

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA**

**CONTROL AUTOMÁTICO DE DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR (VPD)  
MEDIANTE NEBULIZACIÓN PARA CULTIVO DE TOMATE  
SOLANUM LYCOPERSICUM EN INVERNADERO**

**AUTOR**

**Sr. Alex Orlando Díaz Quilca**

**DIRECTOR**

**Ing. Milton Alejandro Gavilanez Villalobos, MSc.**

**IBARRA-ECUADOR**

**2022**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento al Art. 144 de la ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición de la siguiente información:

DATOS DEL AUTOR			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	1003959606		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Díaz Quilca Alex Orlando		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Urcuquí-Imbabura		
<b>EMAIL:</b>	<a href="mailto:aodiazq@utn.edu.ec">aodiazq@utn.edu.ec</a>		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	No	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0980988680

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	Control automático de Déficit de Presión de Vapor (VPD) mediante nebulización para cultivo de tomate <i>Solanum Lycopersicum</i> en invernadero
<b>AUTOR:</b>	Díaz Quilca Alex Orlando
<b>FECHA:</b>	5 de abril de 2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	PREGRADO
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mecatrónica
<b>DIRECTOR:</b>	Ing. Milton Alejandro Gavilanez Villalobos, MSc.

## CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra, objeto de la presente autorización, es original y se la desarrolló sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto, la obra original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 5 de abril de 2022

**EL AUTOR:**



---

Alex Orlando Díaz Quilca

C.I.: 1003959606



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CERTIFICACIÓN

En calidad de director de trabajo de grado titulado **“Control automático de Déficit de Presión de Vapor (VPD) mediante nebulización para cultivo de tomate *Solanum Lycopersicum* en invernadero”**, presentado por el egresado Alex Orlando Díaz Quilca, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 5 de abril de 2022

---

Ing. Milton Alejandro Gavilanez Villalobos, MSc.

TUTOR DEL TRABAJO DE GRADO

## **Agradecimiento**

Profundamente agradecido con mis padres, María Piedad y Juan Manuel quienes con esfuerzo y dedicación a pesar de las adversidades han estado presentes siempre apoyándome moral y económicamente. Gracias por los consejos, regaños y por inculcar en mí valores de respeto y humildad.

A mi acompañante de vida, Erika, que me ha apoyado en esta etapa de formación, quien entro en mi vida y arrimó el hombro para poder juntos construir este sueño, quien creyó en mí y mis capacidades intelectuales aun cuando hasta yo llegué a dudarlo. Gracias por el aliento e impulso para levantarme en momentos que me había dado por vencido.

A mi tutor por el tiempo dedicado, por sus valiosas y constructivas sugerencias durante la planificación y desarrollo de este trabajo.

## **Dedicatoria**

Al cumplir con este maravilloso periodo de vida, quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, las personas que hicieron realidad este sueño, que siempre han estado conmigo y han sido mi inspiración, apoyo y motor para no rendirme. Esta mención en especial va para mi abuelita Rafaela y mi tía Luisa, muchas gracias por ser ejemplos de bondad, por mostrarme que “el verdadero amor no es más que el inevitable deseo de ayudar a los demás” y sé que donde quiera que estén, se sentirán orgullosas de verme cumplir este sueño.

Mi gratitud también a la Facultad de Ingeniería y a mis maestros, aquellos que más que profesores fueron amigos, profesores a los que admiro y tomo como ejemplo a seguir, quienes me inculcaron valores que sirven dentro y fuera de clase. Gracias por participar de este proceso integral de formación.

## Resumen

La agricultura de precisión es una actividad que está experimentando un constante desarrollo de nuevas tecnologías, para facilitar los procesos que se realizan manualmente mediante máquinas automatizadas, integradas por dispositivos electrónicos y mecánicos. Para ejercer un control adecuado, se utilizan tecnologías de información para monitorear y adecuar las señales recibidas de los cultivos que son de gran importancia en su desarrollo. En este caso, se analiza y controla el Déficit de Presión de Vapor en un invernadero donde se cultivan tomates.

Para el desarrollo e implementación del sistema de control automático, los componentes se seleccionan de acuerdo con las características del sistema de nebulización instalado y las necesidades del usuario, con el fin de proporcionar un dispositivo seguro, y fácil de manipular.

El sistema cuenta con una unidad de control que se encarga de recibir la información proveniente de los sensores y, a través de una serie de algoritmos, determina si es necesario rociar agua en el interior del invernadero para reducir la diferencia de presión de vapor. Asimismo, posee una pantalla OLED que muestra los valores de las variables analizadas para también poder manipular el sistema en modo manual.

Además, se muestran los resultados obtenidos luego de implementar el sistema en modo automático donde se confirma, mediante curvas dinámicas de VPD respecto al tiempo, que el sistema implementado funciona adecuadamente.

## **Abstract**

Precision agriculture is an activity that is experiencing a constant development of new technologies, to facilitate the processes that are carried out manually by means of automated machines, integrated by electronic and mechanical devices. To exercise adequate control, information technologies are used to monitor and adapt the signals received from the crops that are of great importance in their development. In this case, the Vapor Pressure Deficit is analyzed and controlled in a greenhouse where tomatoes are grown.

For the development and implementation of the automatic control system, the components are selected according to the characteristics of the installed nebulization system and the needs of the user, to provide a safe device that is easy to handle.

The system has a control unit that is responsible for receiving the information from the sensors and, through a series of algorithms, determines if it is necessary to spray water inside the greenhouse to reduce the vapor pressure difference. Likewise, it has an OLED screen that shows the values of the analyzed variables to also be able to manipulate the system in manual mode.

In addition, the results obtained after implementing the system in automatic mode are shown, where it is confirmed, through dynamic curves of VPD with respect to time, that the implemented system works properly.

## Índice general

<b>Resumen</b> .....	vii
<b>Abstract</b> .....	viii
<b>1. Introducción</b> .....	1
1.1. Problema.....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo General .....	2
1.2.2 Objetivos Específicos .....	2
1.3 Justificación.....	2
1.4 Alcance.....	3
<b>2. Sustento teórico</b> .....	5
2.1 Variables climáticas importantes para las plantas.....	5
2.1.1 Temperatura.....	5
2.1.2 Humedad Relativa .....	5
2.1.3 Luminosidad.....	6
2.2 Temperatura para cultivo de tomate en invernadero.....	6
2.3 Humedad relativa para cultivo de tomate en invernadero.....	7
2.4 Importancia del cálculo de VPD .....	7
2.4.1 Nivel adecuado de VPD .....	8
2.4.2 Presión de Vapor Saturado (SVP) .....	8
2.5 Método para calcular el VPD.....	10
2.5.1 Ecuación de VPD .....	10
2.6 Control ON-OFF con histéresis .....	11
2.7 Nebulización .....	12
2.7.1 Efecto de la nebulización en cultivo de tomate .....	12
<b>3. Diseño del sistema de control de VPD</b> .....	14
3.1 Descripción del sistema.....	14
3.2 Requerimientos del sistema.....	14
3.3 Sistema de nebulización actualmente instalado en el invernadero .....	15
3.4 Diagrama de bloques.....	16
3.5 Selección de componentes del sistema .....	16

3.5.1 Selección de unidad de control.....	17
3.5.2 Selección de sensor de temperatura y humedad relativa.....	20
3.5.3 Selección de sensor de flujo.....	24
3.5.4 Selección de electroválvulas.....	26
3.5.5 Selección de pantalla.....	30
3.5.6 Gabinete para integración de componentes.....	32
3.6 Diseño de controlador ON-OFF por histéresis.....	33
3.6.1 Diseño de ecuación para determinar tiempo de nebulización.....	35
3.7 Diseño de tarjetas PCB.....	38
<b>4. Integración e implementación del sistema.....</b>	<b>40</b>
4.1 Programación.....	40
4.1.1 Diagrama de flujo general del sistema.....	41
4.1.2 Algoritmo 1: Programa principal.....	42
4.1.3 Algoritmo 2: Pantalla.....	42
4.1.4 Algoritmo 3: Modo Automático.....	42
4.1.5 Algoritmo 4: Modo Manual.....	43
4.2 Esquema de conexión de componentes electrónicos.....	44
4.3 Instauración de la red eléctrica y elementos manuales por electrónicos.....	45
4.3.1 Implementación de electroválvulas.....	45
4.3.2 Implementación del sensor de caudal.....	47
4.3.3 Implementación del sensor de humedad y temperatura.....	47
4.4 Integración de componentes en el gabinete.....	48
4.4.1 Integración de elementos de potencia.....	48
4.4.2 Integración de elementos de control.....	50
4.4.3 Instalación y cableado de botoneras en el tablero.....	51
4.5 Instalación del sistema.....	53
<b>5. Resultados del sistema de control de VPD.....</b>	<b>54</b>
5.1 Curva dinámica de VPD con el sistema puesto en marcha vs curva antes de instalar el sistema.....	54
5.2 Ajustes de parámetros de control.....	55
5.3 Determinación de la curva optima de VPD vs Tiempo.....	56

<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	60
6.1 Conclusiones .....	60
6.2 Recomendaciones.....	60
<b>Bibliografía</b> .....	62
<b>Anexos</b> .....	66
Anexo A. Valoración de opciones de unidad de control.....	66
Anexo B. Data sheet Arduino Mega 2560 .....	68
Anexo C. Valoración de opciones de sensor de Temperatura y humedad.....	72
Anexo D. Data sheet sensor DHT22 .....	73
Anexo E. Valoración de opciones de sensor de Flujo.....	76
Anexo F. Especificaciones técnicas sensor FS-400A .....	77
Anexo G. Valoración de opciones de Electroválvulas.....	78
Anexo H. Características técnicas electroválvula Hunter PGV-101G-B.....	80
Anexo I. Diseño de tarjetas PCB.....	82
Anexo J. Pseudocódigo impresión de datos .....	84
Anexo K. Pseudocódigo modo automático.....	85
Anexo L. Pseudocódigo modo manual .....	86
Anexo M. Diagrama Eléctrico .....	87
Anexo N. Código Arduino .....	88
Anexo O. Interruptor Magnetotérmico .....	102
Anexo P. Interruptor Diferencial.....	103
Anexo Q. Guardamotor .....	104
Anexo R. Manual de funcionamiento .....	105

## Índice de tablas

Tabla 2. 1 Niveles de VPD adecuados para cultivo típico de invernadero.....	8
Tabla 2. 2 Presión de vapor de agua a diferentes temperaturas .....	9
Tabla 3. 1 Evaluación de criterios para la selección de la unidad de control .....	17
Tabla 3. 2 Características técnicas de dispositivos para unidad de control .....	18
Tabla 3. 3 Conclusión de la evaluación de criterios para la unidad de control.....	19
Tabla 3. 4 Matriz de evaluación de criterios para la selección del sensor .....	20
Tabla 3. 5 Características técnicas de sensores para medición de temperatura y humedad .....	21
Tabla 3. 6 Conclusión de la evaluación de criterios para el sensor de temperatura y humedad...	22
Tabla 3. 7 Matriz de evaluación de criterios para la selección del sensor de flujo.....	24
Tabla 3. 8 Características técnicas de sensores para medición de flujo.....	25
Tabla 3. 9 Conclusión de la evaluación de criterios del sensor de flujo.....	25
Tabla 3. 10 Matriz de evaluación de criterios para selección de electroválvulas .....	27
Tabla 3. 11 Características técnicas de electroválvulas .....	28
Tabla 3. 12 Conclusión de la evaluación de criterios de electroválvulas .....	28
Tabla 3. 13 Matriz de evaluación de criterios para selección de pantalla.....	30
Tabla 3. 14 Características técnicas de pantallas .....	31
Tabla 3. 15 Conclusión de la evaluación de criterios de pantallas .....	31

