

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL MONITOREO Y CONTROL
DE HUMEDAD EN UN INVERNADERO**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Claudia Evelia Reyna Huamán

ASESOR: Julio César Tafur Sotelo

Lima, julio del 2015

RESUMEN

El cultivo bajo invernadero permite crear un microclima dentro de un espacio cerrado y proteger los cultivos de fenómenos climáticos derivados del ambiente externo. Tradicionalmente, estos invernaderos son operados manualmente por el agricultor en base a su experiencia. Sin embargo, existen sistemas automatizados que facilitan el monitoreo y control de las condiciones climáticas de acuerdo a las necesidades del cultivo.

En este trabajo se propone el diseño de un sistema automatizado para el monitoreo y control de humedad de un invernadero que se construirá en el distrito de Abelardo Pardo Lezameta, ubicado en el departamento de Áncash. Para tal fin se planteó una estrategia de control que permita establecer un valor adecuado de humedad dentro del invernadero mediante un algoritmo de control on/off que ejecute una de las dos etapas de humidificación y deshumidificación, de acuerdo a la medición del sensor de humedad.

Se usó el sensor de humedad DHT22 que provee al sistema diseñado de un rango de operación de 0-100% y una resolución de +/-2%. Además, se seleccionaron actuadores que permitan nebulizar y ventilar el invernadero para variar la humedad, se usó una electroválvula que permita el pase del agua hacia los nebulizadores, así mismo se usaron tres motores para la apertura y cierre de las ventanas del invernadero. Por otro lado, se desarrolló una interfaz de usuario, la cual sirva para monitorear los cambios de la variable controlada en una computadora, así como también operar los actuadores remotamente.

Se realizaron pruebas y simulaciones del sistema diseñado, las cuales demostraron que el sensor de humedad elegido puede usarse para este tipo de aplicaciones, obteniendo mediciones de humedad de una manera rápida y sencilla. Por otro lado, se logró establecer la comunicación serial entre el sistema de control y la computadora a través de la interfaz de usuario implementada. La interfaz de usuario desarrollada ayuda a facilitar el control y monitoreo del parámetro climático dentro del invernadero. Todo esto permitirá dar autonomía al invernadero.

A mis queridos padres por todo el amor que me dan cada día y que me motiva a seguir siempre adelante. Por sus sabios consejos y por su confianza en mí.

A mis hermanas por apoyarme siempre y ser parte de mi felicidad.

A mis amigos de toda la vida, de la universidad y a los que he tenido la dicha de conocer en un momento de mi vida, por su amistad, por la confianza que tienen en mí y por las alegrías que hemos compartido.

Al más especial de todos, a Dios que siempre ha estado presente durante toda mi vida, quien ha guiado mis pasos y que sin él no hubiera podido llegar a ningún lugar.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. PANORAMA GENERAL DEL MANEJO DE CULTIVOS EN INVERNADEROS	2
1.1. ASPECTOS FÍSICOS DE UN INVERNADERO	2
1.2. TIPOS DE INVERNADEROS	3
1.3. IMPORTANCIA DEL CULTIVO BAJO INVERNADEROS	6
1.4. PROBLEMÁTICA QUE AFRONTAN LOS INVERNADEROS SIN SISTEMAS DE CONTROL	7
1.5. SITUACIÓN ACTUAL DEL CULTIVO EN INVERNADERO EN EL PERÚ	7
1.6. DECLARACIÓN DEL MARCO PROBLEMÁTICO	8
CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS APLICADAS A SISTEMAS DE CONTROL DE HUMEDAD EN INVERNADEROS.....	10
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	10
2.1.1. Característica de la variable a controlar	10
2.1.2. Algoritmos de control	11
2.1.3. Tipos de controladores.....	13
2.1.4. Sensores de humedad	15
2.1.5. Actuadores para variar la humedad	18
2.1.6. Supervisión y monitoreo	20
2.2. MODELO TEÓRICO DEL SISTEMA DE CONTROL DE HUMEDAD	21
CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL DE HUMEDAD	23
3.1. OBJETIVOS.....	23
3.1.1. Objetivo general	23
3.1.2. Objetivos específicos	23
3.2. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO	23
3.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO	26
3.4. ESTRATEGIA DE CONTROL	27
3.5. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL	30
3.5.1. Sensor de humedad	30
3.5.2. Actuadores.....	34
3.5.3. Microcontrolador	40
3.5.4. Etapa de potencia.....	41
3.6. COMUNICACIÓN SERIAL.....	46
3.7. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA PRINCIPAL PARA EL MICROCONTROLADOR	47
3.8. INTERFAZ DE USUARIO	49
CAPÍTULO 4. PRUEBAS, SIMULACIÓN, RESULTADOS Y PRESUPUESTO.....	52
4.1. PRUEBAS	52
4.1.1. Pruebas realizadas con el sensor de humedad	52
4.1.2. Pruebas realizadas con el interfaz de usuario	55
4.2. SIMULACIÓN DEL INTERFAZ DE USUARIO EN MODO MANUAL Y AUTOMÁTICO	57
4.3. RESULTADOS	59
4.4. PRESUPUESTO	60
CONCLUSIONES.....	62
RECOMENDACIONES.....	63
BIBLIOGRAFIA	64
ANEXOS	68

INTRODUCCIÓN

La presente tesis describe el diseño de un sistema automatizado para el control y monitoreo de humedad en un invernadero, con la finalidad de establecer un clima adecuado para el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

En el primer capítulo se presenta un panorama general del cultivo bajo invernadero, su importancia y la situación actual del manejo de invernaderos. Por otro lado, se hace énfasis en la problemática que presentan los invernaderos sin un sistema de control de las variables climáticas.

En el segundo capítulo se muestra las tecnologías que aplican los sistemas de control que existen para el control del clima dentro del invernadero. Se describe los tipos de control que se utiliza, así como también los elementos de medición y actuación.

En el tercer capítulo presenta el diseño del sistema, el cual usa un algoritmo de control on/off implementado en un microcontrolador. Para medir la humedad presente dentro del invernadero se eligió un sensor de humedad adecuado para registrar dicha variable climática. Por otro lado, se seleccionó mecanismos de actuación para aumentar y disminuir la humedad dentro del invernadero. Además, se desarrolló una interfaz de usuario, el cual nos servirá para observar los cambios de humedad en una computadora, así como también controlar el encendido y apagado de los actuadores remotamente.

En el cuarto capítulo se muestra la implementación de algunos de los circuitos diseñados para poder realizar pruebas que verifiquen el algoritmo de control, y sobre todo la comunicación serial entre el microcontrolador y la computadora. Además, se muestran los resultados obtenidos en las pruebas y el presupuesto para la implementación del sistema.

CAPÍTULO 1. PANORAMA GENERAL DEL MANEJO DE CULTIVOS EN INVERNADEROS

1.1. Aspectos físicos de un invernadero

Los procesos que contribuyen al crecimiento y la producción de las plantas son la fotosíntesis, la respiración y la transpiración. Estos procesos son condicionados a corto y largo plazo por factores como la radiación local, la concentración de CO_2 , la temperatura y la presión de vapor de agua del ambiente y a su vez en nuestro caso estas condiciones son afectadas por la existencia de la cubierta o el cerramiento del invernadero y por el propio cultivo [1].

La cubierta del invernadero produce una atmósfera cerrada, reduciendo el intercambio de aire entre el ambiente del cultivo y el ambiente exterior y una reducción muy marcada de la velocidad del aire en el interior. La energía captada y el vapor de agua transpirado son a su vez alterados por el cerramiento, limitando el intercambio de forma que son acumulados ambos en el ambiente interior. [1].

El calentamiento del invernadero se produce cuando el infrarrojo largo, procedente de la radiación que pasa a través del material de cubierta, se transforma en calor. Esta radiación es absorbida por las plantas, los materiales de la estructura y el suelo. Como consecuencia de esta absorción, éstos emiten radiación de longitud más larga que tras pasar por el obstáculo que representa la cubierta, se emite radiación hacia el exterior y hacia el interior, calentando el invernadero [2].

Como ya se mencionó, la radiación y la concentración de CO_2 influyen en el proceso de fotosíntesis. Más concentración de CO_2 , proporciona más fotosíntesis; sin embargo, concentraciones superiores pueden resultar tóxicas para los cultivos. Por otro lado, la tasa de absorción de CO_2 es proporcional a la cantidad de luz recibida. A mayor luminosidad en el interior del invernadero se debe aumentar la temperatura, la humedad y el CO_2 , para que la fotosíntesis sea máxima. Para mejorar la luminosidad natural se usan materiales de cubierta con buena transparencia, y que permitan recibir la mayor radiación solar posible. Los invernaderos se construyen mayormente en dirección norte- sur, como se muestra en la Figura 1.1, ya que de esta manera se tiene una mejor distribución de la luz en las

plantas [3].

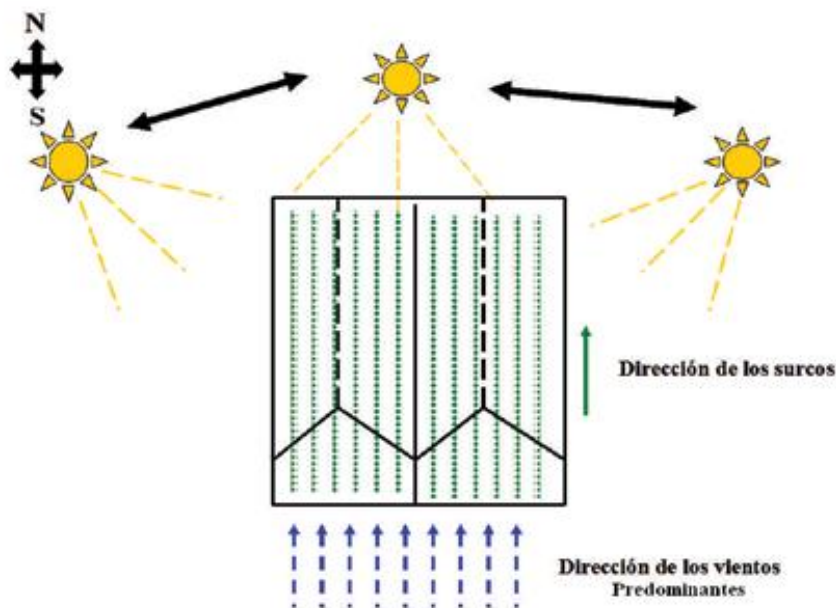


Figura 1.1 Orientación de un invernadero

Por último, la temperatura va a estar en función de la radiación solar, que va a calentar el invernadero. Para el manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada. Además, existe una relación inversa con la humedad; si aumenta la temperatura, disminuye la humedad relativa, y viceversa. La humedad es una variable importante para el desarrollo del cultivo, ya que si la humedad es muy baja, las plantas podrían deshidratarse; por el contrario, si es alta, favorece la proliferación de plagas y enfermedades.

1.2. Tipos de invernaderos

Según su conformación estructural, existen diferentes tipos de invernaderos:

- **Invernadero plano o tipo parral**

Este tipo de invernadero se utiliza en zonas poco lluviosas. Su estructura se encuentra constituida por dos partes claramente diferenciadas, una estructura vertical y otra horizontal (Ver Figura 1.2). La estructura vertical está constituida por

soportes rígidos que se pueden diferenciar según sean perimetrales (soportes de cerco situados en las bandas y los esquineros) o interiores (pies derechos). La estructura horizontal está constituida por mallas de alambre galvanizado superpuestas que sirven para portar y sujetar la lámina de plástico [4].

El invernadero tipo plano o parral es conocido por su mala ventilación, y por la difícil instalación de ventanas cenitales.



Figura 1.2 Invernadero tipo plano

- **Invernadero de raspa y amagado**

Los invernaderos de raspa y amagado surgen a partir de los invernaderos planos o tipo parral ante la necesidad de poder evacuar el agua de lluvia, ya que en los planos con las precipitaciones se forman grandes bolsas de agua, que perjudican seriamente la estructura. Tienen más altura por lo que el volumen de aire es mayor y el invernadero térmicamente funciona mejor. La parte alta de la cubierta es la “*raspa*” que puede oscilar entre 3 y 4,2 m y la baja el “*amagado*” entre 2 y 2,8 m [5]. En la siguiente figura se muestra un invernadero tipo raspa y amagado.



Figura 1.3 Invernadero tipo raspa y amagado

- **Invernadero de capilla**

Este es el típico invernadero de cubierta plana a una o dos aguas que se utiliza sobre todo con vidrio y con cualquier tipo de plástico incluido los rígidos (Ver Figura 1.4). Evacuan muy bien la lluvia y pueden anexarse varias naves dando lugar a invernaderos de doble capilla, triple, etc. y de diente de sierra.

Una gran ventaja de este tipo de invernaderos es la posibilidad de colocación de ventanas verticales y cenitales que facilitan mucho la ventilación [5].



Figura 1.4 Invernadero tipo capilla

- **Invernadero túnel o semicilíndrico**

Se caracteriza por la forma de su cubierta en forma de medio cilindro alargado que puede terminar sobre pilares estructurales o directamente sobre el suelo, como se muestra en la Figura 1.5.

Los soportes son de tubos de hierro galvanizado y tienen una separación interior de 3 x 5 ó 5 x 9 m. La altura máxima de este tipo de invernaderos oscila entre 3,5 y 5 m. En las bandas laterales se adoptan alturas de 2,5 a 4 m. El ancho de estas naves está comprendido entre 6 y 9 m y permiten el adosamiento de varias naves en batería.

La ventilación es mediante ventanas cenitales que se abren hacia el exterior del invernadero y la mecanización de labores en su interior son cómodas [5].



Figura 1.5 Invernadero túnel

1.3. Importancia del cultivo bajo invernaderos

Los consumidores demandan productos agrícolas de alta calidad y diversidad durante todo el año, esto no es posible debido a los cambios climáticos que se producen en distintas épocas del año. Es por ello que el uso de invernaderos juega un papel muy importante para enfrentar este problema.

Los invernaderos permiten obtener condiciones climáticas adecuadas para el desarrollo y crecimiento de las plantas dentro de un espacio cerrado. Por lo tanto, se crea una barrera física entre los cultivos dentro del invernadero y el clima exterior, esto ayuda a proteger a las plantas de los fenómenos climáticos como la caída de granizas y heladas que dañan los cultivos, así como también de los fuertes vientos y las lluvias. Por otro lado, facilita el control de plagas y enfermedades que afectan a los cultivos y que pueden ocasionar grandes pérdidas en la producción.

En consecuencia, el cultivo en invernaderos permite al agricultor obtener cosechas durante todo el año, incluso en épocas de invierno, ayuda a reducir el tiempo de cosecha y obtener productos agrícolas de alta calidad.

1.4. Problemática que afrontan los invernaderos sin sistemas de control

La mayoría de agricultores que optan por construir invernaderos para proteger sus cultivos del clima externo y crear un microclima dentro de este espacio cerrado, no toman en cuenta la implementación de un sistema automatizado que los ayude a lograr establecer las mejores condiciones climáticas de acuerdo a la necesidades de cada tipo de cultivo.

Las variables climáticas como la temperatura, humedad, CO₂ y la radiación solar influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Un mal manejo de estos parámetros puede afectar considerablemente a la planta. Por ejemplo, un exceso de humedad en el interior del invernadero puede generar enfermedades en los cultivos.

Por otro lado, existe un mal manejo de recursos naturales como el agua. Cuando el invernadero no cuenta con un sistema que permita monitorear continuamente las variables climáticas como temperatura y humedad, no se establece un tiempo de riego adecuado, ya que no se sabe cuánta agua necesita los cultivos o con qué frecuencia se debe efectuar el riego.

Los invernaderos operados manualmente por el agricultor, ayudan a proteger los cultivos de los fenómenos climáticos y crear un microclima; sin embargo, no brinda las ventajas que se consigue con un invernadero automatizado.

1.5. Situación actual del cultivo en invernadero en el Perú

En muchos países la automatización de invernaderos se encuentra muy desarrollada. Estos invernaderos están caracterizados por aplicar diversas tecnologías de control y comunicación como buses de campo, redes inalámbricas de sensores, control inteligente, entre otros.

En el Perú, muchos departamentos utilizan invernaderos para mejorar la calidad de sus cultivos y aumentar la producción, así como también para protegerlos del clima, que en los últimos años ha ido cambiando debido al calentamiento global. Sin embargo, la mayoría de estos invernaderos son operados manualmente por los agricultores, no

poseen ningún sistema automatizado que controle los parámetros climáticos. Tampoco se cuenta con un sistema de monitoreo y recopilación de datos, los cuales llegarían a ser una fuente de datos muy importante para mejorar el manejo de cultivos en invernaderos.

