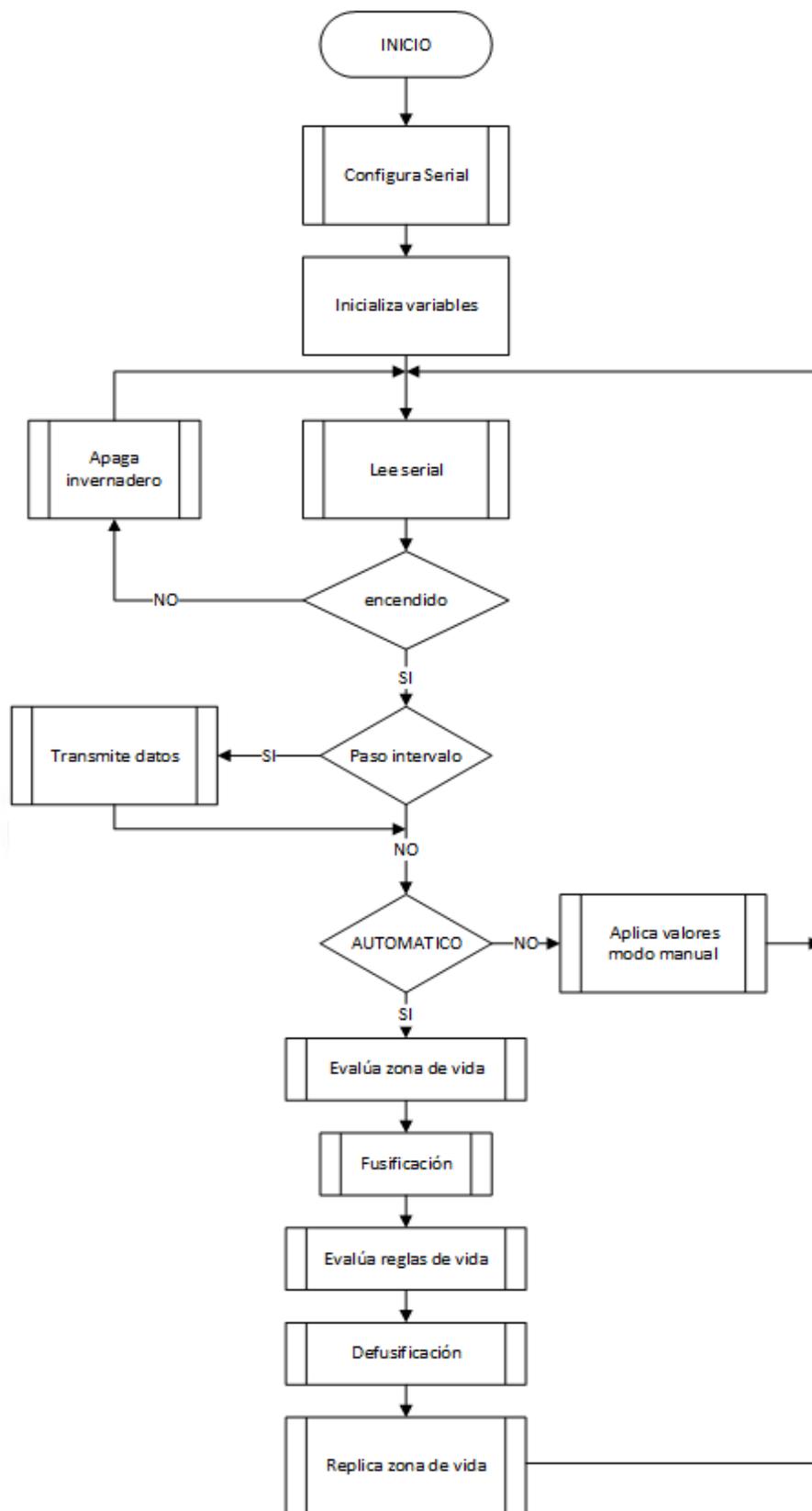


Figura 3.25. Diagrama de flujo del programa principal

3.7. INTERFAZ DE USUARIO

La interfaz de usuario del sistema de se implementara mediante el software Processing, basado en lenguaje Java y orientado a la programación gráfica. La placa de Arduino Uno puede establecer comunicación serial (recibir y enviar valores codificados en ASCII) con la computadora, a través de una conexión por un cable/puerto USB o cable/puerto serie RS-232. La comunicación entre el software Processing y la placa Arduino se lleva a cabo mediante la declaración de una librería implementada en ambos entornos de programación.

El panel principal de la interfaz de usuario consta de cinco secciones y botones de control como se observa en la figura 3. 26.

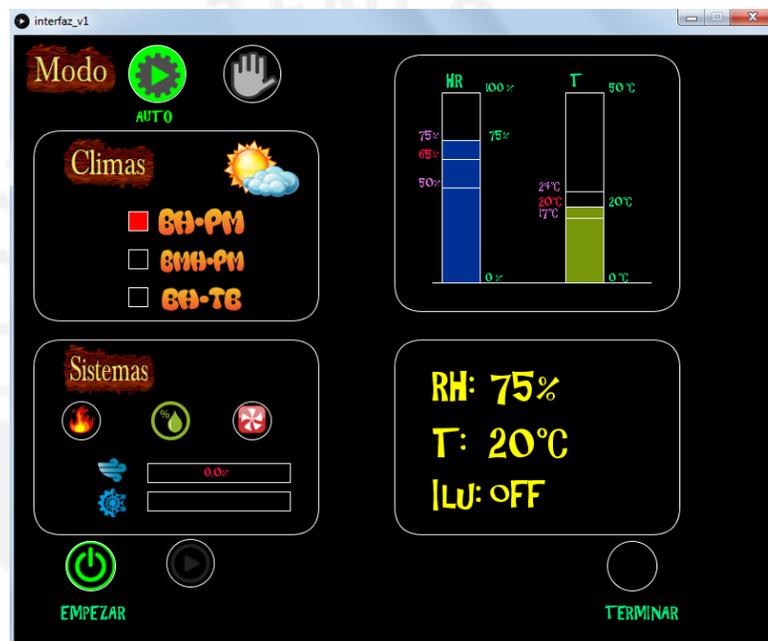


Figura 3.26. Panel principal de la interfaz de usuario del invernadero

La primera sección, ubicada en la parte superior izquierda (sección de modo), contiene los botones “AUTO” y “MANUAL”; permite seleccionar los modos de funcionamiento del invernadero: manual o automático, y activa las dos secciones siguientes respectivamente.