## Índice de figuras

Figura 2. 1. Temperatura vs Humedad Relativa [9].....	6
Figura 2. 2. Blosson End Rot [9]. .....	7
Figura 2. 3. Controlador ON-OFF con Histéresis [15]. .....	11
Figura 2. 4. Boquilla de nebulización [16]. .....	12
Figura 2. 5. Efectos de VPD alto [16].....	13
Figura 3. 1. Croquis del invernadero .....	15
Figura 3. 2. Diagrama de bloques del sistema .....	16
Figura 3. 3. Tarjeta Arduino Mega 2560 [18].....	20
Figura 3. 4. Módulo DHT22 [19].....	23
Figura 3. 5. Sensor de flujo FS-400A [19].....	26
Figura 3. 6. Válvula eléctrica Hunter [20]. .....	29
Figura 3. 7. Pantalla OLED 128x64 [21]. .....	32
Figura 3. 8. Gabinete metálico [22]. .....	33
Figura 3. 9. Modelo de control de la planta .....	34
Figura 3. 10. Conmutación con histéresis .....	34
Figura 3. 11. Comportamiento de VPD en prueba manual.....	36
Figura 3. 12. Gráfica para determinar ecuación de control.....	37
Figura 3. 13. Diseño del circuito de entradas digitales .....	38
Figura 3. 14. Tarjetas mecanizadas.....	39
Figura 4. 1. Diagrama de flujo del sistema .....	41
Figura 4. 2. Dibujo esquemático de conexiones del sistema .....	44
Figura 4. 3. Cables de red eléctrica 110V .....	45
Figura 4. 4. Desmontaje de válvulas manuales.....	46
Figura 4. 5. Sistema de electroválvulas instalado .....	46
Figura 4. 6 Instalación de sensor FS-400 <sup>a</sup> .....	47
Figura 4. 7. Instalación del sensor DHT22 .....	48
Figura 4. 8. Ensamble del sistema de potencia .....	50
Figura 4. 9. Ensamble sistema de control .....	51
Figura 4. 10. Cableado de botones y selectores .....	52

Figura 4. 11. Vista externa del tablero de control.....	52
Figura 4. 12. Interfaz de usuario .....	53
Figura 5. 1. Gráfica de VPD con el sistema en funcionamiento.....	54
Figura 5. 2. Gráfica de VPD antes de instalar el sistema.....	55
Figura 5. 3. Gráfica de VPD en pruebas de sistema .....	56
Figura 5. 4. Gráfica de VPD con SET POINT = VPDmax .....	58
Figura 5. 5. Cultivo de tomate con el sistema en funcionamiento.....	59

# 1. Introducción

## 1.1. Problema

La agricultura de precisión utiliza nuevas tecnologías de información para monitorizar, adecuar y controlar variables de suma importancia que intervienen en los cultivos, este control se lo realiza con el fin de brindar a la planta condiciones climáticas óptimas para su desarrollo y se lleva a cabo mediante el uso de actuadores [1]. Entre las variables de interés en un cultivo se encuentran la temperatura y la humedad relativa, la primera interviene en las distintas fases por las que la planta debe pasar, entre ellas están la fase de producción de tallos, hojas, flores y frutos [2]. Y la segunda participa en la transpiración, fecundación de flores, crecimiento de tejidos y en el progreso de enfermedades [3]. Asimismo, la relación de las dos variables mencionadas da como resultado una variable denominada VPD (Déficit de Presión de Vapor), esta medida ha comenzado a ganar popularidad en la industria de los invernaderos, ya que con este valor se refleja de mejor manera el estado de una planta al combinar los efectos que causa la humedad relativa y la temperatura [4].

Dentro de un invernadero es importante mantener las variables climáticas entre los rangos óptimos para evitar efectos dañinos en los cultivos, no controlar de manera eficaz el VPD hace que los pequeños agricultores toleren la marchitación de sus sembríos en días calurosos, porque no poseen sistemas óptimos para controlar las variables climáticas dentro del invernadero, y es que, los sistemas existentes en el mercado no brindan un control automatizado que ayude a solucionar los problemas de los pequeños agricultores.

Con la implementación de un sistema que controle automáticamente la activación de una bomba eléctrica que suministra agua a un sistema de nebulización de un invernadero, se espera disminuir el VPD, con ello evitar la marchitación del follaje de la planta, ayudar al crecimiento y

mejorar la calidad del producto.

El control adecuado de VPD contribuye en la obtención de mejores resultados de la planta, siendo así que, un sistema que controle automáticamente esta variable será de gran ayuda para los agricultores.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo General***

Implementar un sistema automatizado de control de Déficit de Presión de Vapor, por medio de nebulización para un invernadero con cultivo de tomate.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

Determinar los parámetros adecuados de VPD en los que se desarrolla el cultivo de tomate.

Diseñar un sistema para controlar la variable VPD, especificando los componentes de control, sensor y actuadores.

Implementar el sistema de control automático en el invernadero de tomate.

Validar el sistema de control implementado.

## **1.3 Justificación**

Históricamente en el Ecuador la actividad agrícola contribuye a la generación de capital que permite movilizar a la industria secundaria [5], sin embargo, las inclemencias del tiempo afectan gravemente a los cultivos haciendo que se echen a perder cosechas, por ello durante los últimos años los agricultores han empezado a construir invernaderos, para así proteger sus plantaciones de estas inclemencias climáticas, incluso han implementado sistemas manuales que controlen riego por goteo, reducción de temperatura por ventilación, riego por nebulización, etc. Pero estos tipos de sistemas si bien en algunos casos ayudan al sembrío, no son los adecuados por no poseer un control óptimo de las variables que inciden el desarrollo de la planta, y en otros casos

la activación no controlada de dichos sistemas puede causar efectos negativos en la planta.

Como regla general el cultivo de tomate debe mantener un VPD superior a 0,45 kPa e inferior a 1,25 kPa, para que la planta tenga un mejor crecimiento y buena absorción de agua y nutrientes. Al realizar mediciones de temperatura y humedad relativa en el invernadero del señor Juan Díaz, se procedió a determinar en una tabla de cálculo de Excel el VPD de los datos obtenidos en el transcurso del día, dando como resultado que el sembrío de tomate en ningún momento del día se mantiene en el rango óptimo para su buen desarrollo, incluso en una hora determinada del día el VPD llega a un valor de 3,36 kPa, lo que provoca que la planta cierre sus estomas para evitar una transpiración excesiva y posterior deshidratación, además que la planta deja de absorber CO<sub>2</sub> y el crecimiento se ralentiza.

Con la implementación de un sistema de control mediante nebulización, se espera que el VPD disminuya considerablemente, ya que este sistema no solo ayuda a elevar los niveles de humedad relativa, sino que, al evaporizarse las partículas de agua que salen expulsadas de los nebulizadores se reducirá la temperatura. Gracias a este sistema el pequeño agricultor contribuirá a mantener un clima adecuado para el desarrollo de la planta. Además, se sigue una de las líneas de investigación de la carrera, SIBI (Sistemas Industriales y Biomecánicos) la cual está orientada a la investigación de la agricultura de precisión.

#### **1.4 Alcance**

El dispositivo por implementar llevará un sensor que recopile información de temperatura y humedad relativa, los datos obtenidos de estas variables climáticas serán enviados a un controlador, mismo que estará encargado de tomar decisiones en la activación y desactivación de una bomba que suministre líquido (agua) por una red de tubería hasta los nebulizadores. La activación y desactivación de la bomba dependerá de los parámetros con los cuales sea programado

el controlador, para que la planta de tomate se mantenga en un rango adecuado de VPD para su desarrollo, ya sea en modo automático o modo manual.

Con este proyecto se puede abrir paso a proyectos posteriores que involucren fumigación por nebulización, germinación por nebulización y fertilización por nebulización.

## 2. Sustento teórico

### 2.1 Variables climáticas importantes para las plantas

#### 2.1.1 *Temperatura*

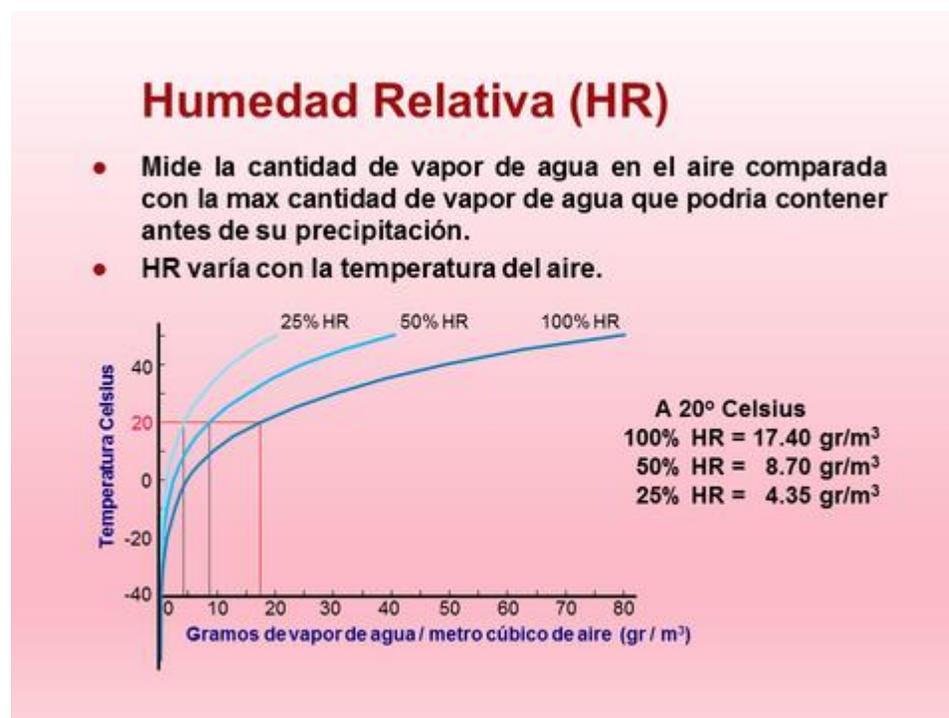
La temperatura es un factor que limita la actividad de los organismos vivos. El intervalo que impera en el planeta tierra es mucho más amplio que el que necesitan los seres vivos, es decir, los seres vivos no usan todo el amplio rango de temperatura que disponen, aunque existen plantas que pueden llegar a soportar alzas de temperatura de hasta 90°C [6].

Las plantas necesitan de diferentes niveles de temperatura para poder cumplir adecuadamente con cada uno de los ciclos por los cuales debe pasar, para así tener una buena floración y fructificación que es lo que más interesa en una plantación, siendo así que, una planta puede verse gravemente afectada si las temperaturas son inferiores a 9°C o superiores a 40°C, ya que al superar estos límites las plantas no tienen un buen cuajado de frutos [7].

#### 2.1.2 *Humedad Relativa*

Para determinar la humedad relativa en el ambiente es necesario saber que existe relación entre el contenido de vapor de agua en el aire y la dosis de vapor de agua que a determinada temperatura puede ser retenida, cuando existe una pequeña variación de temperatura en horas de la mañana o noche puede afectar considerablemente la humedad relativa, haciendo que esta incremente hasta el punto de saturación de vapor de agua y consecuentemente se sature para obtener llovizna, niebla y nubes. Por ejemplo, con una humedad relativa del 75% en el ambiente, significa que el aire retiene el 75% de vapor de agua que podría retener a determinada temperatura [8].

En la Figura 2.1 se puede observar cómo están relacionadas las dos variables climáticas, es decir, si una de ellas varía su magnitud la otra también se verá afectada.