Así mismo, no se cuenta con sensores que midan las variables como temperatura y humedad del invernadero, los agricultores no pueden saber con exactitud la humedad relativa del ambiente, la temperatura durante la noche, entre otros. No se darían cuenta si se produce un cambio en la humedad que podría causar problemas o enfermedades en la planta.

Por último, la variación de cualquier variable climática dentro del invernadero se realiza de forma manual, por simple experiencia, ya que no se cuenta con sistemas de calefacción, ventilación, importantes para establecer condiciones de humedad o temperatura adecuadas para la planta. Esto ocasiona un uso ineficiente de recursos como el agua y la energía eléctrica.

1.6. Declaración del marco problemático

La ciudad de Llaclla se caracteriza por tener un clima variado, ideal para cultivar todo tipo de frutas y hortalizas. Además cuenta con un gran recurso hídrico como es el río Pativilca. Sin embargo, esta riqueza natural no es aprovechada por los pobladores del lugar para la producción agrícola. La mayoría de pobladores se encuentra en una situación de pobreza y predomina la producción para autoconsumo, esto no ayuda a tener una actividad agroindustrial en la zona.

El fenómeno del calentamiento global está ocasionando cambios en el clima de Llaclla, esto afecta el ciclo vegetativo de los cultivos. La lluvia, los fuertes vientos y las heladas muchas veces dañan los cultivos y no permiten su desarrollo. También ocasionan enfermedades en las plantas como la racha o plagas endémicas como la mosca de la fruta.

Por otro lado, los agricultores hacen un mal manejo del agua debido a que no saben la cantidad de agua que necesita cada planta y la frecuencia con que se debe realizar el

riego, no se aprovecha de manera eficiente el recurso hídrico con el que se cuenta.

La municipalidad de Llaclla ha planteado construir un invernadero para cultivar plantones de palto, lúcumo, chirimoyo y pino silvestre, para su posterior plantación. Este invernadero deberá contar con un sistema automatizado que permita establecer las condiciones ambientales óptimas que necesita cada tipo de cultivo, y para así aprovechar los suelos fértiles y el clima variado de la zona.



CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS APLICADAS A SISTEMAS DE CONTROL DE HUMEDAD EN INVERNADEROS

1.1. Estado del Arte

Actualmente diversos sistemas y procesos se encuentran automatizados, es decir, se han aplicado sistemas mecánicos y electrónicos para controlar el proceso y no requerir intervención humana para su funcionamiento. La automatización se ha desarrollado rápidamente, se han creado nuevos avances tecnológicos y técnicas de control, que son aplicados en diversas áreas como la industria alimentaria, medicina, aeronáutica.

En el área de la agronomía, la automatización cumple un rol muy importante debido a que optimiza los procesos, incrementando la productividad y mejorando la calidad de los productos, esto ayuda a satisfacer las exigencias del mercado. Por otro lado, los avances dentro del control climático han permitido la mejora de sistemas como es el caso de los invernaderos.

Diferentes métodos y modelos de control son aplicados para controlar el comportamiento de las variables climáticas que afectan el clima del invernadero. Se usan desde sistemas de control usando lógica clásica hasta sistemas de control inteligente, que usan lógica difusa, redes neuronales, entre otros. Además, se han desarrollado diferentes dispositivos y mecanismos que permiten medir y variar la humedad relativa dentro del invernadero.

A continuación se expone el estado de arte con respecto a las diversas tecnologías que se utilizan en el área de automatización de invernaderos.

1.1.1. Característica de la variable a controlar

La humedad relativa es la cantidad de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura. Existe una relación inversa de la temperatura con la humedad por lo que a elevadas temperaturas, aumenta la capacidad de contener vapor de agua y por tanto disminuye la humedad relativa [2].

La humedad del aire afecta directamente el consumo de agua por las plantas, si el aire

está con muy baja humedad, el mismo puede absorber más agua y el gradiente de humedad en los estomas de la planta también se acentúa, esto produce un incremento de la transpiración y que el agua salga más rápido de las hojas aumentando la evapotranspiración [6]. Cuando la humedad del aire es excesiva las plantas no producen mucha evapotranspiración, como consecuencia no se absorbe los nutrientes del suelo necesarios para el crecimiento de la planta.

Por lo tanto, la variación de humedad que se produce dentro del invernadero no solo dependerá del cambio de temperatura del aire sino también será influenciado por las plantas que constantemente agregan agua al aire del invernadero a través de la transpiración.

Existe una diferencia entre la cantidad de agua en el interior de la hoja (asumiendo que está saturada) y la cantidad de agua del aire que rodea la hoja, que impulsa la transpiración, y la cual se le denomina Déficit de Presión de Vapor (DPV).

El DPV es una manera útil de medir el clima de un invernadero. Puede utilizarse para evaluar la amenaza de enfermedades, el potencial de condensación y las necesidades de un cultivo bajo invernadero. La prevención de condensación es importante ya que los patógenos de invernaderos con frecuencia requieren una lámina de agua en la planta para desarrollarse y afectarle. El objetivo del productor es mantener el DPV entre hoja y aire a 0.5 y 2.0 kPa [7].

En muchas situaciones en el que el cambio de temperatura es significativo, el valor del DPV será de mucha utilidad ya que combina los efectos de la temperatura y la humedad en un mismo valor, evitando así ciertos casos, como por ejemplo, en un día caluroso con humedad relativa alta la planta puede transpirar más que en un día frío con baja humedad.

1.1.2. Algoritmos de control

- **Control clásico**

Existen diferentes técnicas de control clásico que han sido aplicadas para la automatización de invernaderos; por ejemplo, control PID, control todo o nada

(on/off).

En [8] se ha desarrollado un sistema de control de temperatura on/off para un invernadero. El controlador realiza un promedio de los valores obtenidos por los sensores de temperatura en los cuatro conversores análogo/digital para luego realizar una comparación entre el valor promedio obtenido con los valores de temperatura óptima, temperatura máxima biológica y temperatura mínima biológica. De acuerdo a la comparación realizada por el controlador, éste envía una señal de control a los actuadores correspondientes; encendiendo (ON) o apagando (OFF) los actuadores que le correspondan al resultado de la comparación realizada de ahí el nombre del sistema de control a diseñar “control ON/OFF”.

- **Control inteligente**

Muchos de los sistemas de control con lógica clásica están basados en modelos matemáticos, los cuales predicen el comportamiento del sistema. Sin embargo, estos modelos son difíciles de implementar, o no se puede obtener el modelo del sistema. Debido a esto, en los últimos años se han desarrollados sistemas de control inteligente como redes neuronales y lógica difusa.

Control difuso

Como se sabe de los principios de la lógica difusa, un controlador de lógica difusa actúa como un sistema no lineal que se basa en el razonamiento humano para calcular los valores de control. Un FLC (Controlador de Lógica Difusa), que se define por un conjunto de reglas lingüísticas y conjuntos difusos, es capaz de calcular los valores apropiados para el actuador teniendo en cuenta los datos de información procedentes del sistema real [9]. Además, permite que dos variables como la temperatura y la humedad interactúen en un solo control, ya que una está en función de otra.

Control de un invernadero usando red neuronal artificial

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 problemas. 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 recurso de memoria a largo plazo en las redes neuronales; el aprendizaje, normalmente se realiza mediante la actualización de tales pesos [10].

En esta investigación [11] se desarrolló un modelo de red neuronal para controlar el clima de un invernadero de tomate ubicado en México, donde hay grandes variaciones en la temperatura y humedad relativa, generando pérdidas en la producción. Por lo tanto, una red neuronal artificial (ANN) fue implementado, ya que este funciona muy bien descubriendo patrones o relaciones en los datos y también es un poderoso estimador no-lineal. La ANN desarrollada demuestra una estimación muy precisa para ambas variables que pueden ser utilizadas para predecir las condiciones en el interior del invernadero, y por consiguiente tomar medidas antes de tiempo, evitando pérdidas económicas.

1.1.3. Tipos de controladores

Existen varios tipos de dispositivos de control que nos permiten automatizar un sistema, en este caso un invernadero:

- **Microcontrolador**

Es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de una computadora. En la memoria se almacena el programa que gobierna el funcionamiento del mismo que, una vez programado y configurado, solo sirve para realizar la tarea asignada. Debido a su reducido tamaño, suele ir incorporado en el propio dispositivo que gobierna.

- **FPGA**

Es un dispositivo semiconductor que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad se pueden configurar mediante un lenguaje de descripción de hardware. Tanto la interconexión, las funciones lógicas y la E/S son reprogramables, esto añade una enorme flexibilidad al flujo de diseño.

En [12] se desarrolló un sistema de control de acceso automatizado para

disminuir la presencia de insectos en invernaderos basado en tecnología FPGA. Se desarrollaron bloques de control adecuados para el cumplimiento de los protocolos de entrada y salida del invernadero, utilizando los periféricos de E/S, así como la capacidad de ejecutar procesos en paralelo que este dispositivo ofrece.

Esta tecnología se ha empleado con el objetivo de mejorar la cosecha de hortalizas entre 5 y 10 veces más, puesto que las técnicas reconfigurables por programación permiten hacer simulación de muchos procesos como la temperatura del ambiente, la humedad, abertura y cierre de compuertas, entre otros, y hacer reconfiguraciones en campo para adaptarse a cualquier técnica de control. Por otro lado, el diseño de recolección de datos FPGA que se desarrolló permite a productores implementar técnicas básicas de automatización para invernaderos pequeños o con poca experiencia, hasta controles complejos para muchas variables ambientales y factores internos como externos del invernadero y de comunicación, entre otros [13].

- **Controlador Lógico Programable (PLC)**

Es un dispositivo electrónico diseñado para controlar y automatizar en tiempo real procesos secuenciales. Están diseñados para ser capaces de obtener información de diferentes sensores y utilizarla para controlar con precisión y rapidez diversos sistemas eléctricos y mecánicos.

Con la ayuda del PLC se puede controlar todas las variables climáticas dentro de un invernadero de manera simultánea, utilizando la información recibida de los diversos sensores ubicados en el invernadero y la lógica de control, se activarán de manera inmediata los sistemas de actuación (ventilación, calefacción, humidificación, etc.) de acuerdo a las necesidades requeridas [4].

- **Procesador Digital de Señales (DSP)**

Es un tipo de procesador o microprocesador que posee un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Debido a esto, es una opción perfecta para realizar procesamiento y representación de señales analógicas en tiempo real.

Las señales analógicas pueden representar magnitudes físicas como la humedad

y temperatura de un invernadero, estas señales normalmente necesitan pasar por una etapa de acondicionamiento y por un conversor analógico/digital (ADC), antes de ser procesadas por un DSP.

1.1.4. Sensores de humedad

Un sensor es un dispositivo capaz de convertir una señal física (temperatura, luz, sonido, etc.) en una señal eléctrica de corriente o voltaje que puede ser manipulada (medida, amplificada, transmitida, etc.). Una magnitud eléctrica obtenida puede ser una resistencia eléctrica (como en una RTD), una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como un fototransistor), etc [14].

Características de un sensor:

- **Rango de medida:** Conjunto de valores entre el máximo y mínimo que pueden ser medidos por el sensor.
- **Resolución:** Indica que variación de la señal de entrada produce una variación detectable en la señal de salida.
- **Sensibilidad:** Indica la mayor o menor variación de la señal de salida por unidad de la magnitud de entrada. Cuanto mayor sea la variación, el sensor será más sensible.
- **Precisión:** Define la variación máxima entre la salida real obtenida y la salida teórica dada como patrón para el sensor.
- **Repetibilidad:** Indica la máxima variación entre valores de salida obtenidos al medir varias veces la misma entrada con el mismo sensor y en idénticas condiciones ambientales.
- **Linealidad:** Un transductor es lineal si existe una constante de proporcionalidad única que relaciona los incrementos de la señal de salida con los respectivos incrementos de la señal de entrada en todo el rango de medida.
- **Velocidad de respuesta:** Mide la capacidad del sensor para que la señal de salida siga sin retraso las variaciones de la señal de entrada.

La medición de la humedad es un proceso verdaderamente analítico en el cual el sensor debe estar en contacto con el ambiente de proceso. Esta es una gran diferencia con los sensores de presión y de temperatura, que invariablemente se encuentran aislados del proceso (por protecciones conductoras del calor o diafragmas respectivamente) [14].

Tipos de sensores de humedad

- **Sensores de Psicometría por bulbos húmedo y seco:**

Un psicométrico industrial típico consiste en un par de termómetros eléctricos acoplados, uno de los cuales opera en estado húmedo. Cuando el dispositivo funciona la evaporación del agua enfría el termómetro humedecido, resultando una diferencia cuantificable con la temperatura ambiente o la temperatura del bulbo seco. Cuando el bulbo húmedo alcanza su máxima caída de temperatura la humedad puede determinarse comparando la temperatura de los dos termómetros en una tabla psicométrica [14].

- **Sensores por desplazamiento:**

Es un sensor el cual aprovecha la expansión o contracción de ciertos materiales debido a los cambios en el nivel de humedad relativa. Los materiales más comunes son las fibras sintéticas, las cuales al aumentar la humedad se alargan. Esta deformación debe ser graduada de acuerdo a la proporcionalidad con la humedad relativa.

- **Sensores electrolíticos:**

Este sensor aprovecha la particularidad del agua para descomponerse en electrolisis, lo cual produce corriente eléctrica. Se colocan dos filamentos cargados y entremedios una película higroscópica que absorbe el agua en el aire [15].

- **Sensores capacitivos:**

Estos sensores funcionan bajo el principio de que la capacitancia de un condensador puede variar según la constante dieléctrica del mismo, y se usa como dieléctrico la mezcla gaseosa entre las placas del condensador. Esta variación de la capacitancia resulta una impedancia que varía con la humedad. En la siguiente figura se muestra sensor de humedad, el HS1101, basado en una

única celda capacitiva.



Figura 2.1 Sensor de humedad

- **Sensores infrarrojos:**

Se aprovecha de la capacidad el agua de absorber radiaciones de 1400 y 1900 μm , que están en el espectro infrarrojo, así se puede hacer una comparación entre un rayo infrarrojo que llega a una fotorresistencia sin nada en el camino y otra que pasa a través del aire que contiene el vapor de agua. Los sensores que utilizan este método son muy sensibles y logran precisiones desde 0,05 a 30.000 PPM, en rangos de temperatura que comprenden de -85°C a 40°C [15].

- **Sensores por conductividad:**

En este sensor se colocan dos hilos conductores no unidos el uno con el otro, alimentados con un voltaje continuo, al haber presencia de vapor de agua entre estos se produce una circulación de corriente proporcional a la humedad del aire.

- **Sensores piezoeléctricos:**

Estos sensores utilizan cristales, los cuales tienen una frecuencia de oscilación muy constante y al cambiar la masa de este por deposiciones cambia su frecuencia de oscilación.

Con este sistema se pueden detectar hasta variaciones de $\pm 0.1\text{Hz}$, lo cual equivale a humedades de alrededor de 0.1 PPM [15].

2.1.5. Actuadores para variar la humedad

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica y gaseosa. El actuador recibe la orden de un regulador o controlador y da una salida necesaria para activar a un elemento final de control como lo son las válvulas. Los actuadores son los elementos que nos permiten controlar directa o indirectamente las variables del proceso [14].

Sistemas de actuación para disminuir la humedad

- **Ventilación:** Cambia el aire interior con más vapor de agua con aire exterior, causando una disminución de la humedad interna del invernadero (Ver Figura 2.2). Existen dos tipos de ventilación:
 - Natural: Para este tipo de ventilación se deberá tener en cuenta la altura y el ancho del invernadero, velocidad y dirección del viento. La ubicación de las ventanas pueden ser laterales y cenitales (ubicadas en la parte más alta del techo del invernadero). Estas últimas resulta una buena opción ya que el aire caliente se concentra en la parte superior del invernadero.
 - Forzada: Se emplea extractores, los cuales cumplen con la función de succionar el aire húmedo. Se colocan en la parte alta del invernadero para que expulsen el aire más caliente y permitan entrar aire fresco.