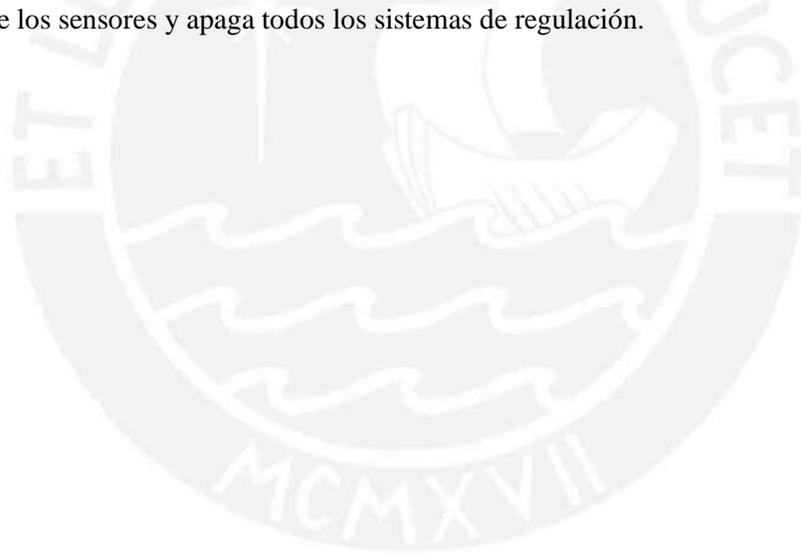
La segunda sección, ubicada en la parte media izquierda (sección de climas), se activa en el modo automático, muestra las tres zonas de vida que el invernadero puede replicar, y permite al usuario seleccionar solo una por vez.

La tercera sección, ubicada en la zona inferior izquierda, se activa en el modo manual y contiene los sistemas de regulación del invernadero. Permite al usuario activar y desactivar los actuadores así como seleccionar la potencia de alguno de ellos (deshumidificación y ventilación).

La cuarta sección, ubicada en la parte superior derecha, muestra en gráficas de barras el valor de la temperatura y humedad así como los valores de referencia (solo para el modo automático) de las zonas de vida seleccionadas.

La quinta sección, ubicada en la parte derecha inferior, muestra los valores de la temperatura y humedad, así como el estado de la iluminación del invernadero.

En la parte inferior del panel principal se encuentran, de izquierda a derecha, los botones iniciar, enviar y terminar respectivamente. El botón encender habilita las secciones de la interfaz para empezar el control y monitoreo del invernadero. El botón “enviar” (botón PLAY) se utiliza cada vez que se desee transmitir las instrucciones seleccionadas en la interfaz. Finalmente el botón terminar se selecciona cuando se desea finalizar la operación del invernadero, inicializa los valores de los sensores y apaga todos los sistemas de regulación.



CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL

Se implementaron los sistemas de regulación de temperatura, humedad e iluminación dentro del invernadero. Las curvas que se muestran en este capítulo fueron generadas en base a los datos recopilados por la interfaz de usuario que crea un archivo de texto que almacena los parámetros de humedad y temperatura en tiempo real cada 2 segundos durante el funcionamiento del sistema de control. El formato del archivo se muestra en la figura 4.1.

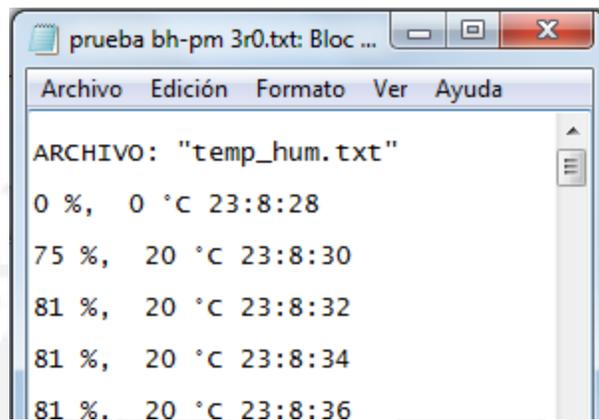


Figura 4.1. Archivo de texto generado por la interfaz de usuario

4.1. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO EN MODO MANUAL

Para realizar las pruebas de funcionamiento en modo manual se activó individualmente cada elemento de regulación (temperatura y humedad). Las condiciones iniciales medidas por los sensores al momento de realizar las pruebas se compararon con las mediciones hechas en las páginas web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senamhi) y AccuWeather.

DESHUMIDIFICACIÓN:

La prueba de deshumidificación manual se llevó a cabo en las siguientes condiciones en el interior del invernadero: Temperatura inicial de 21°C y humedad relativa inicial de 99%. Se activó solo el sistema de deshumidificación al 100% de su potencia. Se observa que la humedad relativa mínima que alcanza el sistema de control, utilizando el extractor de aire en su máxima potencia, está condicionada por la humedad relativa en el exterior del invernadero



Figura 4.2. Interfaz de usuario: modo manual extractor máxima potencia.