**Figura 2. 1 Temperatura vs Humedad Relativa [9].**

### **2.1.3 Luminosidad**

Los ecosistemas dependen de una fuente de energía para su desarrollo, siendo así que, la luz solar es su principal fuente. La luz solar es capturada por las plantas mediante el proceso de fotosíntesis, esta energía es acumulada en los enlaces químicos. La luz solar también influye en el estado del tiempo en el planeta, esta afecta los patrones del viento, temperatura, humedad y lluvia, los cuales son de sumo interés para los agricultores [8].

### **2.2 Temperatura para cultivo de tomate en invernadero**

La temperatura dentro de un invernadero se comporta de una manera diferente a la temperatura que se tiene fuera de él, esto dependerá del tipo y forma del techo del invernadero, del material, tanto de la cubierta como de las paredes, sin embargo, este valor de temperatura variará dependiendo de las dimensiones del invernadero [10].

La temperatura óptima para que un cultivo de tomate se desarrolle de forma adecuada varía entre los 15 y 30°C, superar este valor produce en las plantas un mal cuajado de flores y frutos. Es

por eso por lo que para cultivar tomate al aire libre la temperatura debe estar en un clima templado entre 30 y 40°C, [11].

Por otra parte, periodos largos de elevada temperatura afectan la corteza de los frutos, produciendo desordenes fisiológicos como el BER “Blosson End Rot” (Figura 2.2) [9].



**Figura 2. 2 Blosson End Rot [9].**

### **2.3 Humedad relativa para cultivo de tomate en invernadero**

La humedad relativa juega un papel importante en la polinización del cultivo. Para que una planta se desarrolle eficazmente en todas sus etapas requiere estar en una humedad óptima de entre 50 a 70%, cuando es mayor la humedad, el polen no viaja de la antera al estigma, porque este se aglomera. Por otro lado, si la humedad es inferior el polen se adhiere al estigma [9].

### **2.4 Importancia del cálculo de VPD**

La relación entre temperatura y humedad relativa da como origen una nueva variable denominada Déficit de Presión de Vapor (VPD). esta medida ha comenzado a ser renombrada en la industria de los invernaderos, ya que se refleja de mejor manera el estado de una planta al combinar los efectos que producen las dos variables [4].

Cuando el VPD dentro de un invernadero es el adecuado para la planta, la humedad de su interior se difundirá al exterior por medio de las estomas de manera adecuada.

Si el VPD es muy alto significa que el aire dentro del invernadero es demasiado seco, esto incita a la planta a transpirar agua excesivamente. En el intento por reducir el daño que produce la transpiración desmedida, la planta cierra sus estomas para reducir la transpiración, pero al realizar esta acción se ve afectado el flujo de  $CO_2$  y con ello el crecimiento de la planta reduce [12].

#### **2.4.1 Nivel adecuado de VPD**

Los agricultores experimentados y científicos de plantas concuerdan en que el valor ideal para que una planta se desarrolle en óptimas condiciones dentro de un invernadero es de 1 kPa. Sin embargo, las plantas se pueden desarrollar de forma aceptable en un amplio rango de VPD que va de 0,40 kPa a 1,5 kPa. En la Tabla 2.1 se puede observar los valores adecuados para cultivar en invernaderos [12].

**Tabla 2. 1 Niveles de VPD adecuados para cultivo típico de invernadero**

<b>VPD máximo</b>	<b>VPD ideal</b>	<b>VPD mínimo</b>
1.5 kPa	1 kPa	0.40 kPa

#### **2.4.2 Presión de Vapor Saturado (SVP)**

La presión de vapor saturado es el límite del valor máximo de vapor de agua que cabe en el aire a una determinada temperatura [12].

En la Tabla 2.2 se puede observar los valores de temperatura vs presión de vapor saturado máxima, de un rango de temperatura de 1-30 °C. Además, esta tabla puede ser usada para determinar el Déficit de Presión de Vapor.

**Tabla 2. 2** *Presión de vapor de agua a diferentes temperaturas*

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>SVP (Pa)</b>
1	657
2	706
3	758
4	813
5	872
6	935
7	1002
8	1073
9	1148
10	1228
11	1312
12	1402
13	1497
14	1598
15	1705
16	1818
17	1937
18	2064
19	2197
20	2338
21	2486

22	2643
23	2809
24	2983
25	3167
26	3361
27	3565
28	3779
29	4005
30	4242

## 2.5 Método para calcular el VPD

El Déficit de Presión de Vapor se calcula mediante la diferencia de la Presión de Vapor Saturado (SVP) y la Presión de Vapor del Aire dentro del invernadero.

Para calcular el VPD existen varios métodos, pero se recomienda usar la ecuación de Penman-Monteith (1) por su exactitud, además de que es usada regularmente en agroclimatología [13].

### 2.5.1 Ecuación de VPD

$$VPD = [PV_{sat} - PV_{air}] \quad \text{Ec. (1)}$$

$$PV_{sat} = 0,61078 * e^{\left[\frac{17,27 * T^{\circ}C}{237,3 + T^{\circ}C}\right]} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$PV_{air} = \left[\frac{HR}{100}\right] * PV_{sat} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

VPD = Déficit de Presión de Vapor

PVsat = SVP = Presión de Vapor Saturado

PV<sub>air</sub> = Presión de Vapor del Aire

T = Temperatura en grados Celsius

H = Porcentaje de Humedad Relativa

## 2.6 Control ON-OFF con histéresis

El control ON-OFF con histéresis es usado para disminuir un número excesivo de conmutaciones. Para algunas aplicaciones este tipo de control puede ser perjudicial es por eso por lo que se debe escoger de manera adecuada la aplicación que va a controlar mediante histéresis, y es que, existen aplicaciones en las que este control funciona adecuadamente.

Este control incorpora un retardo en el cambio de la señal para disminuir la cantidad de conmutaciones, prolongando la vida útil de los componentes. En la figura 2.3 se puede observar que mientras el error se encuentre en la zona muerta la salida no cambia, es decir, la conmutación se efectúa unos grados por arriba del SP y se desactiva unos grados por debajo. Cuanto mayor sea la zona muerta menor es la frecuencia de oscilación, de esta manera hay menos conmutaciones y se reduce el desgaste del dispositivo de control [14].

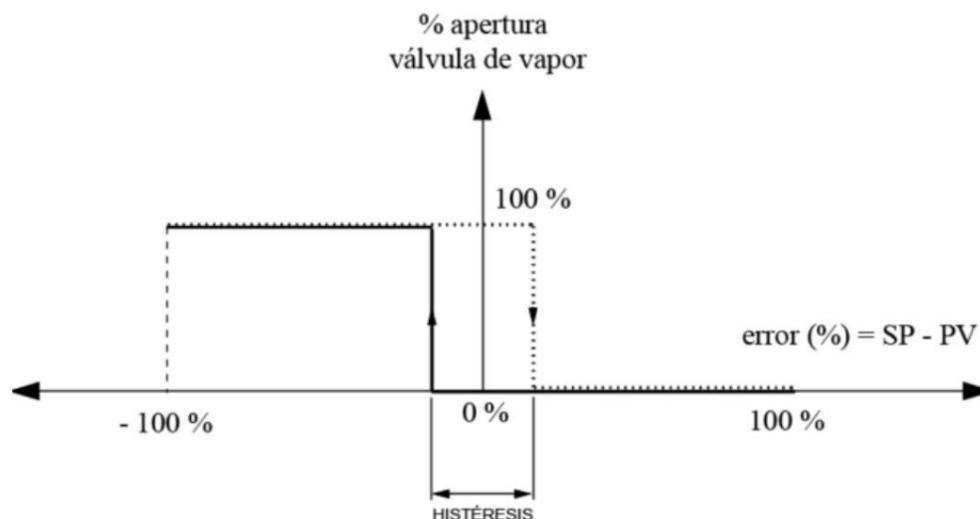


Figura 2. 3 Controlador ON-OFF con Histéresis [15].

## 2.7 Nebulización

La nebulización es usada para controlar el VPD y reducir la transpiración de las plantas. Además, con esta técnica se reduce la pérdida de humedad de las hojas, mediante la humectación del follaje al atomizar el agua por medio de dispositivos llamados “nebulizadores” [4].

Sin embargo, se recomienda tener cuidado al momento de aplicar este método para control de VPD. Si bien al disminuir el VPD mejora el estado de las plantas, sobrepasar los niveles máximos establecidos para un cultivo puede afectar gravemente al sembrío, por el desarrollo de enfermedades bajo la neblina como pudriciones blandas bacterianas y botritis. En áreas que se mantienen húmedas la mayor parte del tiempo se puede tener problemas con el desarrollo de algas. Para controlar el problema con las algas se puede inyectar químicos en el mismo sistema que controla la humedad relativa para así contrarrestar la propagación [4].



**Figura 2. 4** Boquilla de nebulización [16].

### 2.7.1 Efecto de la nebulización en cultivo de tomate

La nebulización en un invernadero consiste en pulverizar agua mediante un difusor, para que las pequeñas partículas resultantes de este proceso se evaporen. La temperatura dentro del invernadero puede disminuir hasta 12 °C, esto se debe a que, al evaporarse el agua en el aire esta

toma energía calorífica del ambiente, con lo que disminuye la temperatura y aumenta la humedad relativa, y en consecuencia se consigue reducir el VPD [16].

Para un cultivo de tomates la nebulización es de gran ayuda, por lo general el tomate se desarrolla en un ambiente adecuado por debajo de los 30 °C y por encima del 50 % de humedad relativa, por lo que, no mantenerse en los rangos mencionados afecta en la duración del tiempo de cosecha y en la coloración del fruto ya que en el mismo se forman pigmentos [16].

Cuando el VPD en un cultivo de tomates excede los límites establecidos, este experimenta estrés hídrico y con ello las hojas se marchitan y los frutos pierden calidad, tal como se puede observar en la Figura 2.5.



**Figura 2. 5 Efectos de VPD alto [16].**

## **3. Diseño del sistema de control de VPD**

### **3.1 Descripción del sistema**

El dispositivo de control de Déficit de Presión de Vapor realiza mediciones de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero, las cuales son relacionadas a través de la unidad de control para determinar el VPD. Cuando la unidad está en modo automático, dinámicamente de acuerdo con el VPD calculado, el controlador tomará la decisión de activar el sistema de nebulización si es necesario, de esta manera el sistema mantiene el VPD dentro de los parámetros requeridos para las plantas de tomate; La unidad incluye una unidad de control, un sensor DHT11 para detección de temperatura y humedad relativa, un sensor de flujo fs400a, una pantalla OLED de 128 x 64, 6 relés y 4 válvulas solenoides.

### **3.2 Requerimientos del sistema**

El sistema debe satisfacer las siguientes necesidades:

- Sensar temperatura y humedad relativa
- Calibrar sensores automáticamente
- Determinar VPD
- Controlar VPD en cultivo de tomate
- Mostrar variables empleadas en pantalla
- Tablero de control fácil de manipular
- Selección de modo manual y automático
- Fácil desmontaje de sensores
- Aislamiento de circuitos para evitar corrosión

### 3.3 Sistema de nebulización actualmente instalado en el invernadero

El invernadero en el que se controlará automáticamente el VPD, se encuentra actualmente en cultivo de tomate *Solanum Lycopersicum*. Está ubicado en la ciudad de Urcuquí, con una superficie de 396 metros cuadrados y cuenta con un sistema de aspersión manual dividido en tres partes como se muestra en Figura 3.1. El sistema también contiene una bomba de agua eléctrica de 1/2 HP normalmente activada para enfriar el ambiente en climas cálidos con 8 boquillas por zona.