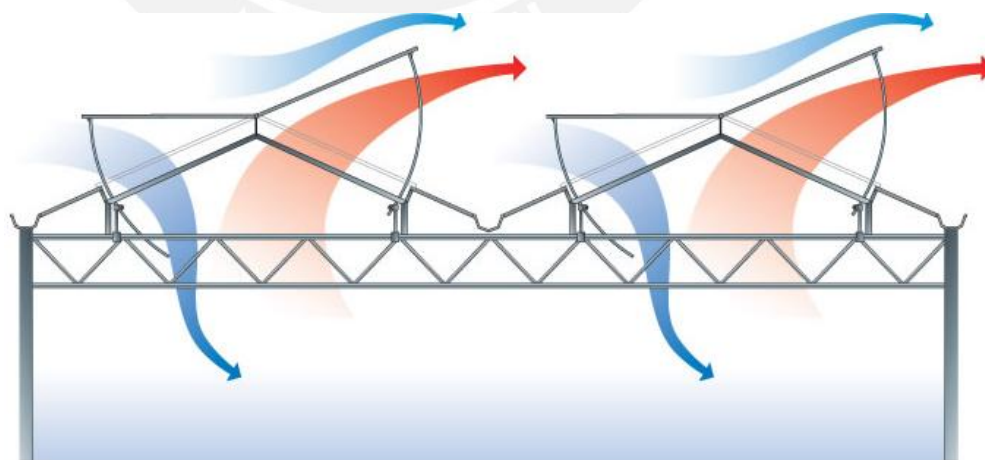


Figura 2.2 Intercambio de aire a través de ventanas cenitales

- **Calefacción:** Reduce la humedad y aumenta la temperatura, ya que calienta el

aire y lo remueve con ayuda de ventiladores.

- **Pantallas térmicas:** La pantalla térmica es una tela compuesta por combinaciones de plástico (polietileno de alta densidad en general) y láminas de aluminio entretejidas con filamentos muy porosos y absorbentes de agua [16]. Su función es absorber el exceso de humedad existente en el invernadero, que se concentra en la parte superior de la pantalla, eliminando el efecto de goteo.

Sistemas de actuación para aumentar la humedad

- **Humidificador:** Es un aparato sencillo que cumple la función de aumentar el porcentaje de humedad de una habitación (Ver Figura 2.3). Este aparato consta de un recipiente que se llena de agua y que a través de un sistema muy simple libera vapor, lo que permite humedecer los ambientes [14].

En un invernadero de pimientos situado en España [17], el agua utilizada por el humidificador antes de llegar a este, pasa por un equipo termo acumulador eléctrico ubicado en la nave almacén que calentara o no el agua. Si se desea humidificar después del funcionamiento de los equipos generadores murales se utilizará agua caliente para evitar que la temperatura conseguida varíe, por lo contrario, si se desea humidificar cuando exista un aumento de la temperatura ambiental, con la ayuda de una electroválvula, el agua utilizada será la fría.



Figura 2.3 Humidificador usado en un invernadero

- **Pared Húmeda:** Se basa en una pared formada por fibras de cera que se

encargan de distribuir agua por las celdas en esta pared. En el lado contrario de este dispositivo se ubica un extractor de aire, el cual succionara el agua en forma de rocío, la cual se distribuirá dentro del invernadero [4].

- **Microaspersor:** Es un dispositivo mecánico que transforma un flujo líquido presurizado y lo convierte en rocío. Estas partículas de agua se evaporizan, aumentando la humedad del ambiente y disminuyendo la temperatura.
- **Hidrofán:** Es un sistema formado por boquillas colocadas en ventiladores de forma circular, por el cual sale el agua presurizada. Estos ventiladores se encargan de producir turbulencia removiendo el aire y una buena dispersión de la humedad por todo el invernadero [16].
- **Ventiladores:** El uso de ventiladores mejora el movimiento del aire. Con ello se consigue aumentar la evapotranspiración y la humedad de los invernaderos cerrados.

1.1.6. Supervisión y monitoreo

Para monitorear y supervisar las variables climáticas dentro de un invernadero existen diferentes programas que brindan una interfaz al usuario:

- **SCADA**
El programa SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) 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 [18].

En la Figura 2.4 se muestra un esquema de cómo se aplica el sistema SCADA en un invernadero.



Figura 2.4 Sistema SCADA en un invernadero

- **LABVIEW**

En esta plataforma se puede programar y crear una interfaz de usuario para poder controlar 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.

Se pueden usar otro tipo de programas más simples para analizar los datos obtenidos del invernadero. En el sistema de control [19] se utiliza MYSQL, este servidor dibuja una curva para mostrar cómo es el cambio de temperatura y humedad. Cuando la curva cambia de manera anormal, el sistema de alarma se activa para informar al trabajador a través de correo electrónico, mensaje de texto, o el host del sistema activa un actuador para que controle el sistema. Otro programa es MS Excel, este permite visualizar la evolución en el tiempo del invernadero y evaluar su comportamiento, con los datos obtenidos de los sensores.

1.2. Modelo Teórico del sistema de control de humedad

Para diseñar un sistema de control y monitoreo de humedad se debe tener en cuenta desde el tipo de invernadero, el tamaño, la zona donde se ubica, el tipo de cultivo que se siembra, hasta los mecanismos de control que permitirán variar este factor climático.

El sistema de control de un invernadero está formado básicamente por un controlador, sensores y actuadores. En el controlador se tiene implementado un algoritmo de control, el cual se encarga de generar las señales de control para el manejo de los actuadores.

Los sensores miden la variable climática a controlar, esta señal obtenida pasa por una etapa de acondicionamiento de señal, y luego es digitalizada con el convertidor A/D, para ser transmitida al controlador. De acuerdo a los valores medidos por el sensor y usando el algoritmo de control, el controlador generará las señales de control para los actuadores.

Para mostrar los datos medidos por los sensores ubicados en el invernadero se usa un interfaz de usuario instalado en una computadora, el cual también servirá para configurar el sistema de control y manejar los actuadores, en modo manual.

En la siguiente figura se muestra un diagrama del sistema monitoreo y control de humedad del invernadero.

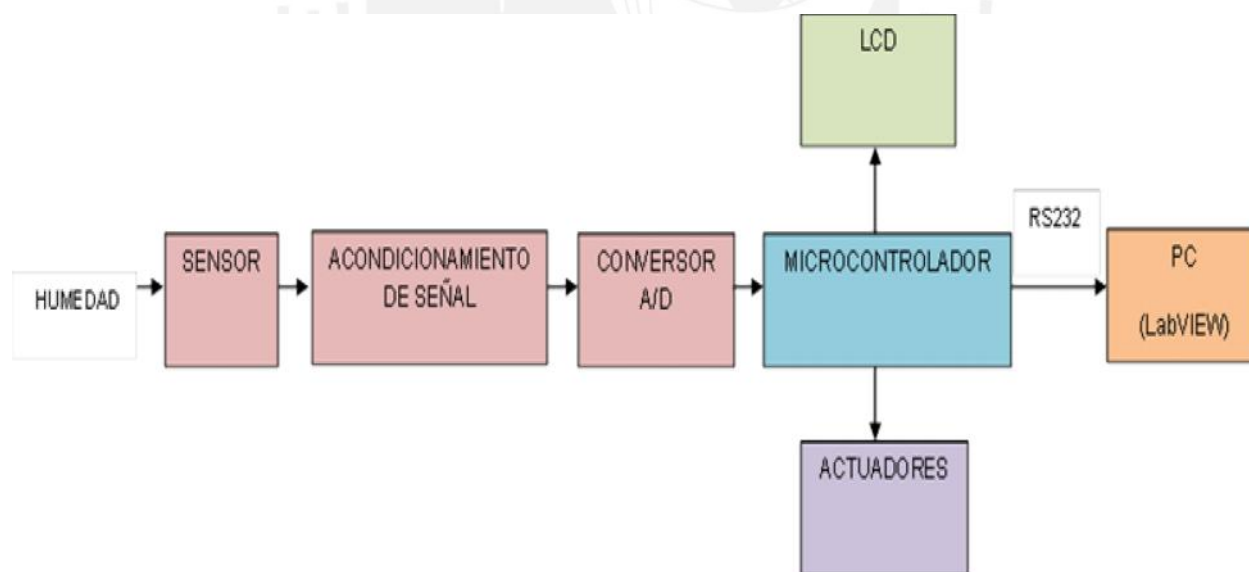


Figura 2.5 Diagrama general del sistema de control y monitoreo de humedad

CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL DE HUMEDAD

3.1. Objetivos

3.1.1. Objetivo general

Diseñar un sistema automatizado para el monitoreo y control de humedad en un invernadero.

3.1.2. Objetivos específicos

- 1) Selección del sensor y diseño del circuito para medir la humedad relativa del invernadero.
- 2) Diseño e implementación de un algoritmo de control que permita mantener la humedad relativa del invernadero de acuerdo a las necesidades de cada tipo de cultivo.
- 3) Diseño de una interfaz de usuario.

3.2. Consideraciones para el diseño

Debido a que todavía no existe un invernadero en la ciudad de Llaclla. En este trabajo se ha propuesto un invernadero, el cual se tomará en cuenta para realizar el diseño del sistema automatizado.

El invernadero estará ubicado en la ciudad de Llaclla, en el distrito de Abelardo Pardo Lezameta, provincia de Bolognesi, departamento de Áncash (Ver Figura 3.1), con latitud $10^{\circ}18'05.68''$ y longitud $77^{\circ}08'41.86''$, a 2200 msnm aproximadamente. El clima de la zona es cálido y variado, adecuado para el crecimiento de una variedad de frutas y hortalizas.



Figura 3.1 Imagen de la ciudad de Llaclla capturada por Google Earth

El invernadero que se propone construir es de tipo túnel, el cual tiene varias ventajas, entre ellas gran resistencia a fuertes vientos, buena ventilación y buen reparto de la luminosidad en su interior. En la figura 3.2 se muestran las dimensiones del invernadero, los cuales se han definido de acuerdo al tipo de invernadero y el área donde se ubicará.

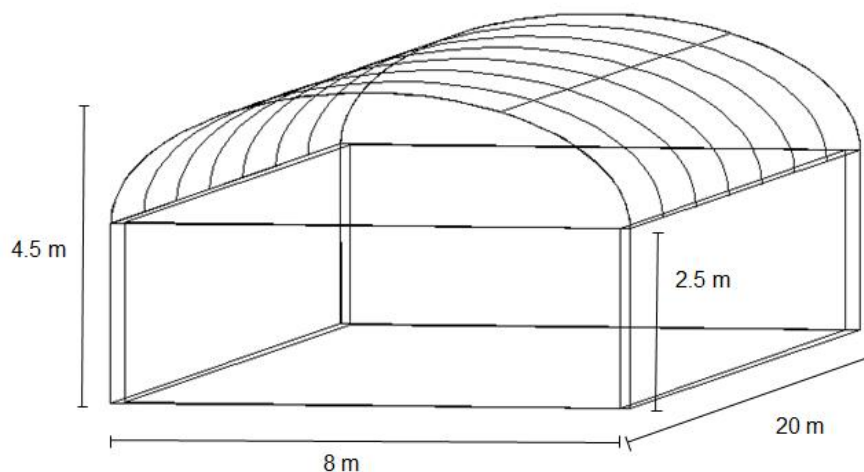


Figura 3.2 Dimensiones del invernadero tipo túnel

Por otro lado, los pobladores del lugar quieren usar este invernadero para cultivar plántones de palto, lúcumo, chirimoyo y pino silvestre, para luego llevarlos al campo. Se muestra las condiciones climáticas requeridas por estos tipos de cultivo en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Condiciones climáticas adecuadas para el palto, lúcumo y chirimoyo

Tipo de cultivo	Temperatura (°C)	Humedad (%)
Palto	10 - 28	65 - 85
Chirimoyo	12 - 24	75 - 85
Lúcumo	14 - 25	80 - 90

Para el caso del pino silvestre, los plántones requieren una humedad menor que los tres árboles frutales, a diferencia de estos que tienen un rango de humedad óptimo similar y pueden desarrollarse en un mismo invernadero. Además, el palto, lúcumo y chirimoyo generan mayor evapotranspiración que el pino, lo cual influye en el control de la variable climática. Por estos motivos, solo se tomó en cuenta el rango de humedad óptimo de los tres cultivos para el diseño del sistema de control; sin embargo, este diseño también sirve para un invernadero con otro tipo de cultivo, ya que solo se modifica el valor de referencia de humedad que se quiere tener dentro del lugar.

Como ya se mencionó, la evapotranspiración es un factor muy importante, el cual también se toma en consideración a la hora de determinar la cantidad de sensores de humedad que se van a colocar dentro del invernadero, así como también su ubicación. Las plantas con mayor evapotranspiración añadirán mayor vapor de agua al invernadero, incrementando su humedad. Si se cultivan plantas con valores de evapotranspiración muy diferentes en un mismo espacio se necesitarán colocar sensores en diferentes zonas del invernadero: en el centro, en las entradas y salidas de aire. Por otro lado, si tenemos plantas con similar evapotranspiración, con un solo sensor será suficiente para medir la humedad relativa, ya que su valor será casi la misma en todo el invernadero. Otro factor determinante para definir el número de sensores es el volumen del invernadero, si el invernadero es muy grande se deberá colocar más sensores, los cuales permitirán obtener un valor promedio de la humedad.

Por lo tanto, para este invernadero solo se eligió como tipos de cultivos los plántones de lúcumo, chirimoyo y palto, ya que estos necesitan las mismas condiciones de humedad y

generan un valor de evapotranspiración similar, con esto tendremos un invernadero con solo un sensor de humedad que brinde los datos medidos al microcontrolador.

Por último, es importante tener en cuenta que si bien solo se monitorea y controla una de las variables climáticas dentro del invernadero, no se debe olvidar que un cambio en una de ellas ocasiona un efecto en la otra, ya que están relacionadas entre sí, como es el caso de la humedad y la temperatura.

3.3. Descripción del sistema de control y monitoreo

El sistema automatizado está formado por un sistema de control formado por un microcontrolador, un sensor y actuadores ubicados dentro del invernadero, y una interfaz gráfica de usuario instalada en una computadora.

El microcontrolador recibe la información obtenida del sensor de humedad y basándose en una lógica de control ejecuta una de las dos etapas: humidificación y deshumidificación.

La etapa de humidificación consiste en activar el sistema de nebulización, y también la ventilación del invernadero para lograr así una correcta humidificación. En esta etapa se toma en cuenta el valor del déficit de presión de vapor (DPV) para regular el sistema de nebulización. Este parámetro nos ayuda a prevenir la condensación en el follaje de los cultivos causado al aumentar la humedad, evitando así las condiciones que favorecen la ocurrencia de enfermedades en las plantas. El valor de DPV se calcula midiendo la humedad relativa del aire que rodea la hoja de la planta usando el sensor elegido, y la temperatura, también medida por el mismo sensor, para poder calcular el valor aproximado del DPV. Cuando la humedad llegue a un valor por encima del límite máximo, se realiza la etapa de deshumidificación, el cual consiste en ventilar el invernadero, extrayendo el aire húmedo del lugar.

Por otro lado, el microcontrolador se comunica a través del puerto serial a una computadora con una interfaz gráfica, en el cual el usuario puede observar lo que sucede dentro del invernadero. El microcontrolador envía información de las condiciones climáticas del invernadero a la computadora, de la misma manera, el usuario puede

modificar remotamente el valor de referencia de humedad que maneja el microcontrolador. Además, la interfaz tiene un modo manual en el cual el usuario puede enviar comandos de control al microcontrolador para encender o apagar los diferentes equipos del invernadero.

El sistema automatizado que se diseñó presenta el diagrama de bloques de la figura 3.3.

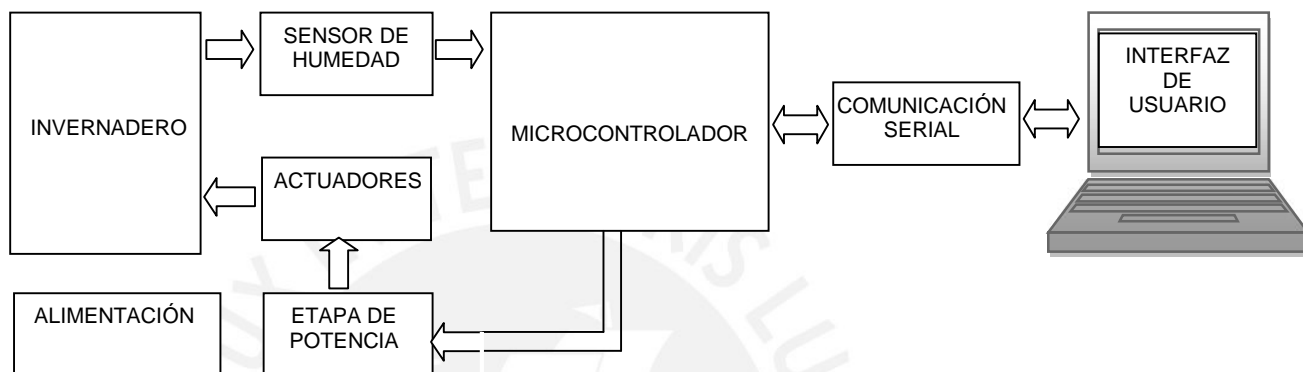


Figura 3.3 Diagrama de bloques del sistema

3.4. Estrategia de control

La lógica de control elegida es ON/OFF, es decir, el microcontrolador acciona o apaga un actuador cuando la variable de control está por encima o por debajo del valor de referencia. Se eligió este tipo de control porque la variable a controlar cambia muy lentamente. Además, a diferencia de un control proporcional, es más sencillo controlar los actuadores de tipo todo o nada, que tener que adaptar, por ejemplo, una válvula para que funcione de forma diferencial, aparte que resultaría más costoso. Para el control on/off se incluyó un margen de histéresis para evitar el encendido y apagado frecuente de los equipos.