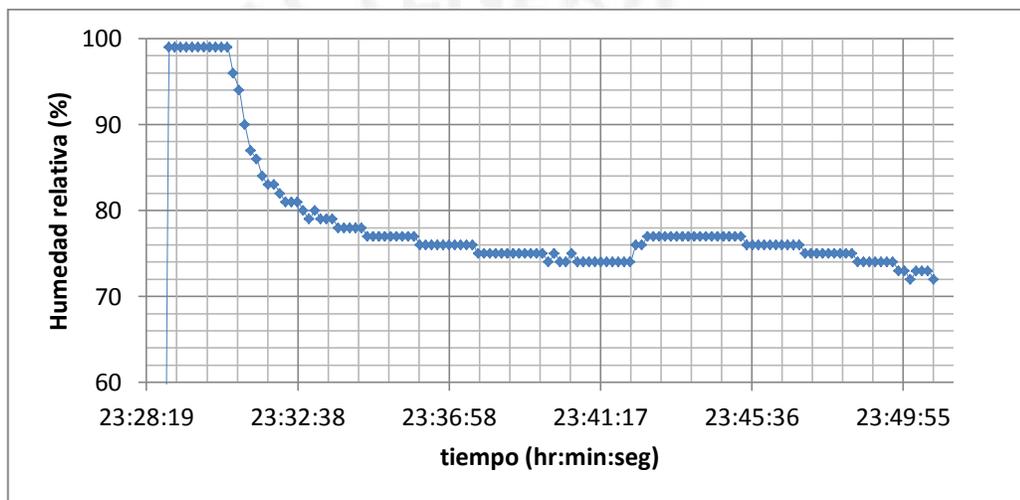


Figura 4.3. Curva de comportamiento de la humedad relativa. Extractor al máximo. Archivo "Manual_mode_deshum1.txt" (Anexo 11)

La prueba de deshumidificación en modo manual utilizando el extractor de aire a máxima potencia logró disminuir en 25% la humedad relativa dentro del invernadero en aproximadamente 10 minutos.

HUMIDIFICACIÓN

La prueba de humidificación manual se llevó a cabo en las siguientes condiciones en el interior del invernadero: Temperatura inicial de 24°C y humedad relativa inicial de 64%. Se activó solo el sistema de humidificación al 100% de su potencia.

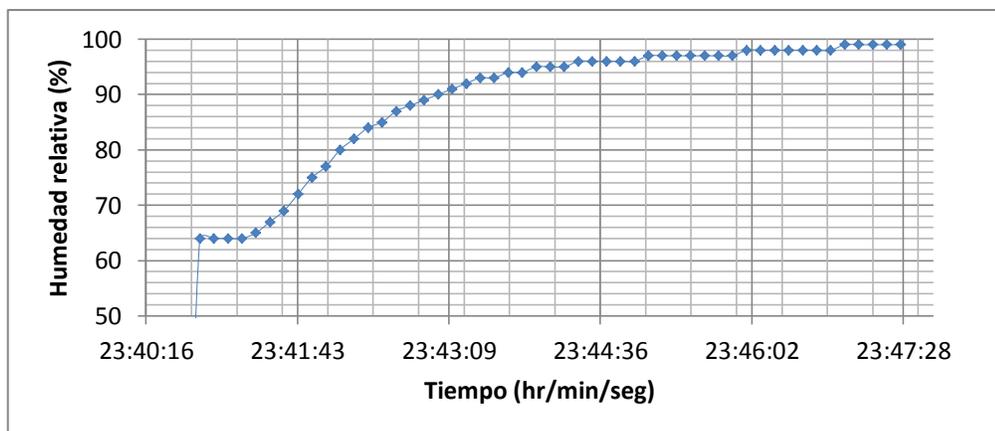


Figura 4.4. Curva de comportamiento de la humedad. Humidificador al máximo. Archivo "Manual_mode_hum1.txt" (Anexo 12)

La prueba de humidificación en modo manual utilizando el humidificador ultrasónico a máxima potencia logró incrementar en 35% la humedad relativa dentro del invernadero en aproximadamente 6 minutos.

CALEFACCIÓN

La prueba de calefacción manual se llevó a cabo en las siguientes condiciones en el interior del invernadero: Temperatura inicial de 21°C y humedad relativa inicial de 73%. Se activó solo el sistema de calefacción al 100% de su potencia.

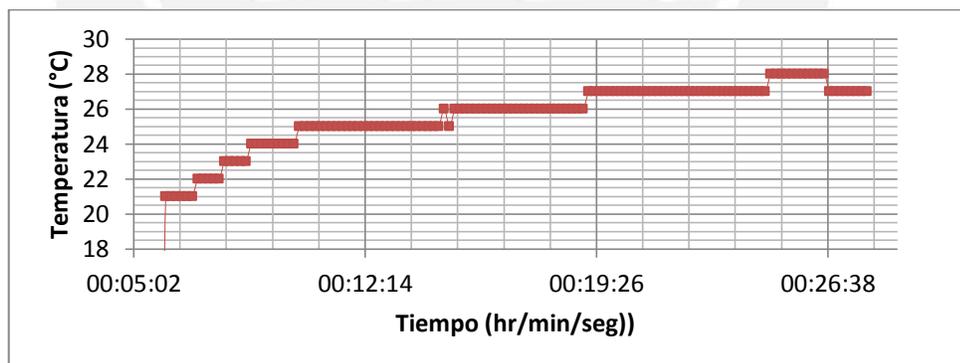


Figura 4.5. Curva de comportamiento de la temperatura. Resistencia calefactora al máximo. Archivo "Manual_mode_calef1.txt" (Anexo 13)

La prueba de calefacción en modo manual utilizando la resistencia calefactora a máxima potencia logró incrementar en 7 °C la temperatura dentro del invernadero en aproximadamente 20 minutos.

ENFRIAMIENTO

La prueba de enfriamiento manual se llevó a cabo en las siguientes condiciones en el interior del invernadero: Temperatura inicial de 25°C y humedad relativa inicial de 68%. Se activó solo el sistema de enfriamiento al 100% de su potencia.