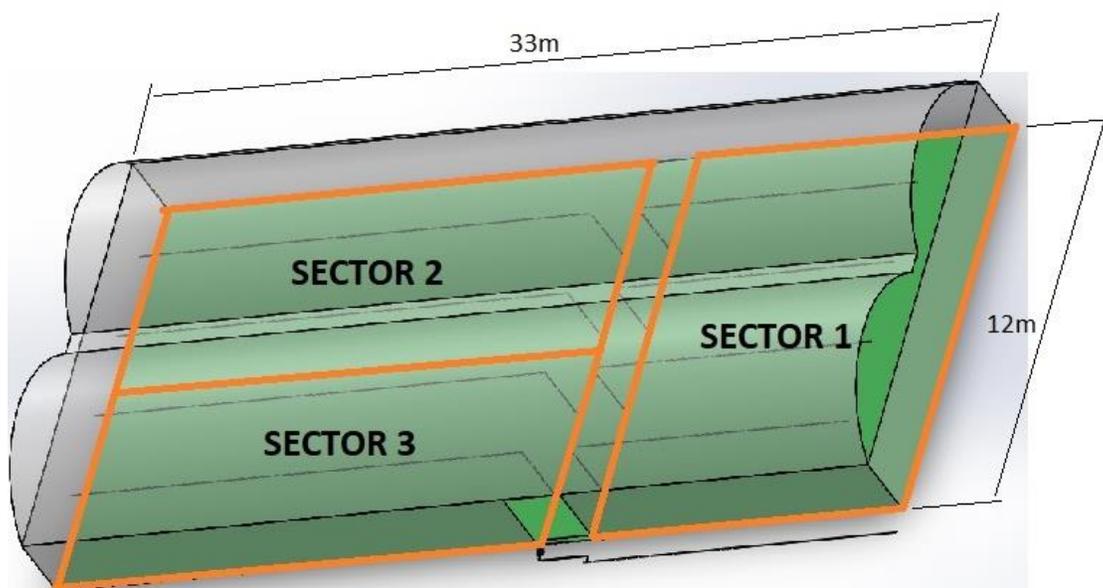


Figura 3. 1 Croquis del invernadero

### 3.4 Diagrama de bloques

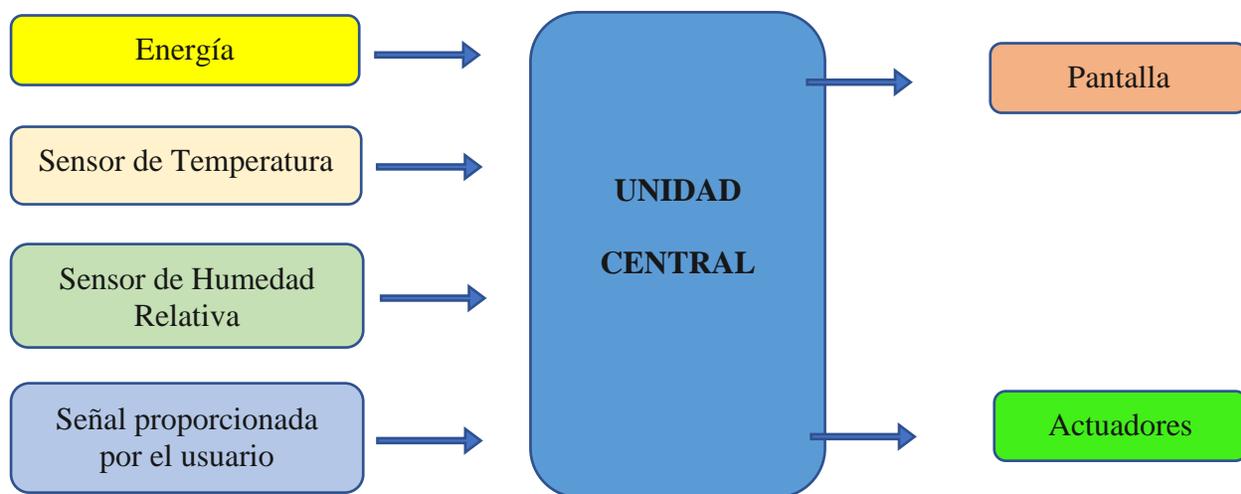


Figura 3. 2 Diagrama de bloques del sistema

### 3.5 Selección de componentes del sistema

Para asegurar un buen funcionamiento del sistema de control de VPD, se ha realizado un proceso de selección de las mejores alternativas en cuanto a los materiales que conformaran el módulo, mediante el método de criterios ponderados.

Este método ayuda al análisis de la solución con relación a los criterios. En este caso los criterios a analizar serán costo, vida útil, procesamiento y medición. La comparación se la realiza mediante una tabla en donde se asignan valores dependiendo de la importancia del criterio respecto de la otra, como se muestra a continuación.

- 0: cuando el criterio de la fila es de mayor importancia que el de la columna
- 0,5: cuando el criterio de la columna y la fila son igual de importantes
- 1: cuando el criterio de la columna es de mayor importancia que el de la fila

### 3.5.1 Selección de unidad de control

Hoy en día existe una gran variedad de tarjetas embebidas que son usadas para realizar un control en diferentes procesos como: agricultura de precisión, domótica, robótica, etc. Sin embargo, para la selección adecuada de un dispositivo programable se deberá tomar en cuenta el propósito, ya que existen unidades de control que trabajan de mejor manera en un ámbito, además de ser más sencillo su uso.

Para la selección del dispositivo de control se aplicó el método de criterios ponderados considerando las siguientes características:

**Tabla 3. 1** Evaluación de criterios para la selección de la unidad de control

<b>UNIDAD DE CONTROL</b>							
<b>Criterio</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Capacidad de procesamiento</b>	<b>Entradas y salidas digitales</b>	<b>Comunicación con sensores</b>	<b>Costo</b>	<b><math>\Sigma</math>+1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Dimensión</b>		0	0	0,5	0	1,5	<b>0,10</b>
<b>Capacidad de procesamiento</b>	1		0,5	0,5	1	4	<b>0,27</b>
<b>Entradas y salidas digitales</b>	1	0,5		0,5	0,5	3,5	<b>0,23</b>
<b>Comunicación con sensores</b>	0,5	0,5	0,5		0,5	3	<b>0,20</b>
<b>Costo</b>	1	0	0,5	0,5		3	<b>0,20</b>
					<b>SUMA</b>	15	1

En la tabla 3.1 se puede observar que en este caso el criterio más importante para la selección de la unidad de control es la capacidad de procesamiento, sin embargo, los puertos digitales que el dispositivo debe poseer y la comunicación con sensores también son de gran importancia.

A continuación, se muestra una tabla con las características más importantes que debe cumplir la tarjeta. Las tarjetas seleccionadas son: Arduino Uno, PLC Siemens Logo y Arduino Mega.

**Tabla 3. 2** Características técnicas de dispositivos para unidad de control

<b>CARACTERÍSTICAS</b>					
	<b>Procesador</b>	<b>Entradas y salidas digitales</b>	<b>RAM</b>	<b>Sistema operativo</b>	<b>Costo</b>
<b>Arduino Uno</b>	16 MHz	14	2 Kb	Linux	\$15
<b>Arduino Mega</b>	16 MHz	54	8 Kb	Linux	\$20
<b>PLC Siemens Logo</b>	1 GHz	40	1 Gb	STEP 7	\$180

En el Anexo A se puede analizar a detenimiento todas las matrices de criterios ponderados procedentes de la tabla 3.1, en base a las 3 alternativas de unidad de control presentadas anteriormente.

### **Conclusión:**

Una vez concluido con el proceso de valoración de criterios se obtiene como resultado la siguiente matriz.

**Tabla 3. 3** Conclusión de la evaluación de criterios para la unidad de control

Conclusiones	Dimensión	Capacidad de procesamiento	Entradas y salidas digitales	Comunicación con sensores	Costo	$\Sigma$	Ponderación
<b>Arduino Uno</b>	0,04	0,07	0,04	0,03	0,07	0,25	<b>3</b>
<b>Arduino Mega</b>	0,03	0,09	0,12	0,08	0,07	0,39	<b>1</b>
<b>PLC Siemens Logo</b>	0,03	0,11	0,08	0,08	0,06	0,35	<b>2</b>

La alternativa con mejor ponderación es la tarjeta Arduino Mega, este dispositivo cumple con la mayoría de los requerimientos necesarios para el sistema como: puertos digitales, costo y procesamiento. Por otra parte, el dispositivo PLC Siemens Logo también cumple con la mayoría de los requerimientos, sin embargo, este tiene un costo relativamente alto con respecto a la placa Arduino Mega.

**3.5.1.1 Arduino Mega 2560.** Arduino es una marca de microcontroladores actualmente muy usada para desarrollar proyectos de electrónica, robótica y programación. Estos dispositivos están basados en el microcontrolador AtMega y poseen una amplia gama de tarjetas, además son un proyecto Open Source.

Como se mencionó antes, el Arduino Mega 2560 es una tarjeta basada en el microcontrolador AtMega2560. Este posee 54 puertos digitales entre entradas y salidas, 15 de ellos pueden funcionar como salidas PWM, 16 puertos para señal analógica, 4 puertos por hardware UART, un oscilador de 16 MHz, un botón para reiniciar el sistema y una conexión por USB [17].

**3.5.1.2 Diagrama de puertos de Arduino Mega 2560.** En la figura 3.3 se puede observar un diagrama con las partes del hardware de la tarjeta seleccionada para el desarrollo del proyecto.



<b>Sensor de Temperatura y Humedad Relativa</b>							
<b>Criterio</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Comunicación</b>	<b>Rango de Medición</b>	<b>Costo</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Dimensión</b>		0	0	0,5	0	1,5	<b>0,10</b>
<b>Comunicación</b>	1		0,5	0,5	1	4	<b>0,27</b>
<b>Rango de Medición</b>	1	0,5		0,5	0,5	3,5	<b>0,23</b>
<b>Costo</b>	0,5	0,5	0,5		0	2,5	<b>0,17</b>
<b>Disponibilidad</b>	1	0	0,5	1		3,5	<b>0,23</b>
					<b>SUMA</b>	15	1

La tabla 3.4 evidencia que los factores de mayor importancia que hay que tomar en cuenta al momento de seleccionar el sensor de temperatura y humedad son: la comunicación y la disponibilidad de este el mercado. Sin embargo, también es necesario tomar en cuenta el rango de medición en el que opera el dispositivo.

Para la determinación del sensor se pone a conocimiento una tabla comparativa con ciertas características de tres dispositivos usados comúnmente para proyectos en donde se desea medir temperatura y humedad relativa, estos son: DHT11, DHT22 y LM35.

**Tabla 3. 5** *Características técnicas de sensores para medición de temperatura y humedad*

<b>CARACTERÍSTICAS</b>						
	<b>Comunicación</b>	<b>Rango de medición temperatura</b>	<b>Rango de medición Humedad Relativa</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Calibración</b>	<b>Costo</b>
<b>DHT11</b>	Digital (I2C)	(0 a 50 °C)	(20 a 90 %)	3 a 5 Vdc	No	\$5
<b>DHT22</b>	Digital (I2C)	(-40 a 80 °C)	(0 a 100%)	3,3 a 6 Vdc	No	\$10
<b>LM35</b>	Analógica	(0 a 100 °C)	No	4 a 30 Vdc	No	\$3

En el Anexo C se puede analizar a detenimiento la valoración de criterios de la matriz de la tabla 3.4, en base a las 3 alternativas de sensores presentadas en la tabla 3.5.

### **Conclusión:**

Una vez concluido con el proceso de valoración de criterios se obtiene como resultado la siguiente matriz.