Para el desarrollo del sistema de control primero se definió los valores de referencia de humedad. De acuerdo con los datos mostrados en la tabla 3.1, se determinó que la humedad óptima para los tres tipos de cultivo es 80%, el cual tendrá un lazo de histéresis de $\pm 5\%$, por lo tanto el rango a controlar es de 75% a 85% como se muestra en la figura 3.4.

Como ya se mencionó el sensor de humedad se encarga de medir y enviar la información al microcontrolador. Con los datos recibidos el microcontrolador envía las señales de control a los actuadores para ejecutar una de las siguientes etapas:

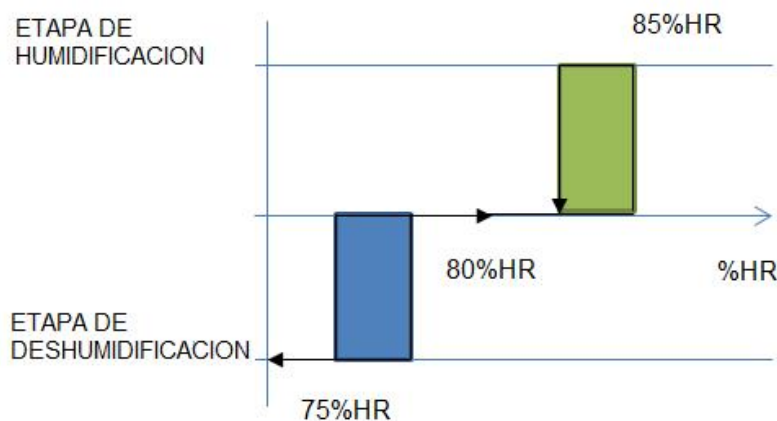


Figura 3.4 Control de humedad con lazo de histéresis

- **Etapas de humidificación**

Como ya se mencionó en esta etapa se activará el sistema de nebulización en conjunto con el sistema de ventilación natural, ya que no es suficiente con solo elevar la humedad del ambiente sino que también se debe prevenir que la temperatura se eleve y afecte a las plantas.

Cuando la humedad sea inferior al límite mínimo, se acciona una electroválvula a través de una señal de control enviada por el microcontrolador, dejando pasar el agua que terminará saliendo en forma de pequeñas partículas a través de boquillas instaladas dentro del invernadero. Así mismo, se envía señales de control a tres motorreductores para abrir las ventanas del invernadero (dos laterales y una cenital). Para este caso las ventanas laterales solo se abrirán hasta la mitad, ya que tampoco queremos que se escape el aire húmedo del invernadero, es suficiente con abrir un poco las ventanas laterales.

El proceso de nebulización se aplica durante 1 minuto, se tiene que tener mucho cuidado con el tiempo de duración de la nebulización, ya que si no se podría mojar a la planta [20]. Luego de 1 minuto se comprueba si la humedad se encuentra dentro del rango requerido,

este tiempo de muestreo se definió tomando como referencia trabajos anteriores [21]. Si la humedad es la adecuada, se mantiene apagado el sistema de nebulización y se cierran las ventanas, sino se vuelve a nebulizar (Ver figura 3.5). Mientras se nebuliza cada 15 segundos se comprueba si el DPV está dentro del rango óptimo para la planta (0.5 a 2 kPa). Si es menor a 0.5 kPa se apaga el nebulizador y luego de 1 minuto se comprueba la humedad del invernadero. El DPV nos permite proporcionar la máxima cantidad de agua para nebulizar el invernadero.

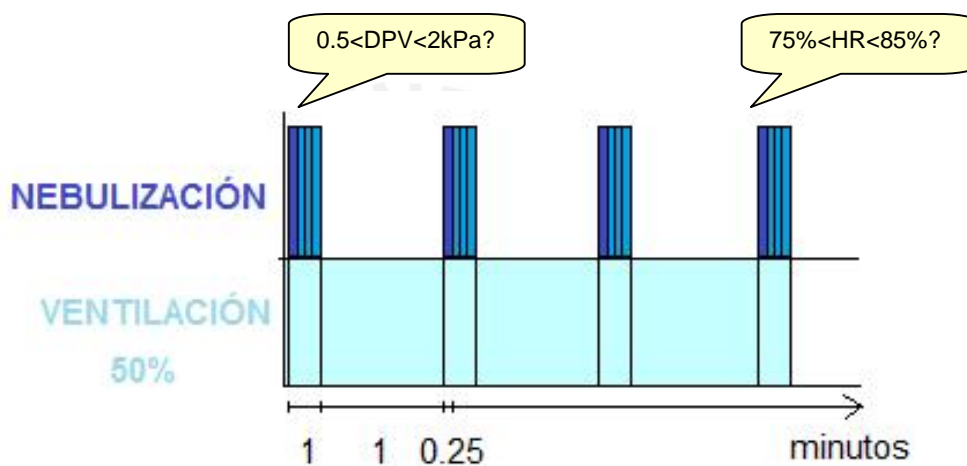


Figura 3.5 Etapa de humidificación

- **Etapa de deshumidificación**

En esta etapa solo se activa el sistema de ventilación natural realizada a través de los tres motorreductores que accionan las ventanas. Luego, de detectar que existe demasiada humedad en el aire usando el sensor, el sistema de control envía señales a los diferentes motores para abrir las ventanas. Las ventanas laterales se abren hasta la mitad durante los primeros 3 minutos, tiempo suficiente para poder de evitar un choque térmico a los cultivos. Luego, se apertura completamente, y cada 1 minuto se comprueba el valor de humedad relativa del invernadero hasta que alcance el rango de humedad adecuada y se cierran las ventanas. Como ya se mencionó este tiempo de muestro se definió tomando en cuenta trabajos anteriores [21], y sabiendo que la humedad cambia lentamente.

Finalmente, si la humedad medida por el sensor se encuentra dentro del rango adecuado, no se realiza ninguna etapa.

3.5. Descripción de los elementos del sistema de control

3.5.1. Sensor de humedad

La selección del sensor de humedad es muy importante, ya que a través de este se obtendrá la información necesaria para la toma de decisiones del sistema de control del invernadero. Para este trabajo se eligió utilizar el sensor de humedad y temperatura DHT22 o también llamado AM2302 (Ver Figura 3.6), debido a que posee un interfaz serial que permite la integración del sistema en forma rápida y fácil. Además, tiene buena precisión, bajo tiempo de respuesta, bajo consumo de energía, la distancia de transmisión de la señal es de hasta 20 metros y su precio es cómodo. En la tabla 3.2 se muestra una comparación del DHT22 con otros sensores de humedad integrados que hay en el mercado. Se observa que la mayoría de sensores en la tabla tienen una buena precisión; sin embargo, con respecto al tiempo de respuesta, los sensores con menor tiempo son el DHT22 y el RHT03, pero a diferencia de este último el DHT22 es más barato.

Tabla 3.2

SENSOR	RANGO DE MEDIDA	PRECISIÓN	TIEMPO DE RESPUESTA	PRECIO (S/)
DHT11	20-90%	±5%	10 s	22.00
HCH-1000-001	10-95%	±2%	15 s	23.00
HS1101	1-99%	±5%	5 s	28.00
DHT22	0-100%	±2%	2 s	25.00
SYH2R	10-95%	±3%	<45 s	14.00
SHT11	0-100%	±3%	<4 s	80.00
SHT75	0-100%	±1.8%	8 s	110.00
HIH 4000-002	0-100%	±3.5%	15 s	89.00
RHT03	0-100%	+2%	2 s	35.00

Fuente: Hojas de datos de cada sensor de humedad

a) Características del sensor y medición de la humedad del invernadero

El DHT22 se compone de un sensor capacitivo para medir la humedad, además viene calibrado de fábrica, lo cual es fiable y no requiere de ningún circuito de calibración, solo se tiene que conectar a pines digitales, ya que su señal de salida es digital y posee un pequeño microcontrolador interno que realiza el tratamiento de señal.



Figura 3.6 Sensor de humedad DHT22 / AM2302

Las principales características de este sensor son las siguientes:

- Alimentación de 3.3 V a 5 VDC
- Lectura de humedad con un +/- 2% a 5% de precisión
- Resolución 0.1%
- Rango de medición de 0% a 100%

Para mayor información sobre el DHT22 ver Anexo 2.

El envío de datos se realiza por un único pin digital en forma serial, en este caso se conectó a uno de los pines digitales del microcontrolador. El sensor transmite 40 bits de datos, los cuales 16 bits son para la humedad, 16 bits para la temperatura y 8 bits de paridad.

La disposición de los pines del sensor se muestra en la figura 3.7, el pin SDA se conecta a uno de los pines del microcontrolador y se agrega una resistencia pull-up.

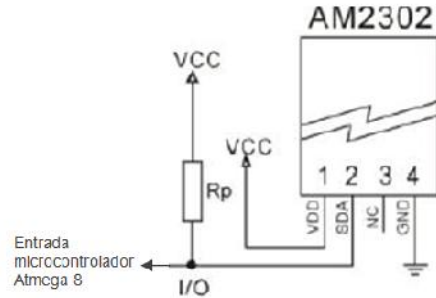
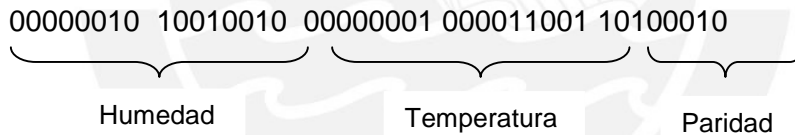


Figura 3.7 Pines del sensor DHT22

Para iniciar la transmisión, el microcontrolador envía un pulso bajo durante 1ms, luego de esto se mantiene en alto durante 30 us aproximadamente. El receptor (sensor) responde la señal de inicio enviando un pulso en bajo, seguido por un pulso alto, ambos de 80 us. Ahora el sensor está listo para enviar los 40 bits de datos. Dependiendo del ancho del pulso en alto sabremos si tenemos un “0” o un “1”. Finalmente el valor de la humedad se obtiene de la siguiente forma:

Si recibimos 40 bits de datos:



Bits de Paridad= 00000010+10010010+00000001+00001101=10100010

↓
Se recibió los datos correctos

Humedad => 00000010 10010010 =0292H (Hexadecimal)=658 (Decimal)

Humedad= 65.8 %

Temperatura => 00000001 00011001 =0119H (Hexadecimal)=281 (Decimal)

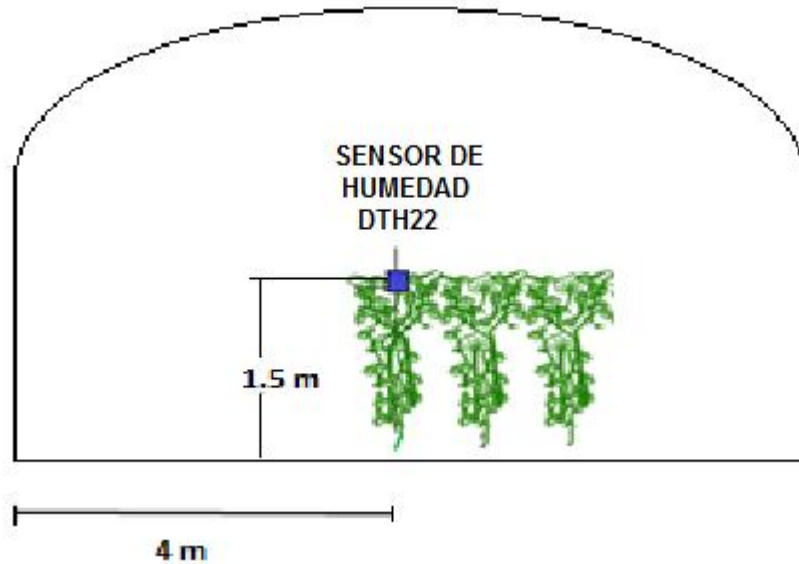
Temperatura= 28.1 °C

b) Medición del déficit de presión del vapor (DPV)

La ubicación del sensor será en el centro del invernadero, a una altura de 1.5m del suelo, cerca del follaje del cultivo, como se muestra en la Figura 3.8. Esto permitirá medir la

temperatura y humedad del aire que rodea la hoja para así poder hallar el valor del DPV.

Figura 3.8 La ubicación del sensor de humedad DHT22 es en medio del invernadero, a un altura de 1.5 m, cerca de las hojas del cultivo, para así obtener una adecuada medición.



El DPV se expresa en kilopascales (kPa), y para conocer su valor aproximado se aprovechará que el sensor de humedad elegido también puede medir la temperatura.

Para regular el sistema de nebulización no es necesario obtener una medida exacta del valor del déficit de presión de vapor de la hoja, es suficiente con medir la humedad y temperatura colocando el sensor lo más cerca posible de las hojas o el follaje del cultivo para tener una buena aproximación del DPV actual de la hoja. Luego de medir la humedad y temperatura en dicha posición utilizamos la siguiente ecuación de Rosenberg [22] que nos permitirá hallar el DPV:

$$DPV = 0.61078 \exp\left(\frac{17.269 \cdot T_a}{T_a + 237.3}\right) \cdot \left(1 - \frac{HR}{100}\right)$$

Donde:

DPV=Déficit de presión de vapor (kPa)

Ta=Temperatura del aire (°C)

HR=Humedad relativa (%)

Esta ecuación no es más que una versión numérica y simplificada del diagrama psicrométrico, el cual nos ayuda a determinar cómo varían las propiedades térmicas del aire húmedo.

3.5.2. Actuadores

Para variar la humedad dentro del invernadero se tiene dos etapas, las cuales se ejecutan de acuerdo a las señales de control que envía el microcontrolador:

Ñ **Nebulización**

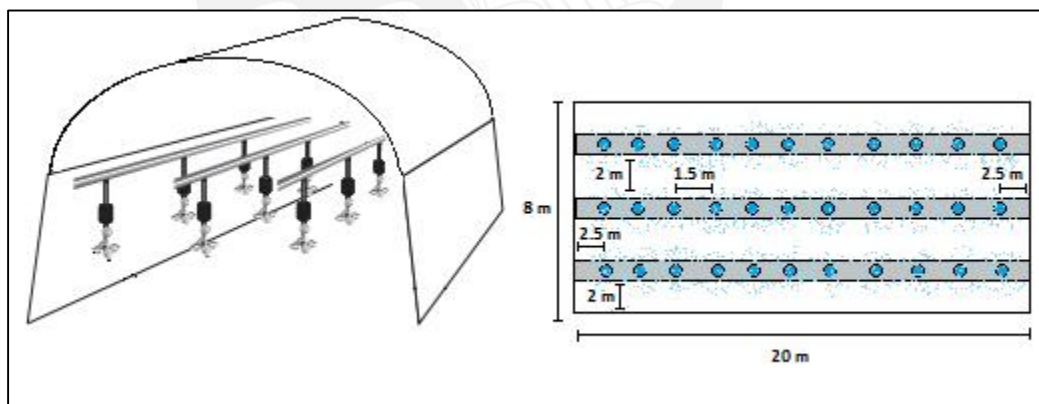
El sistema de nebulización consiste en un equipo que impulsa el agua con una cierta presión hacia unas boquillas, que comúnmente tienen un orificio de 0.2mm; el agua al atravesar el orificio de la boquilla se rompe en un gran número de partículas de agua. Debido a que las partículas son muy pequeñas se evaporan en el aire antes de llegar a mojar los cultivos. En un sistema de nebulización se debe considerar tener equipos como bombas, válvulas, filtros para eliminar las impurezas. También es importante que este sistema funcione junto a un sistema de ventilación para mantener el balance correcto de humedad y temperatura del aire mediante el intercambio de aire.

Para este trabajo se sugiere usar nebulizadores cuyas boquillas están configuradas en cruz para abarcar mayor área de nebulizado, adecuadas para aumentar la humedad en el invernadero (Ver figura 3.9). Se recomienda los nebulizadores de CoolNet Pro de la empresa Netafim, especialista en productos de agricultura, los cuales trabajan en un rango de presión 3.5 – 5 bar. Para una presión de 4 bar se obtiene una gota promedio de 65 micras. El caudal que tiene este nebulizador es de 7.5 l/h, y para su instalación el fabricante recomienda una separación de 1.5 – 2 m entre nebulizadores.