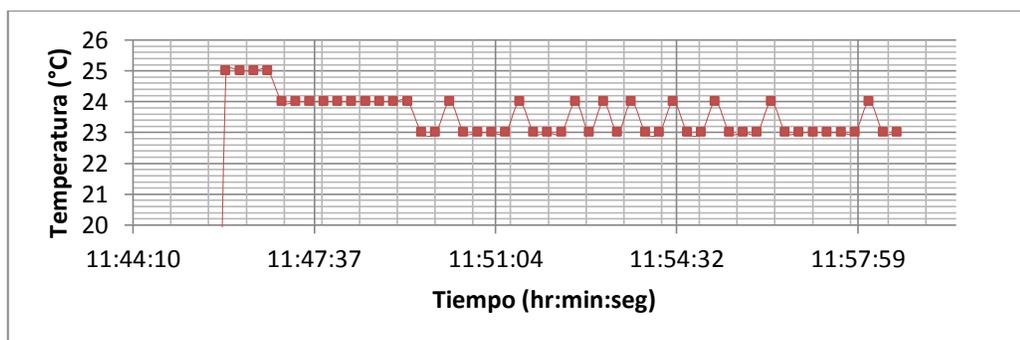


Figura 4.6. Curva de comportamiento de la temperatura. Ventiladores al máximo. Archivo "Manual_mode_enf1.txt" (Anexo 14)

La prueba de enfriamiento en modo manual utilizando los ventiladores a máxima potencia logró disminuir en 2 °C la temperatura dentro del invernadero en aproximadamente 4 minutos. Se observa que activando solo los elementos del sistema de enfriamiento no se logra una disminución significativa de temperatura, por lo tanto se debe complementar o adicionar otros mecanismos que ayuden a enfriar el interior del invernadero.

4.2. PRUEBAS DEL FUNCIONAMIENTO EN MODO AUTOMÁTICO

El funcionamiento del invernadero en modo automático, utiliza las reglas de lógica difusa implementadas en el microcontrolador para establecer los parámetros de humedad relativa y temperatura de acuerdo a los valores de referencia de cada zona de vida.

PRUEBA: REPLICAR ZONA DE VIDA - Bosque húmedo premontano (BH-PM)

Tabla 4.1. Condiciones iniciales y parámetros de referencia de BH-PM

$T_{inicial}$ (°C)	$HR_{inicial}$ (%)	T_{BH-PM} (°C)	HR_{BH-PM} (%)	T_{ref} (°C)	HR_{ref} (%)
24	99	[17-24]	[50-75]	20	65

Humedad relativa inicial: muy húmedo. Clasificación de Thornthwaite.

Temperatura inicial: cálido. Clasificación Instituto Geofísico del Perú.

Temperatura: $E_T = 20^\circ\text{C} - 24^\circ\text{C} = -4^\circ\text{C}$ → Regla: Enfriamiento máximo

Humedad relativa: $E_H = 65\% - 99\% = -34\%$ → Regla: Deshumidificación máxima

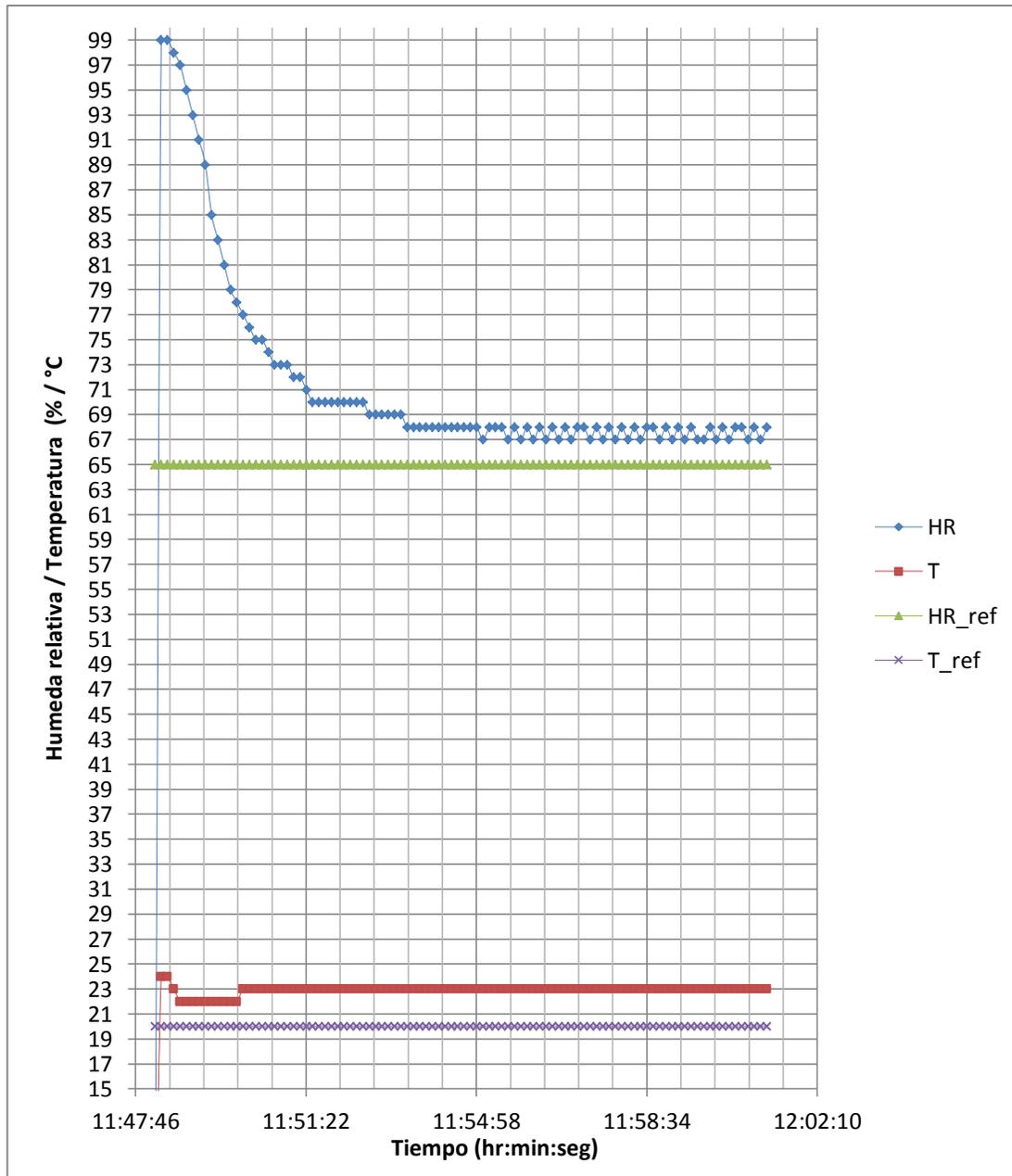


Figura 4.7. Respuesta de la temperatura y humedad relativa del sistema de control en modo automático. Replicación de la zona de vida Bosque Húmedo premontano. (Anexo 15)