**Tabla 3. 6** Conclusión de la evaluación de criterios para el sensor de temperatura y humedad

<b>Conclusiones</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Comunicación</b>	<b>Rango de Medición</b>	<b>Costo</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>DHT11</b>	0,03	0,11	0,08	0,06	0,08	0,35	<b>2</b>
<b>DHT22</b>	0,03	0,11	0,12	0,06	0,08	0,39	<b>1</b>
<b>LM35</b>	0,05	0,04	0,04	0,06	0,08	0,27	<b>3</b>

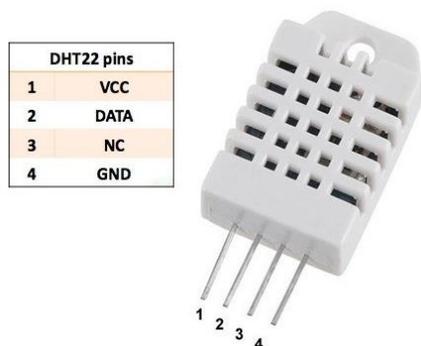
El sensor adecuado que se obtuvo de la evaluación de criterios es el DHT22, ya que este cumple con una comunicación digital (I2C) de fácil programación y está disponible en el mercado,

además dicho sensor puede medir las dos variables y consta de un solo módulo. Sin embargo, el sensor DHT11 también cumple con las características necesarias, pero el rango de medición de este no cumple con los requerimientos del sistema ya que en el invernadero en determinadas horas del día la humedad relativa supera el 90%.

**3.5.2.1 Características sensor DHT22.** El sensor de humedad y temperatura DHT22 es de buen rendimiento y bajo costo, este posee un termistor para medir el aire circundante y un sensor capacitivo para la humedad, además es muy sencillo de emplear cuando es usado en conjunto con una placa de programación Arduino.

Este sensor nos ofrece una precisión de medición de temperatura de  $< \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  y una precisión de medición de humedad de  $2\%RH$ , opera en un rango de voltaje de 3.3V a 6V, el rango de medición de temperatura es de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ , el rango de medición de humedad es de 0 a 100%, el tiempo de censado es mínimo 2s y la comunicación es digital (I2C) [19].

**3.5.2.2 Descripción de pines sensor DHT22.** En la figura 3.4 se puede observar los pines del sensor DHT22 tanto para su alimentación como para la interfaz digital (bidireccional).



**Figura 3. 4** Módulo DHT22 [19].

### 3.5.3 Selección de sensor de flujo

Para la selección adecuada del sensor de flujo o caudalímetro para la medición de consumo volumétrico de un líquido fue necesario tomar en cuenta ciertas características que este debe poseer como lo son: rango de operación de flujo (L/min), diámetro de la rosca externa y presión máxima de trabajo.

En la siguiente tabla, se muestra la matriz de evaluación de criterios para determinar el sensor adecuado.

**Tabla 3. 7** Matriz de evaluación de criterios para la selección del sensor de flujo

<b>Sensor de Flujo</b>							
<b>Criterio</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Comunicación</b>	<b>Rango de Medición</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Costo</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Dimensión</b>		1	0,5	0,5	1	4	<b>0,27</b>
<b>Comunicación</b>	0		0,5	0,5	0	2	<b>0,13</b>
<b>Rango de Medición</b>	0,5	0,5		0	0,5	2,5	<b>0,17</b>
<b>Disponibilidad</b>	0,5	0,5	1		1	4	<b>0,27</b>
<b>Costo</b>	0	1	0,5	0		2,5	<b>0,17</b>
					<b>SUMA</b>	15	1

La tabla 3.7 muestra los criterios de mayor importancia que hay que tener en cuenta para seleccionar el caudalímetro adecuado, siendo así que, las características más importantes son: las dimensiones del dispositivo y la disponibilidad del mismo en el mercado.

Por otra parte, en la tabla 3.8 se muestra las características de tres dispositivos que fueron evaluados para su selección.

**Tabla 3. 8** Características técnicas de sensores para medición de flujo

<b>CARACTERÍSTICAS</b>						
	<b>Comunicación</b>	<b>Rango de Medición de Flujo</b>	<b>Rosca Externa</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Presión de Trabajo</b>	<b>Costo</b>
<b>YF-S201</b>	Digital	(1 - 30 L/min)	1/2" NPS	5 - 18 V	1,75 Mpa	\$8
<b>FS-400<sup>a</sup></b>	Digital	(1 - 60 L/min)	1" NPS	5 - 24 V	1,2 Mpa	\$20
<b>YF-DN50</b>	Digital	(10 - 200 L/min)	2" NPS	5 - 18 V	1,75 MPa	\$65

La evaluación de opciones y los criterios tomados en cuenta con base a los tres dispositivos que se consideraron se encuentran en el Anexo E.

### **Conclusión:**

**Tabla 3. 9** Conclusión de la evaluación de criterios del sensor de flujo

<b>Conclusiones</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Comunicación</b>	<b>Rango de Medición</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Costo</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>YF-S201</b>	0,04	0,04	0,04	0,11	0,07	0,31	<b>2</b>
<b>FS-400A</b>	0,11	0,04	0,04	0,11	0,07	0,38	<b>1</b>
<b>YF-DN50</b>	0,11	0,04	0,08	0,04	0,03	0,31	<b>2</b>

La mejor opción resultante de la evaluación de criterios es el sensor de modelo FS-400A. Este sensor cumple con las dos características de mayor importancia antes mencionadas, la dimensión y la disponibilidad. La dimensión es importante porque el sensor seleccionado tiene un diámetro de rosca igual al de la tubería instalada en el sistema de nebulización, esto beneficioso

para el sistema porque no perderá presión. Por otra parte, este dispositivo se encuentra disponible fácilmente en una tienda física o electrónica de la ciudad, además su costo se encuentra intermedio de entre las dos opciones restantes.

**3.5.3.1 Características sensor FS-400A.** El sensor de caudal FS-400A es práctico para ingresar al mundo de la domótica, puede ser empleado para la medición de flujo de agua o de otros líquidos de baja viscosidad, también está diseñado para poderse acoplar a tuberías de 1" de diámetro.

Este sensor está basado en el efecto Hall, es electrónico de tipo turbina, además es compatible con diferentes sistemas digitales como: Arduino, Raspberry Pi, PLC y Pic, rango de flujo de 1 – 60 L/min y presión máxima a la que puede trabajar 1.2 Mpa [19].

**3.5.3.2 Descripción de pines sensor FS-400A.** En la figura 3.5 se muestra el dispositivo seleccionado para elaborar este proyecto. El sensor incorpora tres cables: negro (GND), rojo (VCC-5 VDC) y amarillo (señal digital) [19].



**Figura 3. 5 Sensor de flujo FS-400A [19].**

### **3.5.4 Selección de electroválvulas**

Una de las partes más importantes que conforman el sistema de control automático de VPD son las electroválvulas, estas van a reemplazar a las válvulas manuales que se encuentran

actualmente en el sistema, es por eso por lo que, para la selección de estas se ha tomado en cuenta ciertos criterios que deben poseer como: dimensiones, rango de operación de presión y alimentación (voltaje).

En la tabla 3.10 se puede observar los criterios de evaluación para la selección del mejor dispositivo.

**Tabla 3. 10** *Matriz de evaluación de criterios para selección de electroválvulas*

<b>Electroválvula</b>							
<b>Criterio</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Consumo Energético</b>	<b>Presión de Trabajo</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Costo</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Dimensión</b>		1	0,5	0,5	1	4	<b>0,27</b>
<b>Consumo Energético</b>	0		0	0,5	0,5	2	<b>0,13</b>
<b>Presión de Trabajo</b>	0,5	1		1	0,5	4	<b>0,27</b>
<b>Disponibilidad</b>	0,5	0,5	0		0,5	2,5	<b>0,17</b>
<b>Costo</b>	0	0,5	0,5	0,5		2,5	<b>0,17</b>
					<b>SUMA</b>	15	1

La tabla 3.10 muestra los criterios de mayor importancia que hay que tener en cuenta para seleccionar la mejor alternativa de entre las válvulas solenoide, en este caso los criterios más importantes son: las dimensiones del artefacto y la presión máxima de trabajo de este. Sin embargo, también hay que tomar en cuenta la disponibilidad ya que las válvulas que trabajan con corriente AC son algo escasas.

A continuación, en la tabla 3.11 se muestra las características técnicas que poseen los dispositivos que fueron evaluados para su selección.

**Tabla 3. 11** Características técnicas de electroválvulas

<b>CARACTERÍSTICAS</b>					
	<b>Voltaje de trabajo</b>	<b>Amperaje de trabajo</b>	<b>Conexión Rosca</b>	<b>Presión de Trabajo Máxima</b>	<b>Costo</b>
<b>Hunter PGV-100-JTG-B</b>	24 VAC	370 mA	1" NPS	1,25 Mpa	\$18
<b>Válvula Solenoide 1/2"</b>	12 VDC	600 mA	1/2" NPS	0,8 Mpa	\$14
<b>CEPEX S390T</b>	24 VAC	700 mA	1" NPS	1,5 MPa	\$33

Las matrices resultantes de la evaluación de opciones y los criterios tomados en cuenta con base a los detalles técnicos de los tres dispositivos que se consideraron se encuentran en el Anexo F.

**Conclusión:**

**Tabla 3. 12** Conclusión de la evaluación de criterios de electroválvulas

<b>Conclusiones</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Consumo Energético</b>	<b>Presión de Trabajo</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Costo</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Hunter PGV-100-JTG-B</b>	0,11	0,07	0,09	0,06	0,06	0,38	<b>1</b>
<b>Válvula Solenoide 1/2"</b>	0,04	0,03	0,04	0,06	0,08	0,26	<b>3</b>
<b>CEPEX S390T</b>	0,11	0,03	0,13	0,06	0,03	0,36	<b>2</b>

El artefacto que dispone de mejores prestaciones técnicas para reemplazar las válvulas solenoide manuales es Hunter PGV-100-JTG-B, porque posee una rosca de diámetro de 1" NPS,

de esta manera se acopla exactamente al sistema de tuberías existente en el invernadero. En cuanto al consumo de energía, esta alternativa es la que obtuvo mayor ponderación ya que consume menos amperios que las otras dos opciones. Por otra parte, la bomba de agua puede suministrar hasta 1 MPa de presión y la electroválvula elegida soporta una presión máxima de trabajo de 1.25 MPa.

**3.5.4.1 Características electroválvula Hunter PGV-100-JTG-B.** El dispositivo Hunter PGV-100-JTG-B está fabricado en plástico PVC, soporta una presión de trabajo máxima de hasta 1.25 MPa, para evitar pérdidas incorpora un pistón cautivo, está equipada de un solenoide de 24 VAC, además es de fácil drenaje por su tapa roscada y para acceder a su mecanismo interno no hace falta una ninguna herramienta [20].

**3.5.4.2 Descripción de electroválvula Hunter PGV-100-JTG-B.** En la figura 3.6 se puede observar el dispositivo seleccionado con el cual serán reemplazadas las válvulas manuales del sistema de nebulización. El artefacto incorpora solo dos cables de alimentación de corriente alterna.



**Figura 3. 6** Válvula eléctrica Hunter [20].

### 3.5.5 Selección de pantalla

Finalmente, el último componente en ser seleccionado es la pantalla, esta cumplirá la función de indicar los valores de las variables temperatura, humedad y Déficit de Presión de Vapor (VPD), es por eso por lo que se ha tomado en cuenta criterios como: dimensiones, resolución, comunicación y alimentación.

A continuación, se muestra la matriz de criterios ponderados para determinar los aspectos más importantes que debe poseer el dispositivo mencionado.

**Tabla 3. 13** Matriz de evaluación de criterios para selección de pantalla

<b>Pantalla</b>							
<b>Criterio</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Comunicación</b>	<b>Resolución</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Costo</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Dimensión</b>		1	0,5	0,5	1	4	<b>0,27</b>
<b>Comunicación</b>	0		0,5	0,5	0,5	2,5	<b>0,17</b>
<b>Resolución</b>	0,5	0,5		1	0,5	3,5	<b>0,23</b>
<b>Disponibilidad</b>	0,5	0,5	0		1	3	<b>0,20</b>
<b>Costo</b>	0	0,5	0,5	0		2	<b>0,13</b>
					<b>SUMA</b>	15	1

Una vez obtenida la ponderación de criterios a tomar en cuenta para la selección de la pantalla, puede concluirse que, hay que considerar las dimensiones de la pantalla y la resolución ya que en el sistema se quiere mostrar el valor de tres variables.