Figura 3.9 Nebulizador CoolNet Pro

Por lo tanto, considerando este tipo de nebulizador, la cantidad de nebulizadores resulta ser de 33 unidades que se distribuirán en todo el área del invernadero como se muestra en la figura 3.10. Cada nebulizador estará separado 1.5 m y cada una de las tres filas en que se distribuyen se separarán cada 2 m, y se colocan lo más altas posibles para prevenir la posibilidad que el agua caiga directamente a las plantas. Estas medidas se tomaron de acuerdo a las recomendaciones y especificaciones para la instalación de este nebulizador aplicado a humidificar el ambiente.



- **Figura 3.10** Ubicación de los 33 nebulizadores dentro del invernadero

- **Electroválvula**

El control del sistema de nebulización se realiza a través de una electroválvula (ver figura 3.11). Este dispositivo emplea un solenoide para conmutar el estado de una válvula cuando se magnetiza al excitarse eléctricamente. Para este tipo de sistemas se recomienda usar electroválvulas con medidas entre $\frac{3}{4}$ " y $1 \frac{1}{2}$ "; y los solenoides más comunes en el mercado son de 24 VAC y 12 VDC. Existen

empresas, como Drip&Fresh y Hunter, que ofrecen una amplia gama de electroválvulas específicamente para la automatización de sistemas nebulización en diferentes aplicaciones.

Para el proyecto, la electroválvula seleccionada es de la marca HUNTER, modelo SRV-101G de 1" la cual tiene regulador de caudal y un solenoide de 24VAC/60Hz, y se usa para este tipo de aplicaciones. La empresa tiene una distribuidora en Perú y el precio del producto se aproxima a los 70 soles, es económica a diferencia de otras válvulas existentes. Las especificaciones técnicas de la válvula se encuentran en el Anexo 3.

Esta electroválvula se activará mediante un circuito de control de potencia, cada vez que enviemos una señal de control por uno de los puertos del microcontrolador, para así obtener como resultado un control ON/OFF (abierto o cerrado).



Figura 3.11 Electroválvula de corriente alterna

Ñ Ventilación

El sistema de ventilación del invernadero es natural, consiste en la apertura y cierre automático de una ventana cenital y dos ventanas laterales. La apertura de la ventana cenital será abatible y la ventilación lateral será enrollable, como se muestra en la Figura 3.12.

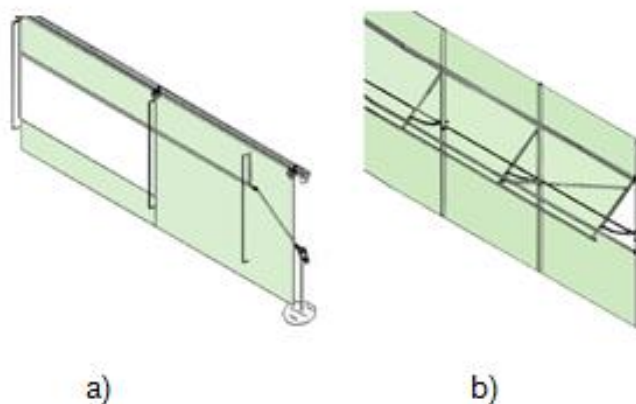


Figura 3.12 a) Ventana enrollable, b) Ventana abatible

El invernadero tendrá una ventana cenital que tendrá una superficie igual al área correspondiente a las ventanas laterales del invernadero (20 m^2), las cuales cada una tiene 1 m de ancho para poder tener una buena ventilación cuando la velocidad del viento es pequeña como se muestra en la figura 3.13.

Para el control y movimiento de las ventanas se usan cremalleras, cajas piñon, brazos para barra de mando y motorreductores.

- **Motorreductor**

Como ya se mencionó, la ventilación se realizará en forma automática con el uso de motorreductores. Existen motorreductores especialmente diseñados para uso en invernaderos, los cuales tienen un consumo de potencia muy baja en relación al par mecánico de salida, además tienen incorporados finales de carrera, que indican si las ventanas se encuentran cerradas o abiertas.

Para este caso, se usará tres motorreductores cuyo valor de velocidad máxima será 4 rpm, esta velocidad es ideal para abrir o cerrar ventanas. Para manejar cada motorreductor se usan dos señales de control provenientes del microcontrolador para controlar el encendido e invertir el giro.

Lo primero que se debe tener en cuenta para elegir un motor es su torque, y se sabe que el torque T se define como el producto vectorial de una fuerza F , que actúa sobre algún punto del cuerpo rígido, y su posición r , respecto de cualquier

origen O.

$$T=rxF=rfsen(\theta)$$

Para calcular el torque mínimo que debe tener el motor se considera el ángulo (θ) entre r y F igual a 90° .

Para elegir el motor que se ubicará en las dos ventanas laterales del invernadero (Ver figura 3.13), los cuales serán colocados en una barra de mando, que al girar enrollará el plástico de la ventana, se considera lo siguiente:

F: 4Kg. (Peso aproximado que soportará el motor por cada ventana lateral)

r: 0.15m

El torque requerido para mover la ventana lateral es:

$$4 \text{ Kg} \times 0.15 \text{ m} = 0.6 \text{ Kg-m} = 5.8 \text{ N-m.}$$

Entonces, para cada una de las ventanas laterales se necesitará un motorreductor 5.8 N-m y de 4 rpm como máximo, como ya se mencionó este valor de velocidad es recomendado por diversos fabricantes de motorreductores usados específicamente para este tipo de aplicaciones.

Por otro lado, para saber la posición de las ventanas laterales se usan interruptores de finales de carrera, los “reed-switches”, los cuales son un par de contactos metálicos que se juntan en presencia de un campo magnético, cerrando el interruptor. Se colocará uno al inicio, al centro y al final para saber si la ventana está abierta, semi abierta o cerrada completamente. Además, se montará un imán sobre la parte móvil de la estructura para activar los interruptores, que enviarán una señal al microcontrolador.

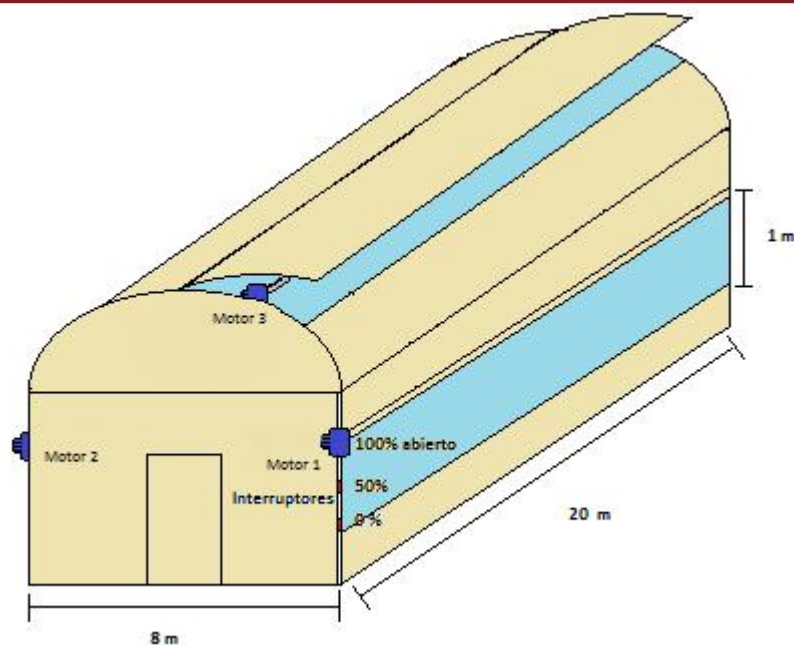


Figura 3.13 Sistema de ventilación del invernadero, formado por los motores 1 y 2 ubicados en las ventanas laterales, y el motor 3 ubicado en la ventana cenital.

Así mismo, para elegir el motor que se ubicará en la ventana cenital, se considera lo siguiente:

F: 8 Kg. (Peso aproximado que soportará el motor, considerando una ventana cenital con estructura de acero galvanizado)

r: 0.7m

El torque requerido para mover la ventana cenital es:

$$8 \text{ Kg} \times 0.7 \text{ m} = 5.6 \text{ Kg-m} = 54.9 \text{ N-m.}$$

De acuerdo a lo calculado, se debe seleccionar un motor con un torque mínimo de 54.9 N-m, y con una velocidad máxima de 4 rpm.

Este motor estará fijado en la ventana cenital, tal y como se muestra en la figura 3.14, además, se colocarán dos interruptores finales de carrera para saber el estado de la ventana (abierto o cerrado).



Figura 3.14 Motorreductor ubicado en una ventana cenital

Los tres motores seleccionados son de la empresa Agrocomponentes, la cual presenta diferentes tipos de motorreductores monofásicos y trifásicos para el control de ventanas en invernaderos. Para el proyecto los motores serán monofásicos 220V/60Hz de 3.6 rpm y 70 Nm, ya que el valor del torque máximo calculado es de 55 Nm. En el Anexo 4 se encuentra las especificaciones técnicas de este motor.

3.5.3. Microcontrolador

La lógica de control se implementará en el microcontrolador Atmega 8 de la familia AVR. Se eligió este dispositivo debido a las características que posee, las cuales son suficientes para realizar nuestro sistema, por su bajo costo y porque se está familiarizado con su lenguaje de programación debido a cursos previos.

El Atmega 8 posee arquitectura RISC y memoria flash reprogramable eléctricamente. La precisión de los datos a manejar es suficiente con un microcontrolador de 8 bits; a diferencia de otros microcontroladores de 8 bits, cuenta con una gran cantidad de registros de trabajo de propósito general (32), esto ayuda a mejorar la velocidad y disminuir las necesidades de almacenamiento de datos en la memoria, ya que están conectados a la unidad aritmética lógica (ALU) para un rápido acceso.

Las características principales del microcontrolador son: (Ver Anexo 1)

- Tiene 32 registros de 8 bits de propósito general.
- Tipos de Memoria:
 - Memoria flash de 8 Kbytes
 - EEPROM de 512 bytes
 - SRAM de 1 Kbytes
- 3 temporizador/contador
- 8 canales ADC
- 1 USART, este módulo se usará para la comunicación serial entre el microcontrolador y la computadora.
- 1 módulo SPI, para interface serial
- 23 puertos programables de entrada/ salida, los cuales son suficientes para la cantidad de señales a controlar
- Fuentes de interrupción interna y externas
- Oscilador interno de 1,2,4, y 8 Mhz
- Voltaje de alimentación 4.5 a 5.5 voltios

3.5.4. Etapa de potencia

En esta etapa se encuentran los circuitos eléctricos necesarios para suministrar la potencia adecuada para el funcionamiento de los actuadores y proteger al microcontrolador de los voltajes de tensión alterna en el cual trabajan.

Debido a que se manejará altas corrientes para el manejo de los actuadores, es necesario aislar eléctricamente los circuitos digitales de control de la etapa de potencia. En el caso de la electroválvula se usa un dispositivo llamado optocoplador, el cual nos permite obtener un acoplamiento óptico y un aislamiento eléctrico para proteger los circuitos electrónicos de la etapa de potencia. Se eligió el optocoplador MOC3041 que tiene un fototriac con un circuito de detector por cruce de cero, es decir, se activa sólo en los cruces por cero de la corriente alterna. Se conecta el optocoplador junto a otro triac, el cual se encuentra en estado de bloqueo hasta que sea activado por el MOC3041 y encienda la carga, como se muestra en el diagrama esquemático de la figura 3.15. Además se añade una resistencia y un condensador en paralelo al triac para limitar el incremento de

tensión de la carga.

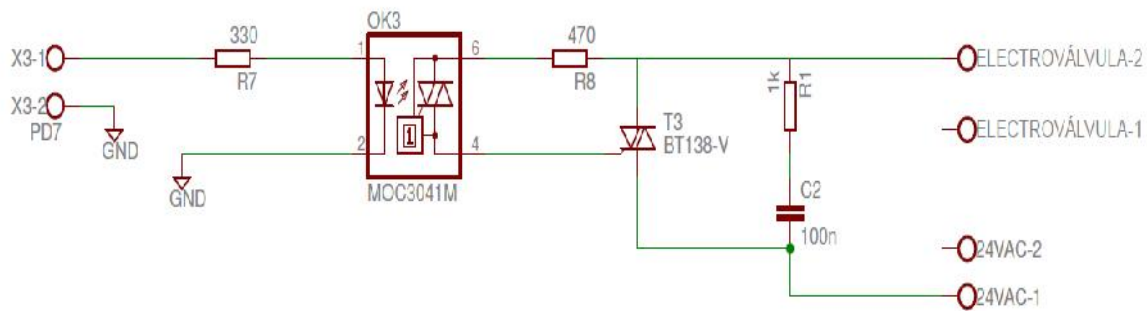


Figura 3.15 Etapa de potencia de la electroválvula

Para calcular el valor de la resistencia R7, se tiene las siguientes especificaciones de la hoja de datos del MOC3041, respecto al diodo:

$V_f=1.25V$, tensión directa nominal

$I_F= 15mA$, corriente mínima que deberá circular por el diodo

Entonces,

$$5V=R7 \times 15mA + 1.25V$$

$$R7= 250 \text{ ohms} \Rightarrow 330 \text{ ohms, resistencia más comercial.}$$

El valor de la resistencia R8, se calcula de la siguiente manera:

$$R8= V_{max} / I_{max}$$

Donde,

$$V_{max}= 24 \times 2 V$$

$I_{max}=100mA$ de corriente máxima que soporta el MOC3041.

Entonces, el valor de $R8= 339.4 \Rightarrow 470 \text{ ohms, resistencia más comercial.}$

Por último, para calcular los elementos de la red RC en paralelo, la cual se usa para proteger el triac de sobretensiones, se debe considerar el tipo de carga que se conecta, en este caso la electroválvula es una carga inductiva. Para este tipo de cargas, se suele colocar valores típicos de $R1=1 \text{ kohms}$ y $C2=100nF$.

Por otro lado, para el encendido y el cambio de giro del motor se usa tres relés

electromecánicos de 12 VDC para cada uno de los motores, como se observa en la figura 3.16. Un relé se encarga de encender el motor y los otros dos se usan para invertir el giro del motor de acuerdo a las señales que envía el microcontrolador. Al igual que el optocoplador, el relé protege a los circuitos que trabajan con 5V de la señal alterna de 220V.

Para calcular las resistencias de base del transistor, R7 y R2 (Ver figura 3.16), se sabe que:

$$I_c = B \times I_b$$

Donde,

I_c: Corriente de colector del transistor.

B: Ganancia del transistor.

I_b: Corriente de base del transistor.

Además, para transistores comunes, se puede considerar razonable una ganancia (B) de 50. Por lo tanto, si la bobina de nuestro relé de 12VDC consume 50mA aproximadamente, la corriente que entrará por la base será de $50\text{mA} / 50 = 1\text{mA}$. Esta será la corriente que deberá salir por el puerto del microcontrolador para controlar el relé.

Entonces,

$$5\text{V} = R_7 \times 1\text{mA} + 0.7\text{V}$$

$$R_7 = 4.3\text{k ohms} \Rightarrow 4.7\text{ kohms}$$

Las resistencias R7 y R2 tendrían un valor de 4.7k ohms, valor que se encuentra comúnmente en el mercado.

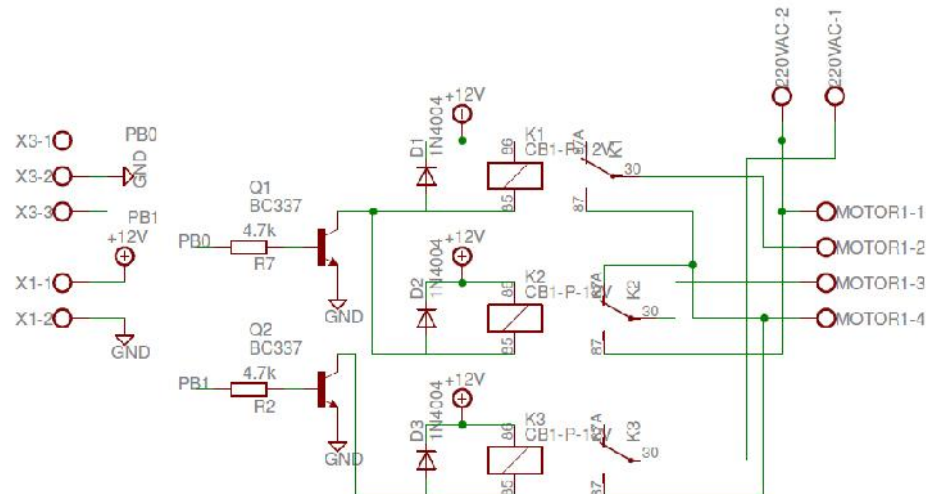


Figura 3.16 Diagrama esquemático de la etapa de potencia de uno de los motorreductores (M1)

Para el diseño de los circuitos impresos se tiene que tener muy en cuenta el ancho de las pistas, debido a la cantidad de corriente que circulará por cada uno de los motores, que se encuentra en el rango de 1-2^a.