El sistema de control en modo automático, logró reducir la humedad relativa inicial en 32 % para alcanzar un valor de referencia (65 %) de la zona de vida en 5 minutos aproximadamente manteniendo un error de estado estable menor a +3 %. Paralelamente, la temperatura dentro del invernadero se redujo en 2 °C en aproximadamente 3 minutos y mantuvo un error de establecimiento menor a +3 °C. La figura 4.7 muestra el comportamiento de la temperatura y humedad relativa del sistema de control para lograr replicar la zona de vida BH-PM.

PRUEBA: REPLICAR ZONA DE VIDA 2 - Bosque muy húmedo premontano (BMH-PM)

Tabla 4.2. Parámetros de condiciones iniciales y referencia. Prueba para BMH-PM

$T_{inicial}$ (°C)	$HR_{inicial}$ (%)	T_{BMH-PM} (°C)	HR_{BMH-PM} (%)	T_{ref} (°C)	HR_{ref} (%)
23	66	[17-24]	[75-85]	20	80

Humedad relativa inicial: húmedo. Clasificación de Thornthwaite.

Temperatura inicial: cálido. Clasificación Instituto Geofísico del Perú.

Temperatura: $E_T = 20^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C} = -3^\circ\text{C}$ → Regla: Enfriamiento mínimo

Humedad relativa: $E_H = 80\% - 66\% = +14\%$ → Regla: Humidificación máxima

El sistema de control en modo automático, logró incrementar la humedad relativa inicial en 17 % para alcanzar el valor de referencia (80 %) de la zona de vida en 2 minutos aproximadamente manteniendo un error de estado estable menor a -4 %. Paralelamente, la temperatura dentro del invernadero se redujo en 4 °C en aproximadamente 5 minutos y mantuvo un error de establecimiento menor a +1 °C. La figura 4.8 muestra el comportamiento de la temperatura y humedad relativa del sistema de control para lograr replicar la zona de vida BMH-PM

PRUEBA: REPLICAR ZONA DE VIDA 3 - Bosque húmedo tropical base (BH-TB)

Tabla 4.3. Parámetros de condiciones iniciales y referencia. Prueba para BH-TB

$T_{inicial}$ (°C)	$HR_{inicial}$ (%)	T_{BH-TB} (°C)	HR_{BH-TB} (%)	T_{ref} (°C)	HR_{ref} (%)
20	75	[24-30]	[50-75]	27	65

Humedad relativa inicial: muy húmedo. Clasificación de Thornthwaite.

Temperatura inicial: templado. Clasificación Instituto Geofísico del Perú.

Temperatura: $E_T = 27^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = +7^\circ\text{C}$ → Regla: Calentamiento máximo

Humedad relativa: $E_H = 65\% - 75\% = -10\%$ → Regla: Deshumidificación máxima

El sistema de control en modo automático, logró disminuir la humedad relativa inicial en 13 % para alcanzar el valor de referencia (65 %) de la zona de vida en 10 minutos aproximadamente manteniendo un error de estado estable menor a +2 %. Paralelamente, la temperatura dentro del invernadero incrementó en 7 °C en aproximadamente 10 minutos y mantuvo un error de establecimiento menor a -2 °C. La figura 4.9 muestra el comportamiento de la temperatura y humedad relativa del sistema de control para lograr replicar la zona de vida BH-TB