En la tabla 3.14 se encuentran las características técnicas que disponen las tres alternativas tomadas en cuentas para su evaluación.

**Tabla 3. 14** Características técnicas de pantallas

<b>CARACTERÍSTICAS</b>					
	<b>Dimensión</b>	<b>Comunicación</b>	<b>Resolución</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Costo</b>
<b>LCD 16x2</b>	87x32x13 mm	Digital (I2C)	20x2 caracteres	3,3 - 5 V	\$8
<b>LCD 16x4</b>	98x60x14 mm	Digital (I2C)	20x4 caracteres	5 V	\$15
<b>OLED 128x64</b>	24x27x4,1 mm	Digital (I2C)	128x64 pixeles	3,3 - 5 V	\$8

**Conclusión:**

**Tabla 3. 15** Conclusión de la evaluación de criterios de pantallas

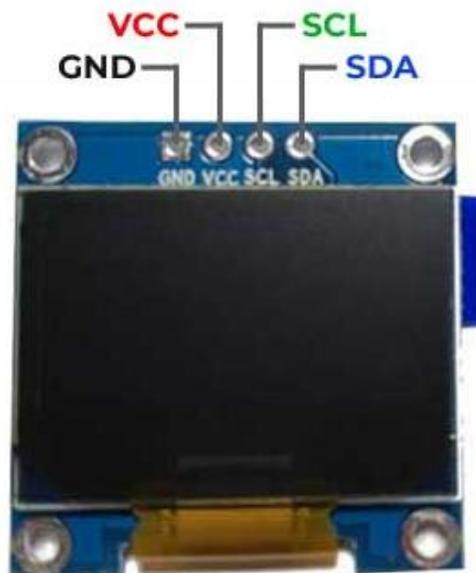
<b>Conclusiones</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Comunicación</b>	<b>Resolución</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Costo</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>LCD 16x2</b>	0,04	0,06	0,04	0,07	0,06	0,26	<b>3</b>
<b>LCD 16x4</b>	0,11	0,06	0,08	0,07	0,02	0,33	<b>2</b>
<b>OLED 128x64</b>	0,11	0,06	0,12	0,07	0,06	0,41	<b>1</b>

Dadas las características técnicas de las pantallas existentes en el mercado que podrían satisfacer la necesidad del sistema, se ha concluido que el modelo OLED 128x64 es la mejor alternativa, por poseer una mejor ponderación en los aspectos dimensión y resolución, además por tener un costo relativamente bajo.

**3.5.5.1 Características de pantalla OLED 128x64.** Este dispositivo se caracteriza por

poseer un gran contraste, una alta calidad de imagen y un consumo de energía mínimo, su resolución es de 128x64 píxeles, no necesita de retroiluminación por ser de tipo OLED, la comunicación se la puede efectuar por SPI o I2C, además posee un driver SSD1306 con una librería lista para usarse en Arduino. Esta librería permite al usuario mostrar texto, líneas, círculos, rectángulos y mapas de bits [19].

**3.5.5.2 Descripción de pines pantalla OLED 128x64.** En la figura 3.7 se puede observar los pines que dispone el dispositivo, ya sea para su alimentación como también para la comunicación mediante puerto I2C o SPI con la unidad de control.



**Figura 3. 7 Pantalla OLED 128x64 [21].**

### **3.5.6 Gabinete para integración de componentes**

Para el ensamble de las partes de control y potencia del módulo se optó por adquirir un gabinete prefabricado que cumpla con los requerimientos del sistema como lo son: dimensiones y ubicación. La ubicación es de gran importancia ya que el gabinete se ubicará fuera del invernadero y el mismo debe poseer la norma adecuada para resistir a la corrosión, polvo y humedad.

El gabinete seleccionado posee las siguientes dimensiones 30x40x20 cm, además está construido mediante la norma IEC 60529 que protege contra el acceso a partes electrificadas por parte de personas, herramientas, polvo y humedad.



**Figura 3. 8 Gabinete metálico [22].**

### **3.6 Diseño de controlador ON-OFF por histéresis**

Al analizar el amplio rango de VPD donde se podían encontrar las plantas de tomate libres de estrés hídrico, se decidió optar por el método de control ON-OFF por histéresis, que podría funcionar de manera adecuada, porque reduce el número de conmutaciones del sistema. De hecho, un control más sofisticado, como el PID, también puede mejorar el rendimiento del sistema y priorizar las conmutaciones, pero existe un problema: el sistema de nebulización instalado actualmente funciona con la presión máxima que entrega la bomba y no funcionaría adecuadamente con este tipo de control ya que los nebulizadores no se activan a presiones bajas. En la figura 3.9 se puede ver el esquema de control de este sistema y en la figura 3.10 una gráfica para determinar mediante cálculos sencillos la histéresis que posee la planta.

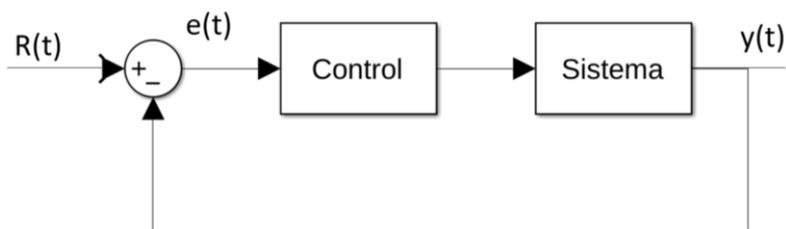


Figura 3. 9 Modelo de control de la planta

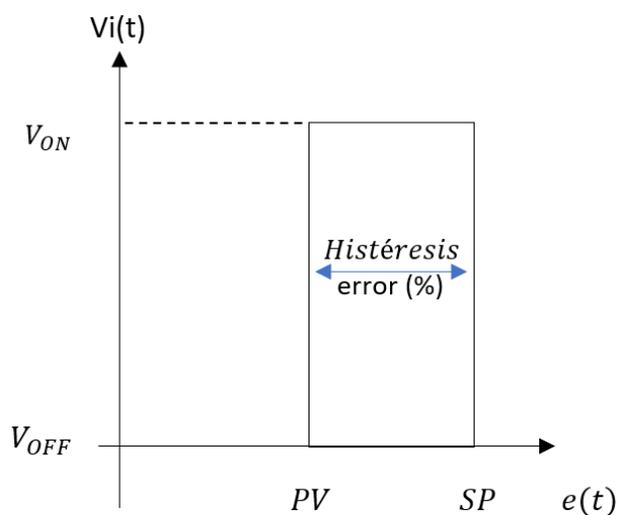


Figura 3. 10 Conmutación con histéresis

De la figura 3.10 se puede determinar la ecuación para definir la histéresis:

$$\mathbf{error(\%) = SP - PV} \quad \mathbf{Ec. (4)}$$

En donde:

$$\mathbf{SP = VPD Ideal}$$

$$\mathbf{PV = VPD M\acute{inimo}$$

$$\mathbf{e(t) = VPD Actual}$$

Por lo tanto:

$$\mathit{error}(\%) = 1\text{KPa} - 0.45\text{KPa}$$

$$\mathit{error}(\%) = 0.55\text{KPa}$$

$$Vi(t) = \begin{cases} V_{ON} & \text{Sí } e(t) > SP \\ Vi(t) & \text{Sí } PV \leq e(t) \leq SP \\ V_{OFF} & \text{Sí } e(t) < PV \end{cases}$$

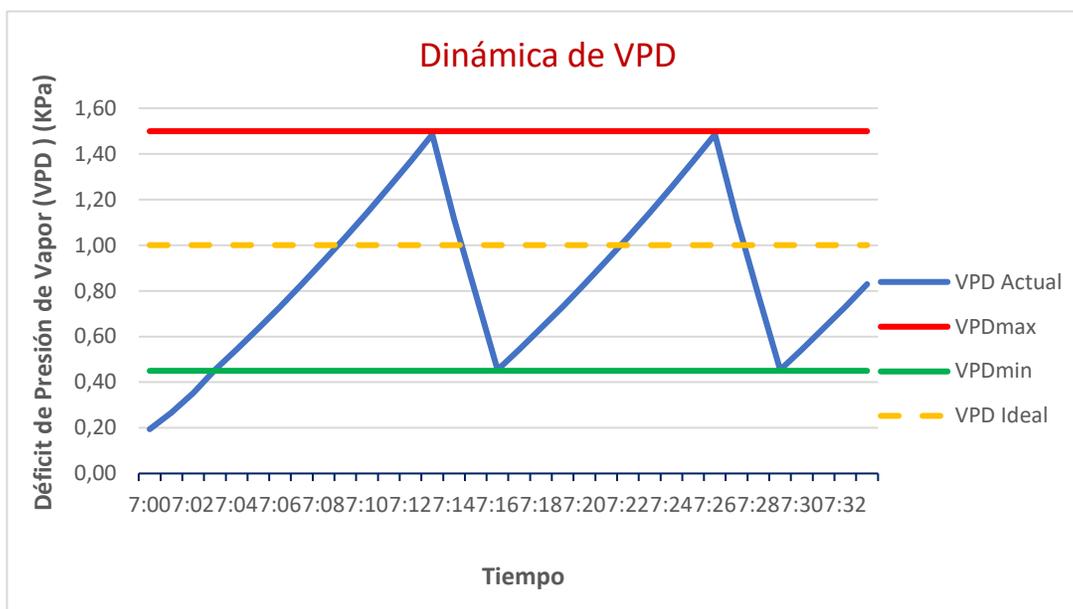
La histéresis que posee el sistema para realizar el control total es de 0.55 kPa, lo que significa que incluso si el VPD dentro del invernadero es menor que SP (SET POINT), el controlador no tomará ninguna acción, y cuando lo exceda, toma la decisión de activar el sistema de nebulización durante un tiempo determinado, mediante una ecuación diseñada que se describe en la siguiente sección.

### ***3.6.1 Diseño de ecuación para determinar tiempo de nebulización***

En la Figura 3.11 se puede ver el comportamiento obtenido al realizar algunas pruebas activando manualmente el sistema nebulizador. Tiene un mínimo y un máximo de verde y rojo respectivamente, y se espera que el VPD Actual permanezca dentro de estos límites para garantizar un control adecuado. Por otro lado, la línea entrecortada de color amarilla muestra el valor de VPD ideal para el crecimiento óptimo de la planta de tomate, pero en este caso este valor también sirve como un punto fijo (SET POINT) para hacer los cálculos necesarios para desarrollar un sistema de control ON-OFF por histéresis.

En las pruebas realizadas se determinó que cuando el VPD Actual era superior a 1,5 KPa, 10 segundos de rociar agua en el interior del invernadero eran suficientes para reducir y evitar que la variable de retorno superara el máximo nuevamente durante aproximadamente 10 minutos. De igual forma, cuando el VPD Actual ha superado el SET POINT, son necesarios 4 segundos de atomizar agua para que la variable disminuya su valor y no baje más del mínimo. Además, en la

misma figura, se puede ver que después de activar el sistema, el valor de VPD disminuirá en 2-3 minutos, pero para volver a subir y alcanzar el máximo permitido, toma hasta 10 minutos.



**Figura 3. 11 Comportamiento de VPD en prueba manual**

**3.6.1.1 Ecuación de control de tiempo de activación del sistema nebulizador.** Mediante el software Excel se ha generado una gráfica con los valores obtenidos al realizar las pruebas, y los puntos que se muestran en la Fig. 3.12 se utilizarán para determinar la ecuación que se encargará de mantener el VPD dentro del invernadero fluctuando en los parámetros requeridos.