Ñ Fuente de alimentación

Para que todos los circuitos del sistema funcionen se necesita de voltajes de tensión continua y alterna. La electroválvula trabaja con 24 VAC, para obtener esta tensión se usa un transformador de 220V/24VAC. Esta tensión reducida se utiliza también para obtener la alimentación de los circuitos que usan corriente continua. Para ello se rectifica con un puente de diodos, y se filtra con un condensador (Ver figura 3.17), luego se envía a los reguladores de tensión LM7805 y el LM7812 para estabilizar los dos niveles de tensión continua de 5V y 12V necesarios para el funcionamiento de todos los circuitos.

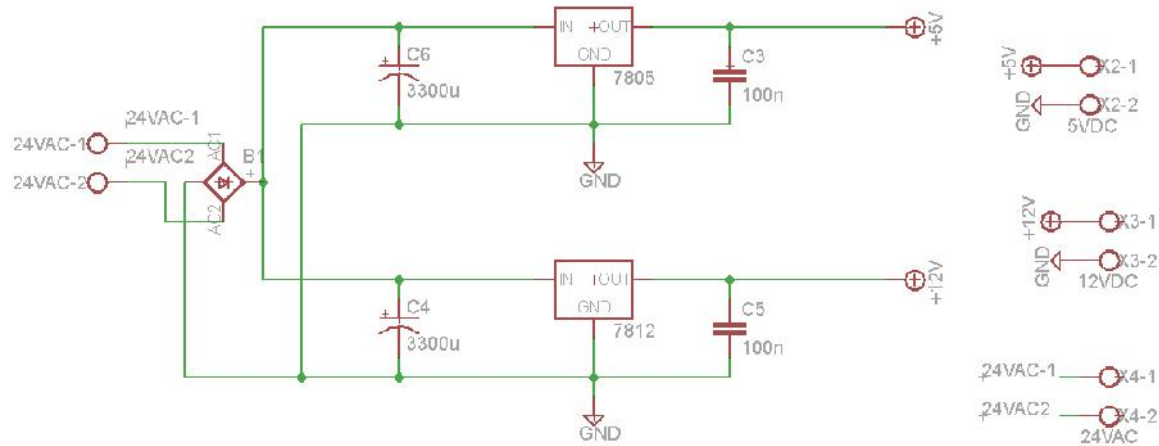


Figura 3.17 Diagrama esquemático de la fuente de alimentación

Para hallar los valores de los condensadores C4 y C6, que se usan para filtrar la señal de salida del puente de diodos, se sabe que:

$$V_r = I / (2 \times f \times C)$$

Donde,

V_r: Voltaje de rizado

f: Frecuencia de la señal, 60 Hz

C: Capacitancia del condensador

I: Corriente que suministra la fuente, 1 A

Considerando la regla de 10% , el voltaje de rizado se calcula como $V_r = 10\% \times 24\sqrt{2} = 3.39$ V.

Entonces, el valor del condensador será igual a $C = 1 / (2 \times 60 \times 3.39) = 2458.2$ uF \Rightarrow 3300uF, valor más comercial.

Por último, el valor de C3 y C5 es de 100nF, este valor fue obtenido de la hoja de datos de los reguladores de tensión LM7805 y LM7812.

3.6. Comunicación serial

El Atmega 8 envía y recibe bytes de información a través del puerto serie USART. Para transmitir información hacia la computadora se usó el estándar RS-232. Se usó el circuito integrado MAX232 para convertir las señales con niveles TTL usadas por el microcontrolador a señales compatibles por el protocolo RS232 del puerto serie del computador.

Las computadoras actuales no cuentan con el puerto serie, debido a esto se usó un cable adaptador USB/RS232, ya que todas las computadoras cuentan con el puerto USB.

En la figura 3.18 se muestra el circuito de comunicación serial usando el MAX232.

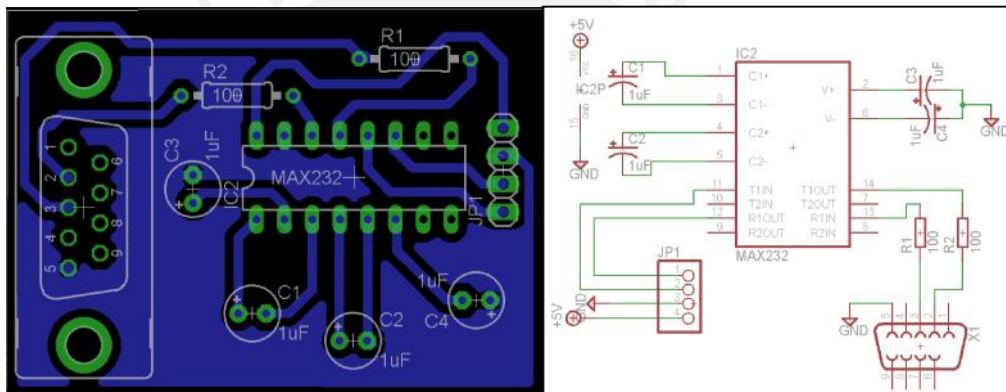


Figura 3.18 Diagrama esquemático y diagrama de pistas del circuito de comunicación serial

3.7. Descripción del programa principal para el microcontrolador

El diagrama de flujo del programa principal se muestra a continuación:

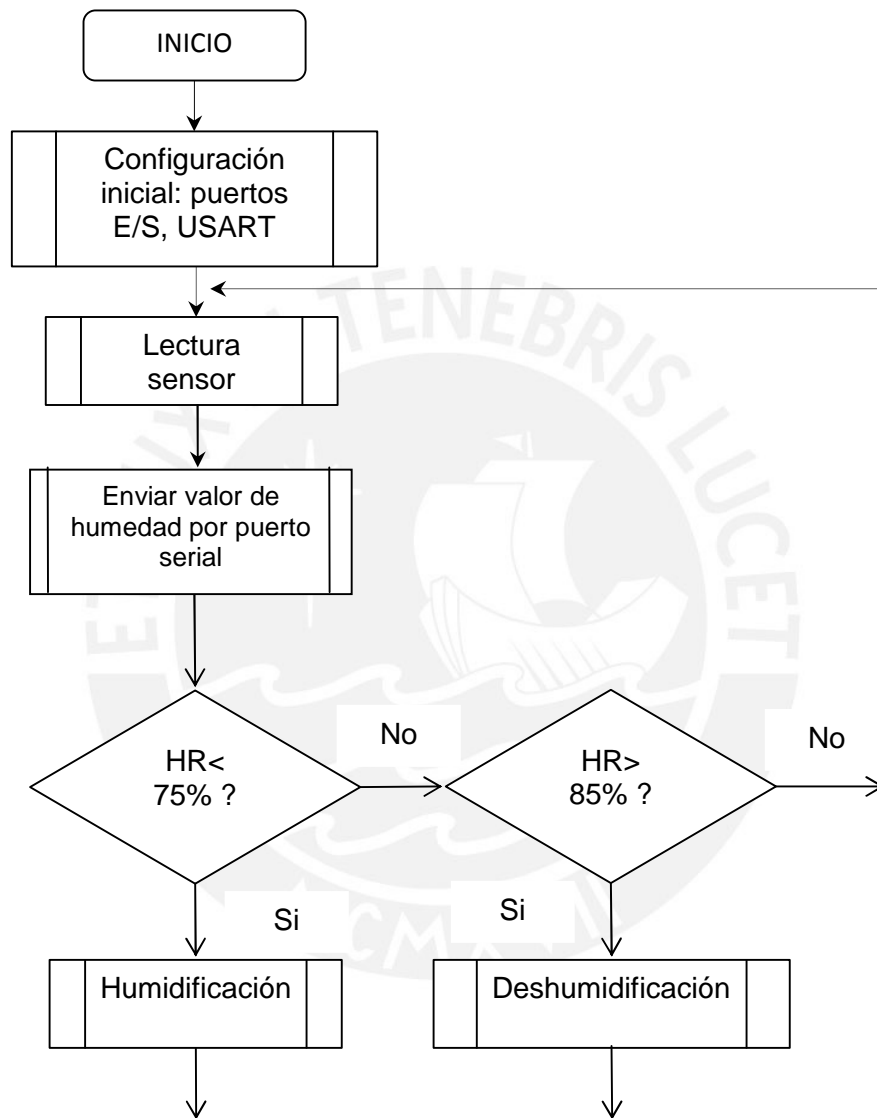


Figura 3.19 Diagrama de flujo del programa principal

Al inicio del programa se configura los puertos E/S, USART. El Atmega 8 ejecuta una subrutina para hallar el valor de humedad medido por el sensor. El microcontrolador almacena el valor de humedad para enviar luego mediante comunicación serial al

computador para que sean mostrados al usuario. Para la configuración de la comunicación serial se estableció una velocidad de 9600 baudios, 8 bits de datos y sin paridad.

Luego, este valor se compara con el rango de humedad definido para el programa, y se envían las señales de control para activar los actuadores de acuerdo a la estrategia de control.

En resumen las funciones que debe realizar el microcontrolador son las siguientes:

- Configuración de los puertos de E/S, USART.
- Obtención valor de humedad y temperatura a partir de los bits de datos enviados por el sensor
- Control los actuadores por medio de señales enviadas a través de los puertos de salida
- Comunicación con la computadora:
 - Envío del valor de humedad.
 - Recepción de los valores mínimo y máximo del rango de humedad definido por el usuario
 - Recepción de comandos enviados por el usuario para controlar los actuadores

En la tabla 3.3 se muestra los comandos definidos para el inicio de subrutinas en el microcontrolador.

Tabla 3.3 Comandos definidos para la comunicación serial

Comando	Definición
'm'	Valor humedad mínima
'M'	Valor de humedad máxima
'T'	Término de la cadena de datos enviados
'n'	Activa nebulización
'o'	Desactivar nebulización
'v'	Enciende la ventilación
'p'	Apaga ventilación

El programa se realizó en el software AVR Studio 4. El diagrama de flujo completo y el código del todo el programa se muestra en el Anexo 5 y 6.

3.8. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario se desarrolló en un software llamado LabVIEW, del fabricante National Instruments. Este software permite desarrollar aplicaciones de control, automatización industrial y adquisición de datos. Además, presenta facilidades para el manejo de interfaces de comunicación serial, visualización y manejo de gráficas. Para poder desarrollar una interfaz, LabVIEW se divide en dos partes, la primera es el panel frontal, el cual es la interfaz que se mostrará al usuario, en donde están los botones, indicadores y gráficos; y la segunda parte es el diagrama de bloques, en el cual se realiza la programación gráfica que define la funcionalidad del interfaz.

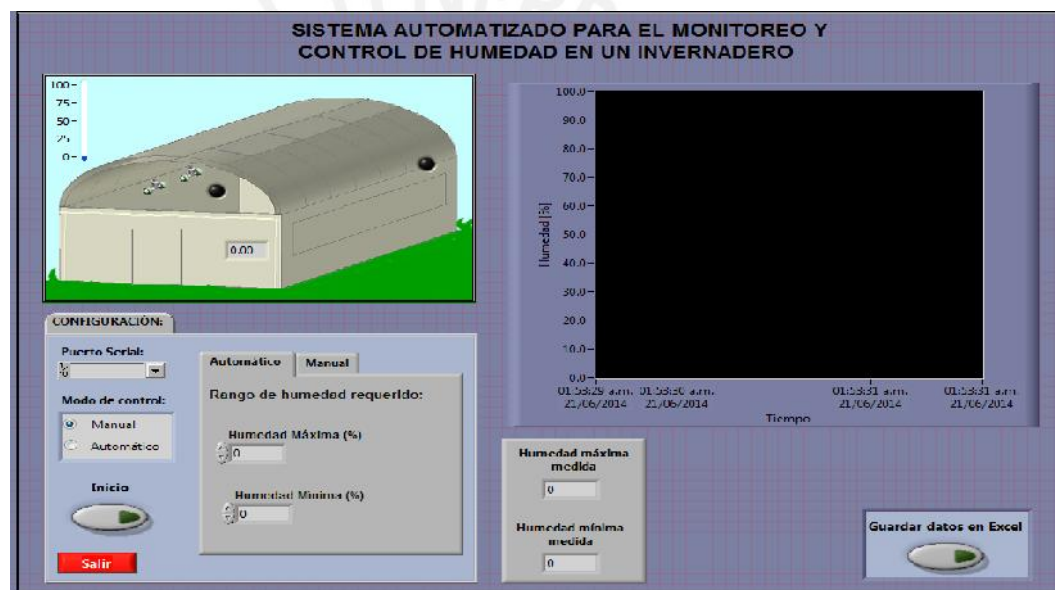


Figura 3.20 Interfaz de usuario

La interfaz instalada en la computadora permite al usuario visualizar el comportamiento de la humedad relativa dentro del invernadero (Ver Figura 3.20). También, el usuario puede enviar comandos de control al microcontrolador. La interfaz de usuario diseñada puede ser instalada en cualquier máquina, no requiere de ningún hardware especial, simplemente conectar el cable USB/RS232.

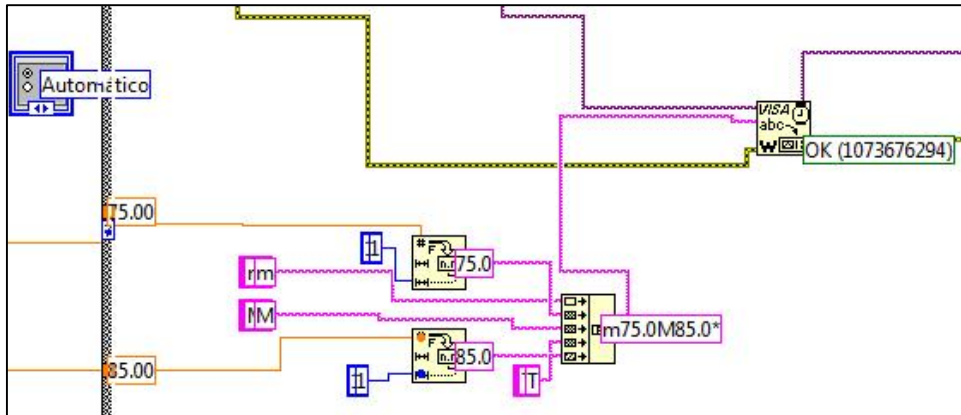


Figura 3.21 Diagrama de bloques del modo automático

En el caso del que programa se ejecute en modo automático, el usuario podrá ingresar los valores máximo y mínimo de humedad deseados. Esta información será enviada al microcontrolador en una cadena de datos como se muestra en la figura 3.21, se definió una nomenclatura para que el microcontrolador sepa que valores está recibiendo. En la figura se envía la cadena: “m75.0M85.0”, esto indica que se envía como valor mínimo (‘m’) 75.0%HR y como máximo (‘M’), 85.0 %HR, el carácter ‘T’ indica el fin de la trama.

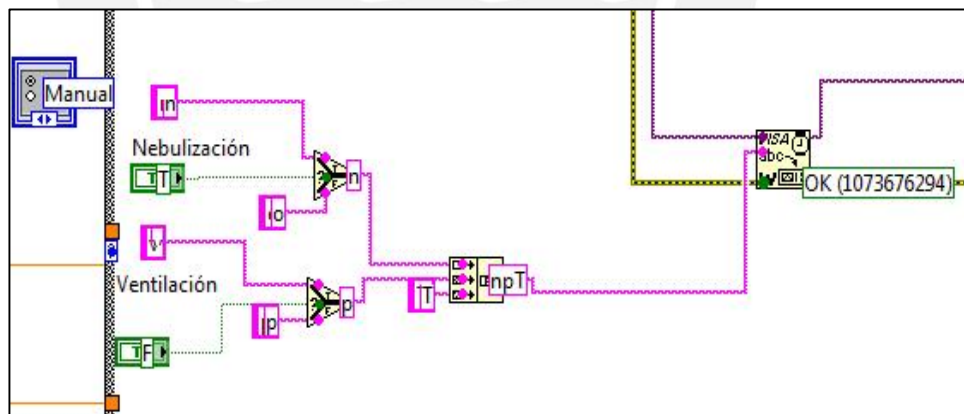


Figura 3.22 Diagrama de bloques del modo manual

La misma idea se usa en el modo manual, cuando el usuario presione uno de los botones de la interfaz para activar los actuadores, se envía comandos de control al microcontrolador usando un carácter específico para indicar que acción debe tomar. En la figura 3.22 se observa el envío de la cadena “npT”, que indica que se debe activar la

nebulización ('n') y apagar la ventilación ('p'). De esta forma se establece una comunicación entre la computadora y el microcontrolador.