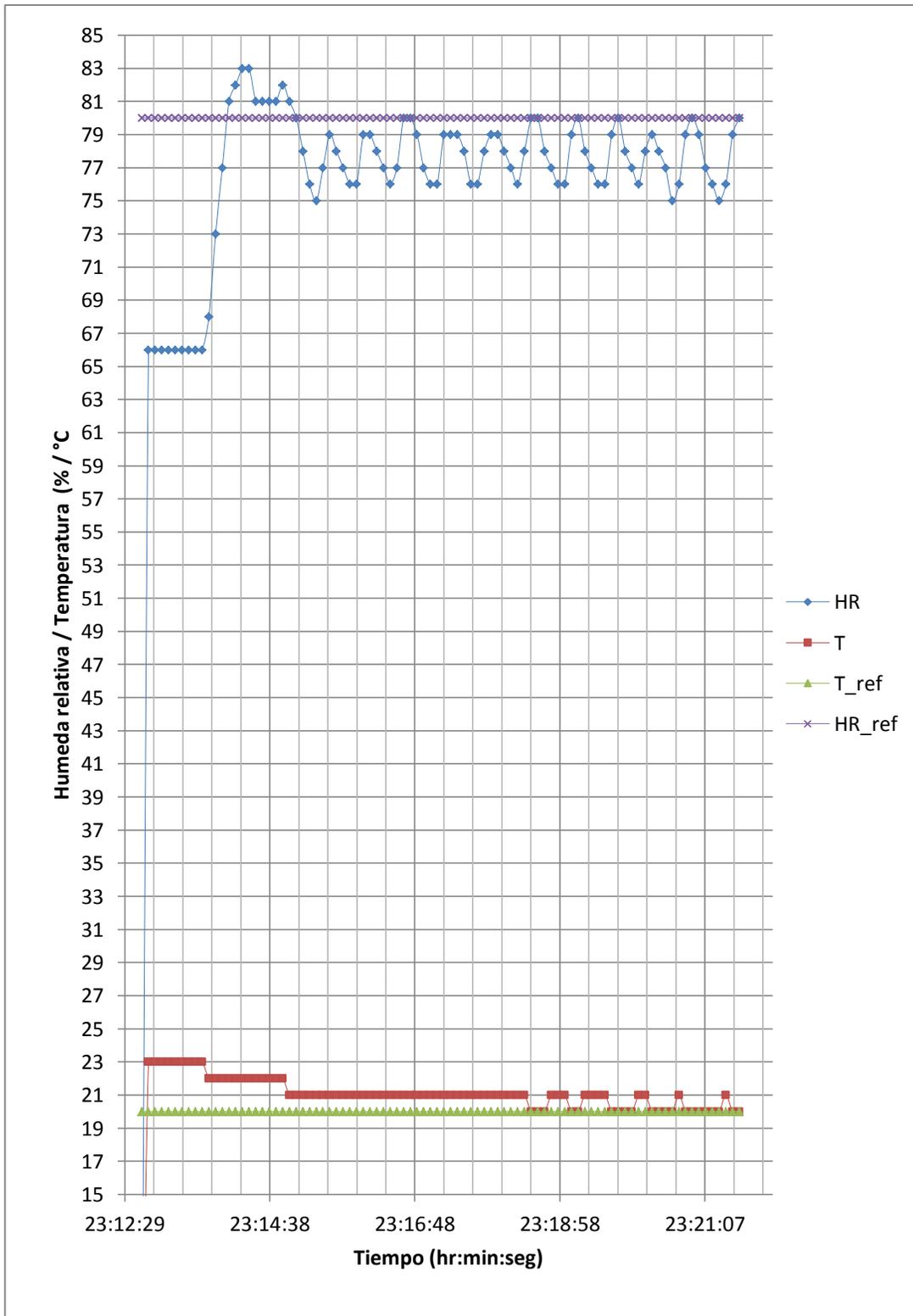


Figura 4.8. Respuesta de la temperatura y humedad relativa del sistema de control en modo automático. Replicación de la zona de vida Bosque muy Húmedo premontano. (Anexo 16)

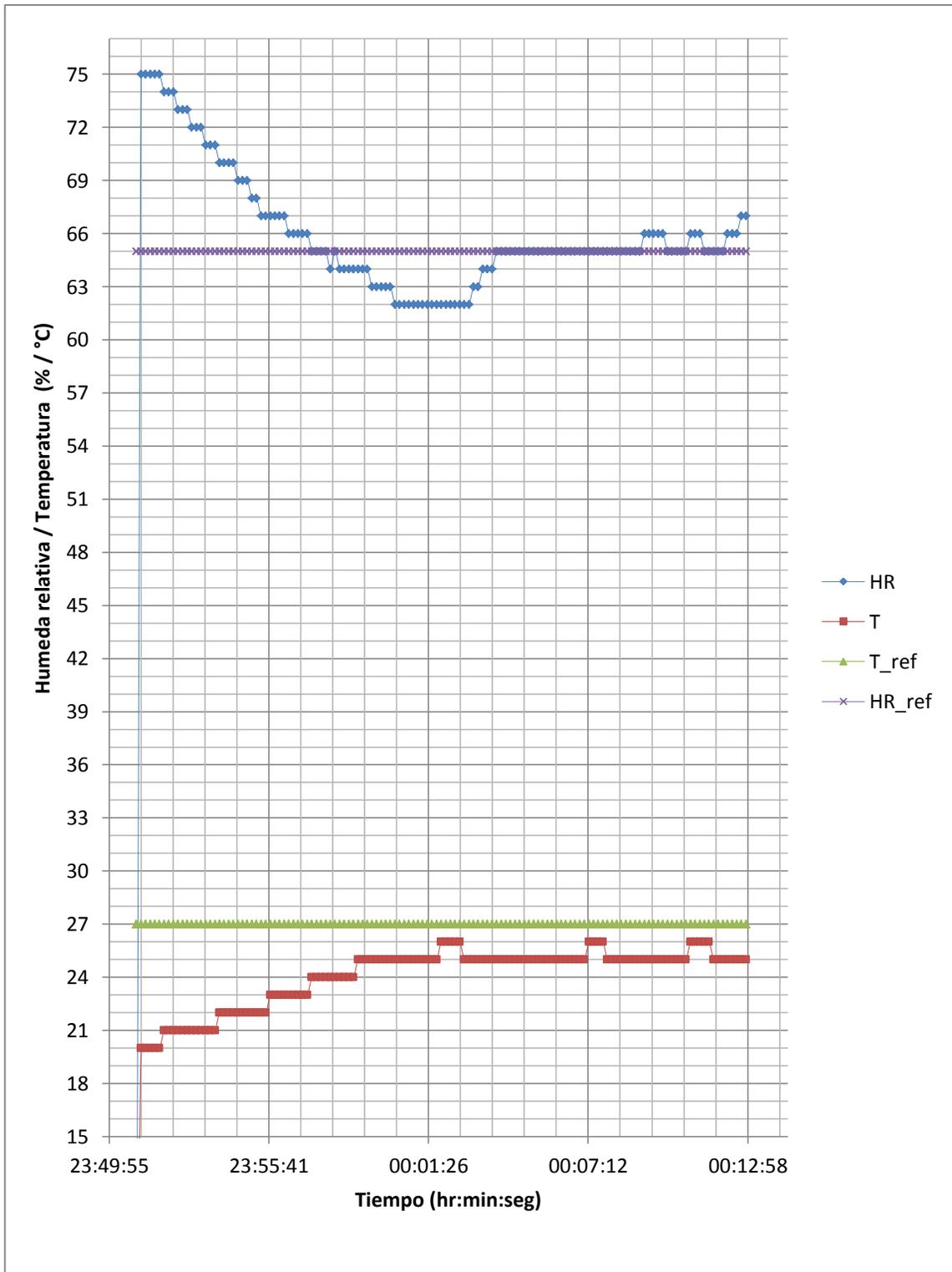


Figura 4.9. Respuesta de la temperatura y humedad relativa del sistema de control en modo automático. Replicación de la zona de vida Bosque Húmedo Tropical Base. (Anexo 17)

4.3. RESULTADOS

	Rango_T (°C)	T_replicada (°C)	SD_T (°C)	Rango_HR (%)	HR_replicada (%)	SD_HR (%)
BH_PM	17 – 24	23	+3	50 – 75	67	+3
BMH_PM	17 – 24	20	+1	75 – 85	80	-5
BH_TB	24 – 30	26	-2	50 – 75	65	+2

(*) SD_T: Desviación estándar a partir del valor de referencia de temperatura, SD_HR: Desviación estándar a partir del valor de referencia de la humedad relativa.