**Figura 3. 12 Gráfica para determinar ecuación de control**

A continuación, se determina la ecuación de la recta y será expresada de la forma  $y = ax + b$ .

$$y - y_1 = m(x - x_1) \quad \text{Ec. (5)}$$

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \text{Ec. (6)}$$

$$m = \frac{10 - 4}{1.5 - 1}$$

$$m = 12$$

$$y - 4 = 12(x - 1)$$

$$y = 12x - 12 + 4$$

$$y = 12x - 8$$

En donde:

$x$  = Déficit de Presión de Vapor dentro del invernadero (VPD Actual)

y = Tiempo de nebulización

### 3.7 Diseño de tarjetas PCB

En cuanto al diseño y construcción de placas de circuito impreso, se basa en la norma IPC 2221B, este estándar especifica los requisitos para el diseño de una placa PCB, y también define los principios de buen montaje y ensamble de componentes. Superficies tipo THT, pasantes, SMT, entre otros.

El diseño de las tarjetas PCB se lo ha realizado mediante el software EAGLE, y su mecanizado mediante la máquina cirQoid CNC del laboratorio de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Para el proyecto fueron necesarias tres tarjetas: una para la fuente de alimentación de los componentes electrónicos, otra para acoplar botoneras con entradas digitales de la unidad de control y una que va dentro del invernadero para alimentación y comunicación del sensor DHT22. El resto de los diseños de las tarjetas se encuentra en el Anexo H.

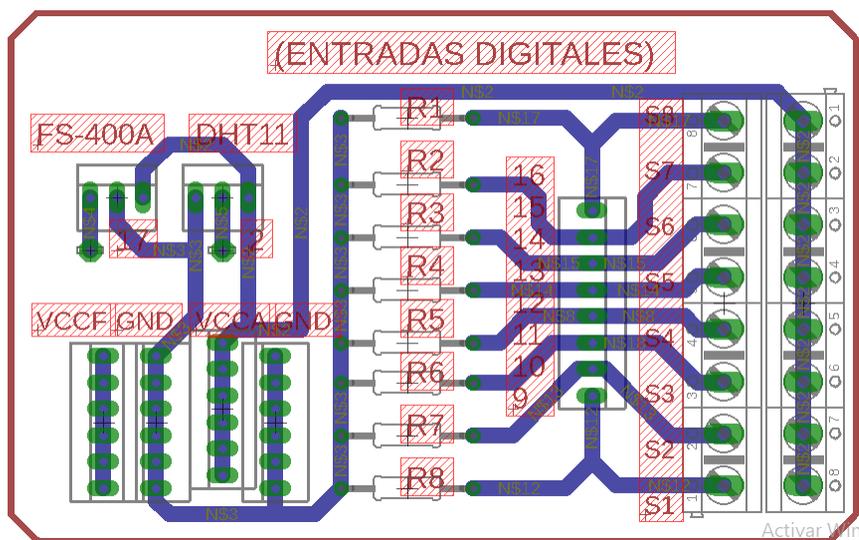


Figura 3. 13 Diseño del circuito de entradas digitales

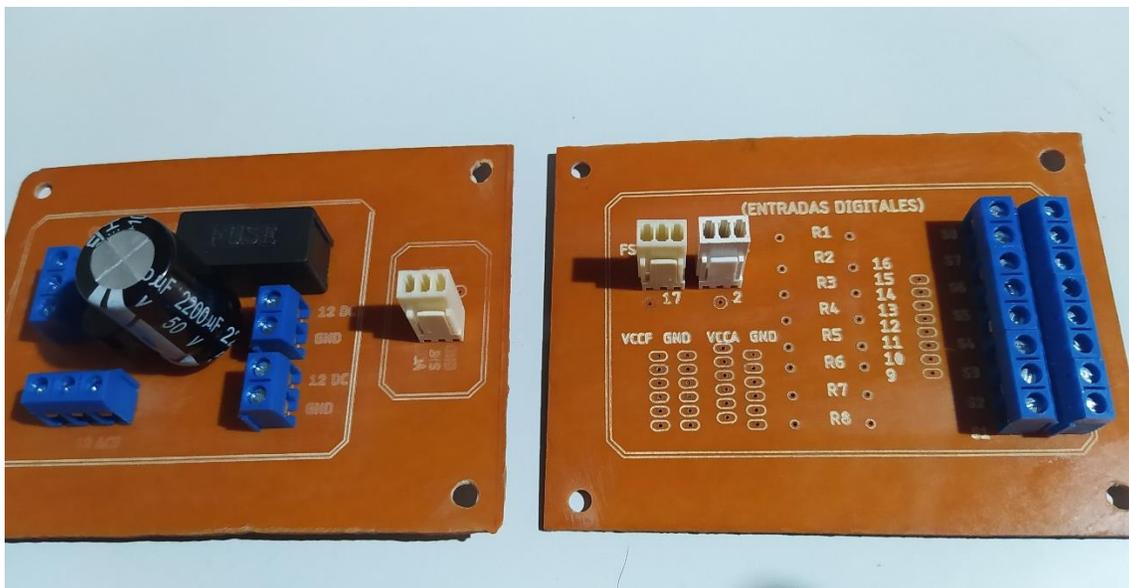


Figura 3. 14 Tarjetas mecanizadas

## **4. Integración e implementación del sistema**

En este capítulo se detalla el proceso seguido para la implementación del sistema en un solo módulo, así como también la integración y programación de los diferentes dispositivos seleccionados en el capítulo 3, la conexión de los elementos de arranque y protección para la bomba de agua y la instalación del módulo en el invernadero.

### **4.1 Programación**

Esta sección está destinada al desarrollo de Pseudocódigos para realizar una adecuada y eficiente programación. En la figura 4.1 se puede apreciar el diagrama de flujo general que regirá el sistema de control para un correcto funcionamiento, en donde constan también los diferentes algoritmos para la operación del sistema en los diferentes modos, como son: automático y manual.

### 4.1.1 Diagrama de flujo general del sistema

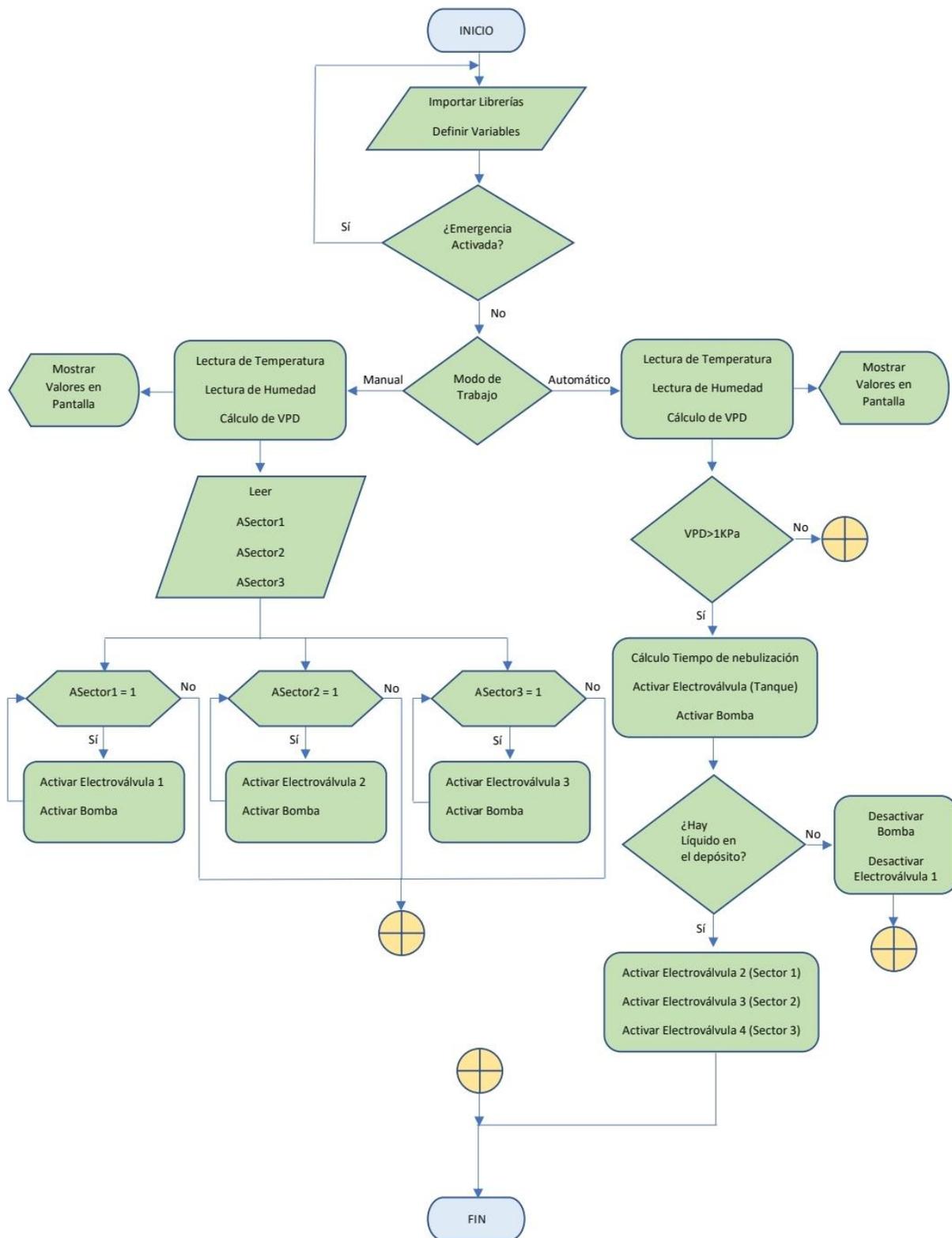


Figura 4. 1 Diagrama de flujo del sistema

#### ***4.1.2 Algoritmo 1: Programa principal***

A continuación, se muestra el algoritmo que rige el orden de ejecución del programa general del sistema de control mostrado en el diagrama de flujo (Figura 4.1).

**Inicio**

**Paso 1:** ¿Se encuentra activo el paro de emergencia?

**Paso 2:** Ejecutar algoritmo 2

**Paso 3:** Ejecutar algoritmo 3

**Paso 4:** Ejecutar algoritmo 4

**Fin**

#### ***4.1.3 Algoritmo 2: Pantalla***

El algoritmo posibilita inicializar la pantalla OLED que integra el módulo. El pseudocódigo a detalle se lo puede revisar en el Anexo I.

**Inicio**

**Paso 1:** ¿Se encuentra activo paro de emergencia?

**Paso 2:** Si el paro de emergencia no se encuentra activo ejecuta el algoritmo 3 o algoritmo 4, caso contrario se indica un mensaje de error

**Paso 3:** Mostrar los datos tomados por los sensores en pantalla

**Fin**

#### ***4.1.4 Algoritmo 3: Modo Automático***

El algoritmo permite el uso de sistema en modo automático, es decir, la activación y desactivación del sistema de nebulización dependerá de los valores que midan los sensores y de la programación que tiene la tarjeta de control. En el Anexo J se puede revisar a detalle el pseudocódigo.

**Inicio**

**Paso 1:** Leer datos de los sensores de humedad relativa y temperatura

**Paso 2:** Calcular VPD

**Paso 3:** Ejecutar algoritmo 2

**Paso 3:** Mientras  $VPD < 1\text{KPa}$  no activa el sistema de nebulización

**Paso 4:** Si  $VPD > 1\text{KPa}$  activa electroválvula (Tanque)

**Paso 5:** Si hay caudal continúa el proceso caso contrario imprime error

**Paso 6:** Activar electroválvula 1 (Sector 1)

**Paso 7:** Activar electroválvula 2 (Sector 2)

**Paso 8:** Activar electroválvula 3 (Sector 3)

**Fin****4.1.5 Algoritmo 4: Modo Manual**

El algoritmo permite el uso de sistema en modo manual, es decir, la activación y desactivación del sistema de nebulización dependerá del usuario. En el Anexo K se puede revisar a detalle el pseudocódigo.