En resumen, las tareas implementadas en el panel de control se describen a continuación:

- Configuración de la comunicación serial, se escoge el número de puerto serial con el que se va a trabajar
- Existe dos modos de control:
 - Automático, el usuario ingresa los valores máximos y mínimos óptimos para el desarrollo del cultivo.
 - Manual, el usuario envía comandos de control al microcontrolador para encender o apagar los sistemas de ventilación y nebulización.
- Gráfico para visualizar el cambio de humedad que se genera en el invernadero
- Botones de encendido y apagado del monitoreo, y para la selección del modo de control
- Almacenamiento de información, el usuario puede guardar los datos obtenidos en un archivo de Excel.

Finalmente, el diagrama de bloques completo se muestra en el Anexo 7.

CAPÍTULO 4. PRUEBAS, SIMULACIÓN, RESULTADOS Y PRESUPUESTO

4.1. Pruebas

Para este proyecto se implementó algunos de los circuitos propuestos para poder realizar pruebas que nos permitan verificar el funcionamiento del sistema, especialmente del algoritmo de control y la interfaz del usuario. Se implementó una tarjeta para el manejo del microcontrolador con todos sus puertos disponibles y con un conector ISP para poder grabar el programa con más facilidad, usando un programador para microcontroladores AVR. Además, se adquirió el sensor de humedad DHT22 para poder hacer pruebas de medición, y pruebas con el microcontrolador y la interfaz de usuario. Por último, se implementó el circuito para la comunicación serial usando el MAX232 como se muestra en la siguiente figura.

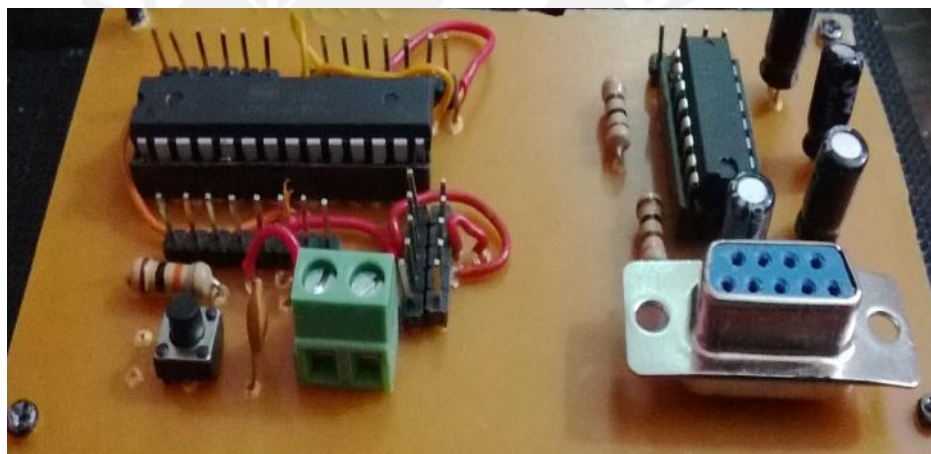


Figura 4.1 Implementación de los circuitos de prueba

4.1.1. Pruebas realizadas con el sensor de humedad

Para realizar las pruebas con el sensor se diseñó e implementó el siguiente circuito:

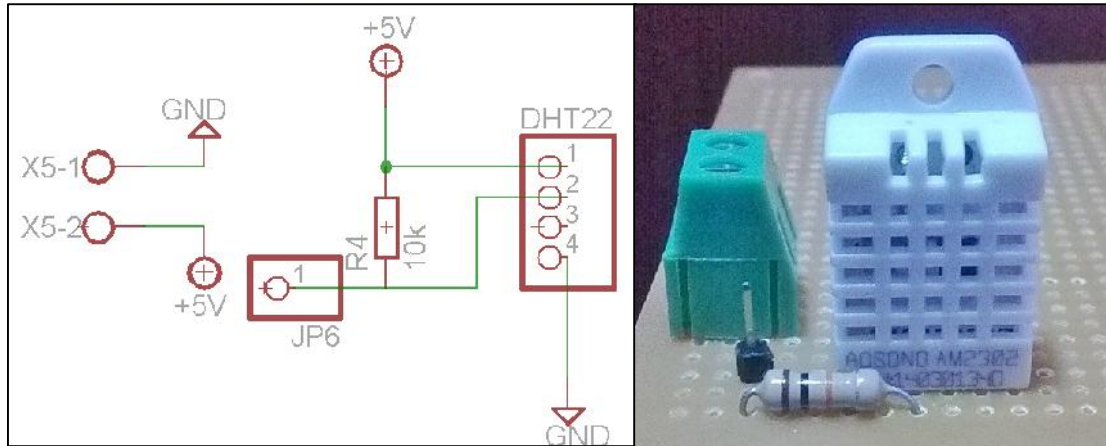


Figura 4.2 Esquemático y circuito implementado para el funcionamiento del sensor de humedad

Como ya se mencionó en los anteriores capítulos el sensor de humedad DHT22 envía 40 bits de datos a través de uno de sus pines cada vez que se le envía una señal en baja de 1ms aproximadamente. Se realizó una prueba en el que se puede observar la salida de datos del sensor. En la figura 4.3 se muestra la señal de salida digital en el osciloscopio, se aprecia los 40 bits que envía con diferentes ancho de pulso, cuando tenemos mayor ancho de pulso, cuando la señal esta en alta, tendremos un '1' y si es menor, será un '0' (Ver figura 4.4).

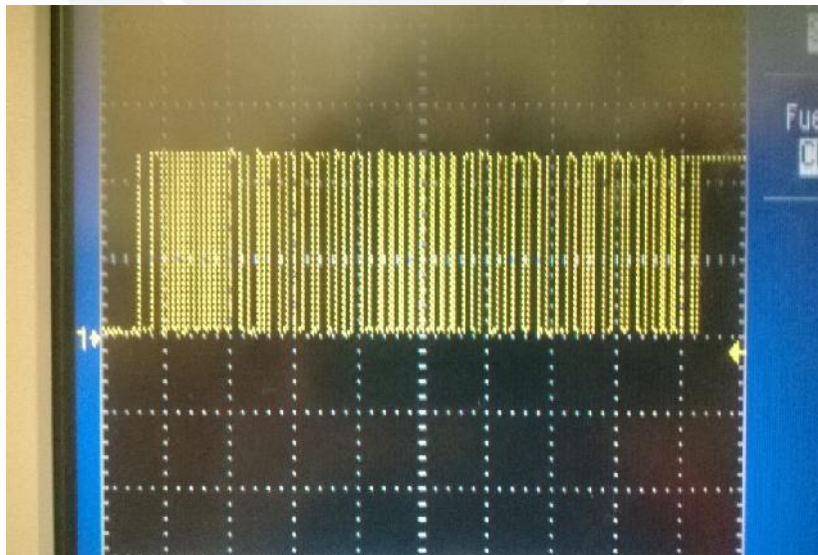


Figura 4.3 Salida de datos del sensor

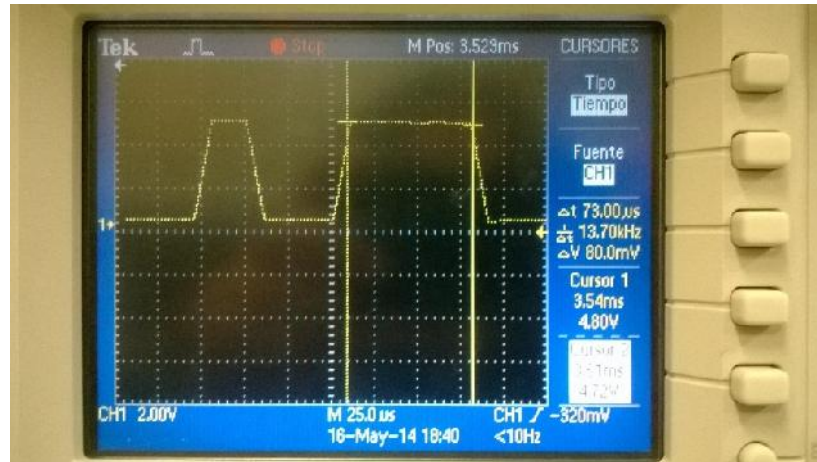


Figura 4.4 Señal de salida del sensor de humedad, en el que se muestra la diferencia de ancho entre los dos pulsos.

Se implementó un programa para obtener a partir de los datos enviados por el sensor la humedad, para luego mostrarlas en el terminal de una computadora. La prueba se realizó a las 3:00 am, y se midió una humedad promedio de 54.2%.

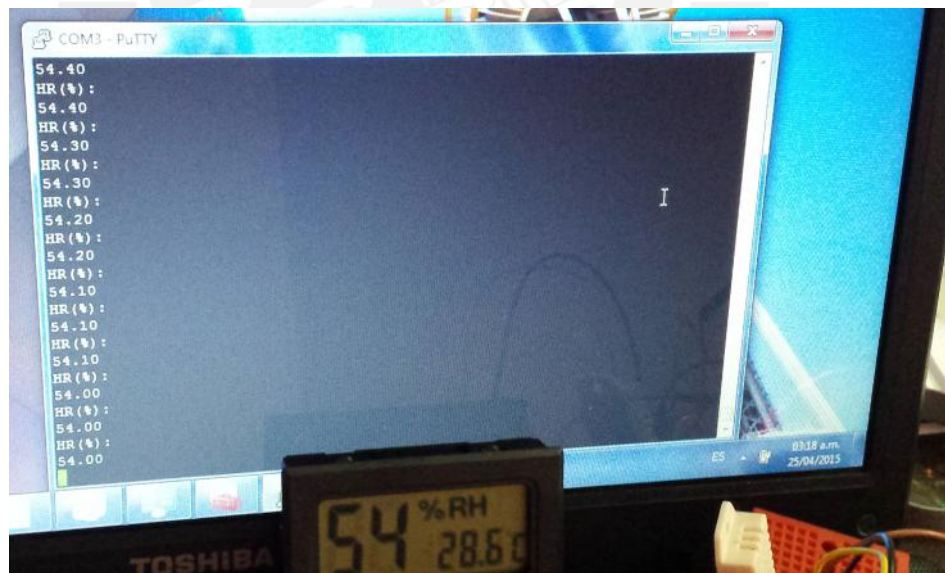


Figura 4.5 Valores medidos por el sensor de humedad

Como se observa en la figura 4.5, se pudo comprobar la medición correcta del sensor de humedad elegido comparándola con un sensor de humedad digital.

4.1.2. Pruebas realizadas con el interfaz de usuario

Se realizó pruebas usando el interfaz del usuario, las cuales consistían en enviar los valores medidos por el sensor de humedad a la computadora. De tal forma que se mostraba en la pantalla el valor de humedad, así como también un gráfico en el cual se observaba la variación de la humedad en el tiempo, y por último estos valores obtenidos se almacenaban en una hoja de Excel, para su posterior análisis.

Para empezar a utilizar el interfaz de usuario primero se configura el puerto serial al que se está conectado, en este caso se conecta al COM6 de la computadora, luego se hace clic en "Inicio".



Figura 4.6 Panel de configuración, en el cual se puede elegir en qué modo de control el sistema funcionará.

Como se muestra en la figura 4.6 se puede elegir entre modo automático y modo manual, más adelante se explicará cómo es el funcionamiento en cada uno de estos modos. Luego de iniciar el sistema, rápidamente se muestra en el gráfico de la interfaz como varía la humedad (Ver figura 4.7). Además, se indica la humedad relativa máxima y mínima medida durante el monitoreo.

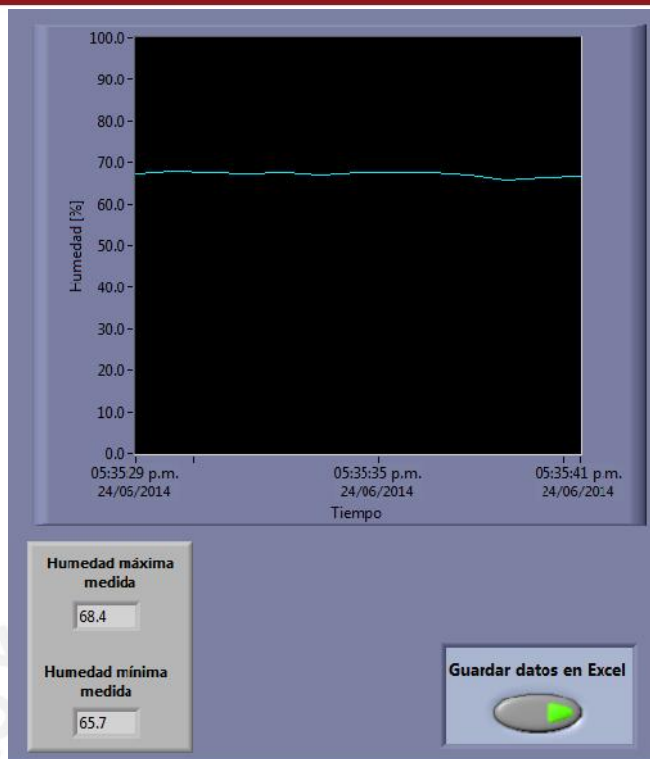


Figura 4.7 Gráfico de la variación de humedad

Cuando se presiona el botón “Guardar datos en Excel ” se almacena la información con fecha y hora obtenida durante todo el proceso de monitoreo, tal y como se muestra en la figura 4.8.

	A	B	C	D
1	Tiempo - Plot 0	Humedad [%] - Plot 0		
2	24/06/2014 17:28	68.3		
3	24/06/2014 17:28	68.4		
4	24/06/2014 17:28	68.3		
5	24/06/2014 17:28	68.2		
6	24/06/2014 17:28	68.2		
7	24/06/2014 17:28	68.1		
8	24/06/2014 17:28	68.2		
9	24/06/2014 17:28	68		
10	24/06/2014 17:28	68		
11	24/06/2014 17:28	67.8		
12	24/06/2014 17:28	67.8		
13	24/06/2014 17:28	67.8		
14	24/06/2014 17:28	67.6		
15	24/06/2014 17:28	67.4		
16	24/06/2014 17:28	67.7		
17	24/06/2014 17:28	67.7		
18				
19				
20				
21				

Figura 4.8 Hoja en Excel con los valores de humedad obtenidos

4.2. Simulación del interfaz de usuario en modo manual y automático

Como ya se mencionó anteriormente, el interfaz de usuario en LabView permite al usuario manejar el invernadero en modo automático y modo manual. La interfaz consta de un gráfico que muestra en tiempo real los valores de humedad medidos dentro del invernadero; botones para seleccionar e ingresar datos como la humedad máxima requerida; y otras herramientas que son de utilidad.

- **Prueba en modo manual**



Figura 4.9 Panel de modo manual, en el cual se muestra los botones para el encendido de la etapa de nebulización y ventilación.

Este modo se considera en caso de que el usuario tenga la necesidad de manejar los actuadores manualmente, como por ejemplo cuando llueva y se tenga que cerrar las ventanas del invernadero para proteger el cultivo.

Para trabajar en este modo simplemente se elige la opción “Manual” y se presiona los botones del encendido y apagado de los actuadores de acuerdo a nuestra conveniencia (Ver figura 4.9).

Para realizar la simulación se usaron LEDs para representar a los actuadores, dos para uno de los motores y uno para la electroválvula. De tal forma que cuando se presionaba el botón de “Nebulización” se prendía un LED, y en el caso de el botón de “Ventilación”, al presionar se encendía dos LEDs, que corresponden a las dos señales de control necesarias para el funcionamiento de un motor (Ver figura 4.10), solo se conectaron LEDs a las salidas de control de uno de los motores. Para el caso de este último boton, se debe tener en cuenta que al elegir esta opción las tres ventanas se aperturan , en el caso de las dos laterales, estas se abrirán completamente.

Figura 4.10 Se probó la comunicación serial entre la computadora y el microcontrolador usando un LED para cada una de las etapas de nebulización y ventilación, el cual se encendía en caso que el usuario presionará el botón correspondiente dentro de la interfaz.