- Se logró implementar un sistema de control de lógica difusa para la temperatura y humedad relativa del invernadero. Los sistemas de regulación se activaron de acuerdo a las reglas establecidas en el algoritmo de control para replicar cada zona de vida.
- El sistema de control replica los tres microclimas programados en el modo automático para temperaturas exteriores desde 15 a 26 °C y humedad relativa de 50 a 90 %. Se replicaron los microclimas deseados con una desviación máxima de ± 3 °C de temperatura y ± 5 % de humedad relativa.
- Se logró establecer la comunicación entre el sistema de control y la interfaz de usuario para el control y monitoreo del invernadero.

4.4. COSTOS

Los costos para la realización del proyecto se detallan a continuación.

Recursos Humanos			
Actividad	Costo H.H. (S/.)	Cantidad H.H.	Total (S/.)
Programación en Arduino	50.00	200	10000.00
Programación en Processing	50.00	150	7500.00
Diseño e Ingeniería	50.00	250	12500.00
Instalación	50.00	80	4000.00
Tarjetas electrónicas	50.00	9	450.00
Sub total			34 450.00

Materiales			
Descripción	Cantidad	Precio Unit (S/.)	Total (S/.)
Arduino Uno	1	70.00	70.00
Sensor DHT22	1	25.00	25.00
Sensor LDR	1	3.00	3.00
Led blanco ultrabrillante	20	0.30	6.00
Optocoplador 4N35	8	1.00	8.00
Socket optocoplador	8	0.20	1.60
Mosfet IRF 730	2	1.80	3.60
Potenciómetro CA9V/10K	1	0.70	0.70
Relay Q22FF-12V	3	1.50	4.50
Transistor 2N3904	5	0.20	1.00
Transistor BC548	1	0.20	0.20
Diodo 1N4004	5	0.10	0.50
Borneras 3 pines	5	0.50	2.50
Borneras 2 pines	15	0.50	7.50
Cable Unipolar	50	0.30	15.00
Resistencias 1/4W	30	0.10	3.00
Resistencia calefactora 220 V AC	1	10.00	10.00
Ventilador EFB0912HHE	2	10.00	20.00
Mist Maker DK-24	1	150.00	150.00
Extractor BFB1012H	1	15.00	15.00
Ventilador Boxer YM 120PT	1	10	10.00
Fuente de Computadora	1	35.00	35.00
Computadora para interfaz de Usuario	1	1,000.00	1000.00
Sub total			1 392.10
Total (S/.)			35 842.10

Para calcular el gasto en recursos humanos se consideró el costo de H.H de un ingeniero recién egresado de 50 soles, dando un total de 34,450.00 nuevos soles. El costo total aproximado para la implementación del proyecto, que incluye recursos humanos y materiales a usar fue de 35,842.10 nuevos soles.

CONCLUSIONES

De lo presentado anteriormente, se concluye:

1. Se diseñó un sistema de control microclimático (de temperatura, humedad e iluminación) para la preservación de orquídeas endémicas del Perú en un invernadero de Lima y se logró replicar las tres zonas de vida propuestas (BH-PM, BMH-PM y BH-TB).
2. Se implementó un sistema de control microclimático basado en lógica difusa que comprende 10 reglas.
3. Se seleccionó los sensores de temperatura, humedad e iluminación, así como los actuadores que mantienen los parámetros de control dentro de los rangos establecidos para cada zona de vida.
4. El entorno gráfico de la interfaz de usuario implementado en permite monitorear y controlar de manera simple el invernadero mediante una computadora.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar pruebas de funcionamiento en condiciones de temperaturas muy cálidas para establecer la capacidad de enfriamiento de los ventiladores, análogamente se debe realizar las pruebas en condiciones de temperaturas frías para registrar el comportamiento del sistema de calefacción. Esto ayudará a mejorar la selección de los actuadores en futuras aplicaciones.
2. Se recomienda calibrar y controlar los sensores que se utilizarán para evitar errores de medición durante las pruebas de funcionamiento.
3. Se recomienda realizar pruebas de funcionamiento continuo del sistema para detectar fallas en la comunicación o sincronización entre el hardware y software. De esta manera se pueden establecer tiempos de funcionamiento continuo máximos que influye en la autonomía del sistema.
4. Se recomienda seleccionar una sola zona de vida cada vez que se inicie la interfaz de usuario, si se desea cambiar de zona mientras el sistema está funcionando se debe reiniciar la interfaz para evitar posibles fallas en los actuadores.
5. Se debe realizar un estudio más profundo en el control de iluminación del invernadero ya que es un factor muy importante para el desarrollo de las orquídeas.
6. Se recomienda la aplicación de otros de mecanismos de enfriamiento para aumentar la eficiencia del sistema de regulación de temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Xu, F, Chen, J, Zhang, L, & Zhan H. (2006). Self-tuning Fuzzy Logic control of Greenhouse temperature using real-coded genetic algorithm. *Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARCV '06. 9th International Conference (págs 1-6). Singapore. IEEE.*
- [2] Rodriguez, E., Kubota, C., Giacomelli, G., Tignor, M., Wilson, S., & McMahon, M. (2010). Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. *Computers and Electronics in Agriculture* , 105-116.
- [3] Cruz-Valeriano, E., Begovich, O., & Ruiz-Leon, J. (2013). Modeling of a Greenhouse using Particle Swarm Optimization. *Computing Science and Automatic Control (CCE)*, (págs. 268-273). México, D. F.
- [4] Bement, S. T., Nassar, A. R., & Mehta, K. (2013). The feasibility of rice bags as a low-cost and locally available alternative to greenhouse glazing. *Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)* (págs. 254-259). San Jose, CA: IEEE.
- [5] ADEX. (10 de Noviembre de 2013). Exportadores de flores del Perú replicarán buenas prácticas de floricultores holandeses”. *ANDINA*.
- [6] Sociedad de Comercio Exterior del Perú. (2007). Oportunidades para un comercio floreciente. *Semanario de COMEXPERÚ* (434), 7.
- [7] Freuler, M. J. (2010). *Orquídeas del Perú* (1ra ed.). Buenos Aires: Albatros.
- [8] Cavero, M., Collantes, B., & Patroni, C. (s/d). *Orquídeas del Perú*. Lima: Centro de datos para conservación del Perú.
- [9] Xiao, H., & Lin Feng, Y. Z. (2013). Tuning the PID parameters for greenhouse control based on CFD simulation. *Agro-Geoinformatics* (págs. 485-489). Fairfax, VA : IEEE.
- [10] Huang, S. N., Tan, K., & Lee, T. H. (2001). A combined PID/adaptive controller for a class of nonlinear systems. *Automatica* , 37, 611-618.
- [11] Instituto Boliviano de Comercio Exterior. (2011). *Perfil de Mercado de Flores*. IBCE.
- [12] Gómez de los Santos, L. S. (2007). *Proyecto de inversión para la producción en invernadero y comercialización de orquídeas Phalaenopsis sp. para flor de corte y maceta, en el distrito federal*. Instituto Politécnico Nacional, México, D. F.