- **Modo automático**

En este modo el usuario puede ingresar el rango óptimo de la humedad requerida por el cultivo, esta información se envía a través del puerto serial al microcontrolador para que basándose en este rango de referencia ejecute el algoritmo de control on/off. Si no se ingresa ningún valor, el microcontrolador considera el rango definido anteriormente de acuerdo al cultivo 75-85% HR.

El sistema automatizado trabaja de acuerdo a la estrategia de control planteada, menor humedad se enciende la nebulización y ventilación (ventanas laterales abiertas en un 50%); y mayor humedad, se enciende la ventilación (ventanas laterales abiertas en un 100%). No es necesario que le usuario realice otro cosa, el sistema es controlado por el Atmega 8.

Para esta simulación al igual que la anterior se usaron LEDs que identifiquen a los actuadores. Cuando la humedad estaba por encima del máximo se encienden los LEDs que representaban el encendido de uno de los motores motores, y cuando la humedad estaba por debajo del mínimo se encendían los LEDs que representaban la activación de la electroválvula y el motor.

4.3. Resultados

- Se logró obtener mediciones de la variable climática mediante la implementación de un programa y el uso del sensor de humedad. Para verificar la medición realizada por el sensor se comparó con un higrómetro digital, y se obtuvieron valores cercanos.
- Se desarrolló e implementó un programa control usando lógica on /off y se realizaron pruebas para verificar su funcionamiento. Los actuadores se activaban de acuerdo a lo establecido en la lógica de control
- El sistema automatizado permite no sólo controlar un invernadero con un tipo de cultivo específico, como los que se eligió, sino también se puede adecuar a las necesidades de cada invernadero, al establecer usando la interfaz de usuario el valor de humedad que se quiere tener dentro del invernadero.
- Se consiguió establecer la comunicación serial entre el sistema de control y la computadora a través de la interfaz de usuario para poder enviar y recibir información.

4.4. Presupuesto

El presupuesto para la realización del proyecto se detalla a continuación:

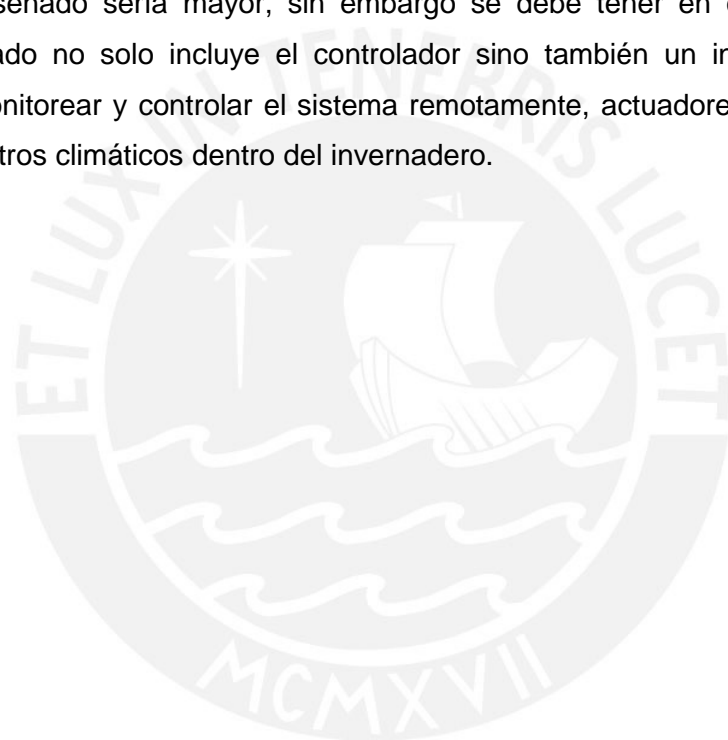
RECURSOS HUMANOS			
Actividad	Costo H.H. (S/.)	Cant. H.H.	Total (S/.)
Programación para el microcontrolador	20	218	4360
Programación LabView	20	144	2880
Diseño e ingeniería	20	336	6720
Instalación	20	96	1920
Fabricación de tarjetas			120
			16000.00

MATERIALES			
Descripción	Cantidad	Precio Unit. (S/.)	Total (S/.)
Microcontrolador Atmega 8	1	13.00	13.00
Regulador de voltaje LM7805	1	3.00	3.00
Regulador de voltaje LM7812	1	3.00	3.00
MAX232	1	2.50	2.50
Puente de diodos	1	2.00	2.00
Sensor de humedad DHT22	1	25.00	25.00
Interruptor final de carrera (Reed-switch)	8	1.50	12.00
Motorreductor monofasico	3	800.00	2400.00
Electrovalvula de 24 VAC	1	70.00	70.00
Transformador de 220/24 VAC	1	25.00	25.00
Optocoplador MOC3041	1	3.50	3.50
Triac BT138	1	4.00	4.00
Relés de 12 VDC	9	15.00	135.00
Transistor BC337	6	2.00	12.00
Diodo 1N4004	9	0.10	0.90
Condensadores	10	0.20	2.00
Resistencia 1/2 w	21	0.10	2.10
Pulsador	1	0.30	0.30
Bornera 2 pines	27	0.50	13.50
Bornera 3 pines	3	0.50	1.50
Bornera 4 pines	4	0.80	3.20
Cable plano de 8 hilos, con conectores hembra de 2 x 4 en cada extremo	1	4.00	4.00
Conector hembra DB9	1	2.00	2.00
Computadora para interfaz de usuario	1	1000.00	1000.00
Cable USB/serial	1	20.00	20.00
Licencia Run-Time de Labview	1	1400.00	1400.00
			5159.50

TOTAL (S/.)			21159.50
-------------	--	--	----------

Para calcular el gasto en recursos humanos se consideró el costo de H.H de un ingeniero recién egresado de 20 soles, dando un total de 16000 soles. El costo total aproximado para la implementación del proyecto, que incluye recursos humanos y materiales a usar es de 21159.50 nuevos soles.

Comparando este precio con soluciones de automatización de invernaderos en el mercado, existen controladores de clima en invernaderos que tienen un costo aproximado de 12000 soles, los cuales incluyen la medición de variables climáticas, así como también el control de la ventilación y nebulización del invernadero. Por lo tanto, el costo del sistema diseñado sería mayor, sin embargo se debe tener en cuenta que el sistema implementado no solo incluye el controlador sino también un interfaz de usuario que permite monitorear y controlar el sistema remotamente, actuadores que permitirán variar los parámetros climáticos dentro del invernadero.



CONCLUSIONES

Se desarrolló el algoritmo de control, basándose en la estrategia de control planteada, usando el lenguaje C con la ayuda del programa AVR Studio 4, y se realizó su implementación en el microcontrolador Atmega8. Así mismo, se diseñó e implementó la tarjeta principal formado por el microcontrolador para realizar pruebas que nos ayude a verificar el funcionamiento de algunas de las etapas del sistema.

El sensor de humedad elegido fue el DHT22 debido a su buena precisión, bajo tiempo de respuesta y bajo costo. Se realizaron mediciones con este sensor, y los valores obtenidos fueron comparados con un higrómetro digital, dando como resultados valores muy cercanos.

Por otro lado, se implementó la tarjeta de comunicación serial usando el Max232, y se realizó con éxito la comunicación serial del sistema formado principalmente por el microcontrolador y una computadora mediante la interfaz de usuario implementada. Esto consistió en el envío del valor de humedad por el microcontrolador, así como también el envío de comandos de control por el usuario que activaban indicadores que simulaban los actuadores del invernadero.

Con todo lo anterior, se concluye lo siguiente:

1. El uso del sensor de humedad DHT22 junto con el circuito de acondicionamiento y la lógica de control, proveen al sistema diseñado de un rango de operación de 0-100% y una resolución de +/-2%. Por lo tanto es posible diseñar un sistema automatizado de control de humedad de un invernadero usando el sensor DHT22 como dispositivo para medir la humedad.
2. El sistema diseñado otorgaría cierta autonomía al invernadero sin depender constantemente del operario, debido a que el sistema mantendría un valor adecuado de humedad dentro del invernadero ejecutando los procesos de ventilación y nebulización en forma automática, sin necesidad que el operario este presente para encender los motores que abren las ventanas o accionar las electroválvulas para que salga el agua a través de los nebulizadores

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar pruebas en condiciones reales con el invernadero a controlar para detectar fallas y hacer modificaciones o adecuaciones para un mejor funcionamiento del sistema. Además, esto ayuda a una mejor selección de los actuadores que formarán parte del sistema, y a analizar el comportamiento de la variable a controlar.
2. Se debe validar la interfaz de usuario con una persona que se dedica al manejo de invernaderos, para saber si cumple con sus necesidades.
3. Una variación en la humedad relativa dentro del invernadero trae como consecuencia una variación en la temperatura. Esto se debe tener en cuenta en invernaderos muy grandes en los que es necesario usar otro tipo de control que incluye ambas variables. Para un mejor control se recomienda el uso de un algoritmo de control multivariable que considere la relación entre la humedad y temperatura.
4. Se debe realizar un estudio más profundo de las otras variables climáticas que afectan al invernadero y considerar en el control para poder tener un mejor manejo del microclima.
5. En caso de tener diferentes tipos de cultivos en un mismo invernadero, se debe diseñar una red de sensores ubicado en diferentes partes para obtener una humedad promedio del invernadero.

BIBLIOGRAFIA

[1] PUJANTE, Fulgencio

2001 "Control climático en invernadero". En SALINAS, José. *El Sector agrario y agroalimentario de Almería ante el siglo XXI: evolución y perspectiva de nuestra agricultura en el año 2000, producción integrada, incidencia de las nuevas normativas de residuos de plaguicidas sobre la horticultura almeriense*. Instituto de Estudios Almerienses, pp. 211-219. Consulta: 11 de abril de 2014.

<[http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-SAA-c13/\\$File/SAA-c13.pdf](http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-SAA-c13/$File/SAA-c13.pdf)>

[2] INFOAGRO

Control climático en invernaderos. Cultivos hortícolas en invernadero. Consulta: 21 de abril de 2014.

< http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm >

[3] CORPOICA

2013 *Tecnología para el Cultivo de Tomate Bajo Condiciones Protegidas*. Manual técnico. Consulta: 29 de setiembre de 2013.

<[http://www.siembra.com.co/NetCorpoica/WebNetAgroNetTec/WebNetAgroNetTec/Pg_GestArchivos/Archivos_Varios/cartilla-Tecnologia%20para%20el%20cultivo%20del%20Tomate\(CLIENTE\).pdf](http://www.siembra.com.co/NetCorpoica/WebNetAgroNetTec/WebNetAgroNetTec/Pg_GestArchivos/Archivos_Varios/cartilla-Tecnologia%20para%20el%20cultivo%20del%20Tomate(CLIENTE).pdf)>

[4] CARRILLO, David y José VÁZQUEZ

2008 *Automatización de un invernadero con el PLC S7-200*. Tesis de Licenciatura. Zacatecas: Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica. Consulta: 04 de noviembre de 2013.

<http://ice.uaz.edu.mx/c/document_library/get_file?uuid=d8507a5e-b959-4ba3-b708-bf5734a0c8a3>

[5] FITOCURSOS

Invernaderos. Consulta: 17 de abril de 2013.

< <http://www.fitocursos.com/Curso-produccion-vegetal-gratuito/new-page-2/unidad-8-sistemas-de-proteccion-y-forzado/pag6.html>>

[6] HERNÁNDEZ, Fernando

Modificación del clima dentro de los invernaderos. Asistencia técnica agrícola. Consulta: 8 de mayo de 2014.

< http://www.agro-tecnologia-tropical.com/modificacion_clima_invernadero.html>

[7] HORTALIZAS

Horticultura protegida. Consulta: 25 de agosto de 2014.

<<http://www.hortalizas.com/horticultura-protegida/invernadero/utiliza-el-deficit-de-presion-del-vapor-en-invernadero/>>

[8] LÓPEZ, Luis

2011 *Diseño de un sistema de control de temperatura on/off para aplicaciones en invernadero utilizando energía solar y gas natural*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería Consulta: 20 de abril de 2013.
<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/996/LOPEZ_VARGAS_LUIS_CONTROL_TEMPERATURA_INVERNADERO_.pdf?sequence=1 >

[9] CAPONETTO, R y otros

2000 "Soft computing for greenhouse climate control". *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*. Volumen 8, número 6, pp. 753-760. Consulta: 4 de abril de 2013.
<<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=890333&isnumber=19275> >

[10] MIRANDA, C.V.

2012 *Sistemas de control continuos y discretos*. s/l: Paraninfo. Consulta: 06 de abril de 2013.
< <http://books.google.com.pe/books?id=kPb7zb-RwJYC> >

[11] SALAZAR, R y otros

2007 " A Neural Network Model to Control Greenhouse Environment ". *Artificial Intelligence - Special Session, 2007. MICAI 2007. Sixth Mexican International Conference on*, pp. 311-318. Consulta: 5 de abril de 2013.
<<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4659321&isnumber=4659283>>

[12] RÍOS, Miguel

2012 *Control de acceso automatizado para invernadero basado en FPGA*. Tesis para obtener el grado de Maestro de Ciencias. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería. Consulta: 15 de marzo de

2014.
<<http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/446/1/RI000105.pdf>>
- [13] TORRES, Isaac
- 2013 *La tecnología aeronáutica optimiza invernaderos*. Investigación y desarrollo. Consulta: 18 de abril de 2014.
<<http://www.invdes.com.mx/innovacion-mobil/3549-la-tecnologia-aeronautica-optimiza-invernaderos> >
- [14] ESTRELLA, Luis y Jorge LEGARDA
- 2010 *Diseño y construcción de un prototipo para la variación de humedad y temperatura dentro de un ambiente cerrado para la realización de prácticas en el laboratorio del DECEM*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército. Consulta: 23 de marzo de 2014.
< <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/807/1/T-ESPE-027474.pdf>>
- [15] MELLADO, Luis
- 2009 *Diseño, implementación y optimización de un monitor inalámbrico en un invernadero*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico. Valdivia: Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Consulta: 07 de mayo de 2014.
< <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/bmfcia321d/doc/bmfcia321d.pdf>>
- [16] ALARACÓN, J.A.
- 1999 "Control del clima en el invernadero". En A.VILARNAU. *Planteles, semilleros, viveros*. Barcelona: Ediciones de Horticultura, pp. 31-44.
- [17] GASSÓ, Francesc y Sergio SOLOMANDO
- 2011 *Estructura e instalaciones de un invernadero*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Técnico Industrial. Barcelona: Universidad Politécnica Cataluña, Departamento de Mecánica. Consulta: 13 de abril de 2013.
<
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/11369/1/Mem%C3%B2ria.pdf> >
- [18] GONZALEZ, I y A. CALDERON
- 2009 "Greenhouse automation with programmable controller and decentralized periphery via field bus". *Mechatronics, 2009. ICM 2009. IEEE International*

Conference on, pp. 1-6 . Consulta: 5 de abril de 2013.

<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4957160&isnumber=4957110> >

[19] YIN, Tongtong, Wenjie FENG y Zheyang LI

2011 " Temperature and humidity wireless sensing and monitoring systems applied in greenhouse ". *Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2011 International Conference on*. Volumen 2, pp. 857-861. Consulta: 6 de abril de 2013.

<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6182097&isnumber=6182035> >

[20] GOMEZ, Manuel

2001 "Control climático mediante nebulización". *Horticultura*. Número 155, pp. 28-34. Consulta: 13 de abril de 2015.

< http://www.horticom.com/pdf/h155_a.pdf>

[21] LOPEZ, Irineo y Leopoldo HERNANDEZ

2009 "Modelos neuro-difusos para temperatura y humedad del aire en invernaderos tipo cenital y capilla en el centro de México. *Agrociencia*, Número 44, pp. 791-805 . Consulta: 12 de abril de 2015.

<http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2010/oct-nov/art-6.pdf>

[22] ROSENBERG, Norman, Shashi VERMA y Blaine BLAD

1983 *Microclimate: The Biological Environment*. Segunda edición. Estados Unidos: John Wiley & Sons. Consulta: 19 de setiembre de 2014.

<<http://books.google.com.pe/books?id=c6MI6VvTqTsC&printsec=frontcover&dq=microclimate+the+biological+environment&hl=es&sa=X&ei=0gUdVKKTIJeLsQSvg4LACQ&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepage&q=microclimate%20the%20biological%20environment&f=false>>

ANEXOS

1. Hoja de datos del microcontrolador Atmega 8.
2. Hoja de datos del sensor de humedad DHT22/AM2302.
3. Hoja de datos electroválvula.
4. Hoja de datos motor.
5. Diagrama de flujo del programa.
6. Código del programa.
7. Panel de control y diagrama de Bloques de la interfaz de usuario en LabVIEW.
8. Diagramas esquemático y de pistas de los circuitos.