- [13] Baltussen, W., & Smit, P. (2013). *Greenhouse technology suppliers conquer the world*. AVAG Plus. Holanda: MediaCenter BV.
- [14] Lopez, L. (2008). *Diseño de un sistema de control de temperatura on/off para aplicaciones en invernadero utilizando energía solar y gas natural*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- [15] Menchaca, R., & Moreno, D. (2011). *Manual para la propagación de orquídeas*. Comisión Nacional Forestal, Jalisco. México
- [16] Versteeg, H., & Malalasekra, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* (2da ed.). Glasgow: Pearson Education.
- [17] Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson Education.
- [18] Feng, L., Li, H., & Zhi, Y. (2013). Greenhouse CFD simulation for searching the sensors optimal placements. *Agro-Geoinformatics* (págs. 504-507). Fairfax, VA: IEEE.
- [19] Sigrimis, N., Antsaklis, P., & Groumpos, P. (2001). Advances in control of agriculture and the environment. *Control Systems, IEEE* , 21, 8-12.
- [20] Quan, V. M., Sen Gupta, G., & Mukhopadhyay, S. (2011). Review of sensors for greenhouse climate monitoring. *Sensors Applications Symposium (SAS)* (págs. 112 - 118). San Antonio, TX : IEEE.
- [21] Ministerio del Ambiente. (2015). *Guía de Identificación de Orquídeas con mayor Demanda Comercial*. Lima - Perú: Image Print Perú.
- [22] Blanca León, Nigel Pitman, José Roquen. (2006). *Introducción a las plantas endémicas del Perú*. El libro rojo de las plantas endémicas del Perú (págs. 946 -965).
- [23] José Roque & Blanca León. (2006). *Orchidaceae endémicas del Perú*. El libro rojo de las plantas endémicas del Perú. (págs. 759-878)
- [24] Carlos Zamora. (2009). *Diagrama Bioclimático de zonas de vida del sistema Holdridge*. 2015, de Minam Sitio web: sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/39027
- [25] Reyna, C. (2015) *Sistema automatizado para el monitoreo y control de humedad en un invernadero*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima

- [26] Li, S, Li, M, & Wang, X. (2015). Design of Greenhouse Environment Controller Based on Fuzzy Adaptive algorithm. *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)* (págs 2644 - 2647). IEEE.
- [27] Outanoute, M, Lachhab, A, Ed-dahhak, A, Selmani, A, Guerbaoui, M, & Bouchikhi, B. A *Neural network dynamic model for temperature and relative humidity control under greenhouse*. (págs. 6-11). *RFID And Adaptive Wireless Sensor Networks (RAWSN), 2015 Third International Workshop*. Agadir. IEEE.
- [28] Comisión Nacional de Diversidad Biológica. *Perú: país megadiverso*. Lima, Perú. Web: <http://www.conam.gob.pe/CHM/CHM.htm>
- [29] Laribi, I, Homri, & Mhiri, R. (2006). Modeling of a greenhouse temperature: comparison between multimodel and neural approaches. *ISIE*. Montreal. IEEE.
- [30] ElectroIndustria (2010). *Plataformas de Desarrollo basadas en Microcontroladores: Acelerando la creación de soluciones electrónicas*. Chile. Web: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1539>
- [31] Lu, A, & Hong, Q. (2010). A greenhouse SCADA system based on CAN/1-wire hierarchical network. *2nd International Conference on Computer Technology and Development (ICCTD)*. Cairo. IEEE.
- [32] Fang, J, & Wang, F. (2011). Design of Greenhouse remote monitoring system based on LabVIEW. *Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2011 IEEE International Conference*. Shanghai. IEEE.

ANEXOS

1. Diagrama bioclimático de zonas de vida del sistema Holdridge.
2. Hoja de datos del sensor de temperatura y humedad DHT22
3. Hoja de datos de ventiladores de enfriamiento Delta Electronics serie EFB
4. Hoja de datos de humidificador DK-24 Mist Maker
5. Hoja de datos de motor extractor Delta Electronics BFB1012H
6. Hoja de datos del led ultrabrillante C503C.
7. Plano del invernadero.
8. Código del programa del sistema de control.
9. Código del programa de la interfaz de usuario.
10. Diagramas esquemáticos de los circuitos de potencia.
11. Archivo generado para deshumidificación manual
12. Archivo generado para humidificación manual
13. Archivo generado para calefacción manual
14. Archivo generado para enfriamiento manual
15. Archivo generado para modo automático de zona de vida BH_PM
16. Archivo generado para modo automático de zona de vida BMH_PM
17. Archivo generado para modo automático de zona de vida BH_TB
18. Especificaciones técnicas de policarbonato Alveolar Polygal.