**Inicio**

**Paso 1:** Leer datos de los sensores de humedad relativa y temperatura

**Paso 2:** Calcular VPD

**Paso 3:** Ejecutar algoritmo 2

**Paso 3:** Mientras el botón  $A_{Sector1} = 1$ , activar electroválvula 1 (Sector 1)

**Paso 4:** Mientras el botón  $A_{Sector2} = 1$ , activar electroválvula 2 (Sector 2)

**Paso 5:** Mientras el botón  $A_{Sector3} = 1$ , activar electroválvula 3 (Sector 3)

**Fin**

## 4.2 Esquema de conexión de componentes electrónicos

En esta sección se muestra un dibujo esquemático con los diferentes sensores y actuadores que formaran la parte de control del proyecto. Estos elementos serán los encargados de monitorear y controlar el sistema, así mismo, desactivarán las funciones en caso de falla de un elemento.

Diagrama de potencia del sistema ver el Anexo L.

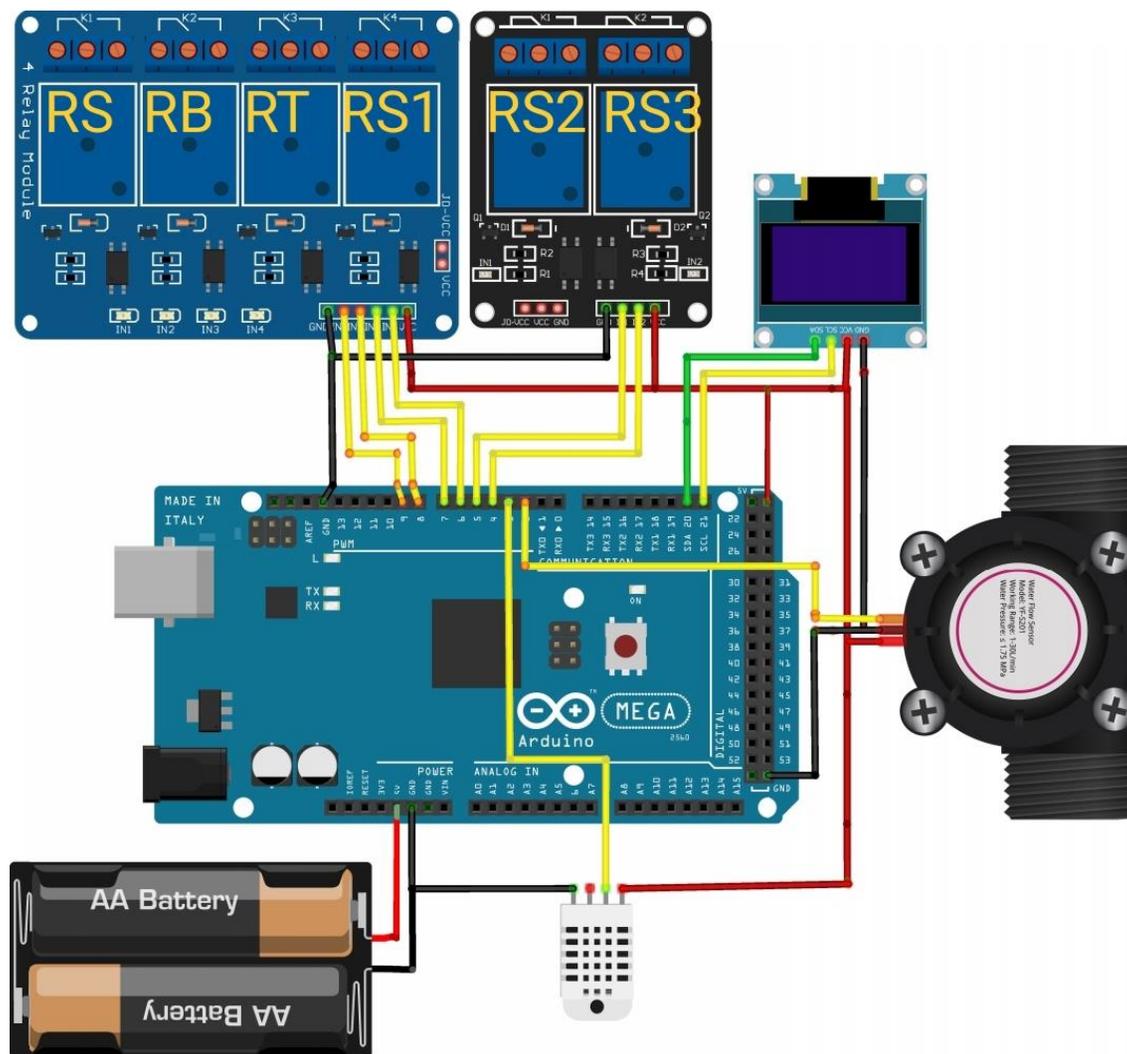


Figura 4. 2 Dibujo esquemático de conexiones del sistema

### 4.3 Instauración de la red eléctrica y elementos manuales por electrónicos

Se implemento una red eléctrica de 110V para alimentar la bomba y sus componentes de protección, además esta red alimenta a un transformador que suministra energía a las electroválvulas y contactor que activa la bomba.

Por otra parte, la corriente del transformador también es transformada de alterna a directa para la alimentación de energía de la unidad de control, sensores y actuadores.

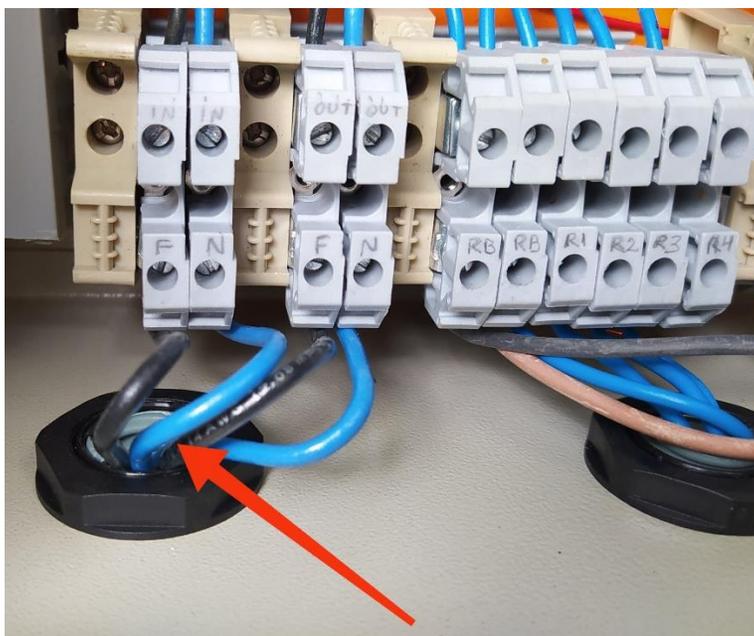


Figura 4. 3 Cables de red eléctrica 110V

#### 4.3.1 Implementación de electroválvulas

Para la implementación de las electroválvulas se desmontó el sistema de acoples junto con las válvulas manuales para reemplazarlas por las eléctricas, una vez desmontado se colocó cinta teflón sobre las roscas y sellador Permatex sobre la cinta para asegurar que no existan fugas de agua y finalmente se pasó por una manguera todos los cables que deben ir al tablero de control para evitar el contacto con las personas o el medio.



**Figura 4. 4** Desmontaje de válvulas manuales



**Figura 4. 5** Sistema de electroválvulas instalado

### ***4.3.2 Implementación del sensor de caudal***

Para la integración del caudalímetro a la red de tubería se cortó un tramo de 120mm antes de la entrada de líquido a la bomba, esto con la finalidad de medir el flujo que circula y en caso de no existir caudal desactivar automáticamente la bomba para evitar daños en la misma.



**Figura 4. 6 Instalación de sensor FS-400A**

### ***4.3.3 Implementación del sensor de humedad y temperatura***

El sensor DHT22 fue instalado dentro del invernadero a aproximadamente 10m de distancia del panel de control, fue ubicado en el centro del área de cultivo y a una altura de 2m.



**Figura 4. 7 Instalación del sensor DHT22**

#### **4.4 Integración de componentes en el gabinete**

Una vez realizados los cambios al sistema manual por dispositivos que pueden ser controlados eléctricamente, adaptado sensores para realizar a cabo el control de VPD y evitar fallos en el sistema, se procedió a ensamblarlos dentro de un gabinete. Este consta de dos partes: elementos de potencia y de control.

##### **4.4.1 Integración de elementos de potencia**

El sistema de potencia consta de 4 dispositivos que cumplen dos funciones, protegen al motor contra sobrecargas o cortocircuitos, como también a las personas en caso de entrar en contacto con el circuito eléctrico.

- 1. Interruptor magnetotérmico:** este dispositivo es capaz de interrumpir el paso de la corriente eléctrica en un circuito cuando el valor máximo de corriente es sobrepasado.

Detalles técnicos (Anexo N).

Para determinar el magnetotérmico adecuado fue necesario hacer una sumatoria de corrientes que consumen las cargas que componen el módulo. El resultado obtenido fue de entre 8 a 9A de consumo. Por lo tanto, el interruptor seleccionado tiene una intensidad de corte de 10A.

- 2. Interruptor diferencial:** este dispositivo electromagnético protege a las personas cuando entran en contacto directo con zonas del circuito.

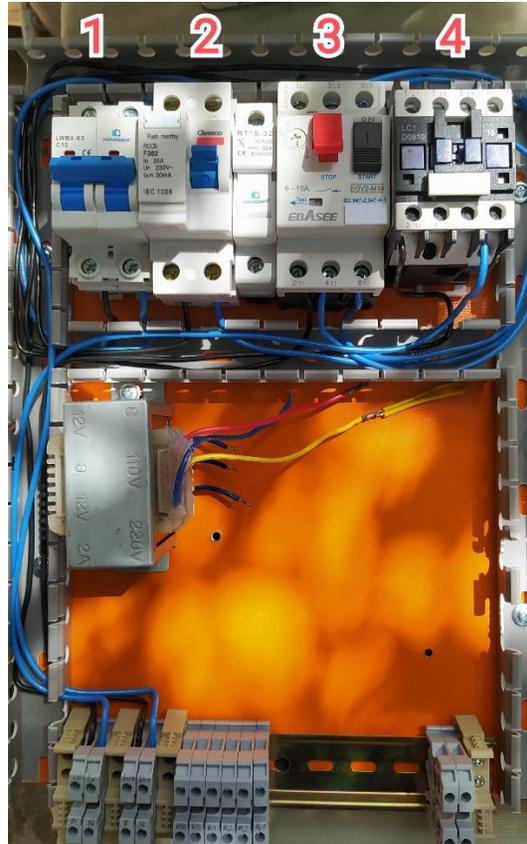
El interruptor fue seleccionado en base a la corriente nominal de la bomba más la corriente que consume el sistema de control, la suma de estos dio como resultado de 8 a 9A. Por lo tanto, el breaker seleccionado posee un polo y un umbral de disparo de 25mA. Detalles técnicos (Anexo O).

- 3. Guardamotor:** el guardamotor protege a la bomba contra cortocircuitos y sobrecargas. Al disponer de un interruptor puede ser arrancado manualmente.

La corriente nominal de la bomba es de 7A, por ello el dispositivo seleccionado trabaja en un rango de corriente nominal de 6 a 10A. Detalles técnicos (Anexo P).

- 4. Contactor:** este elemento puede ser accionado como un interruptor por medio de un relé para permitir el paso de la corriente.

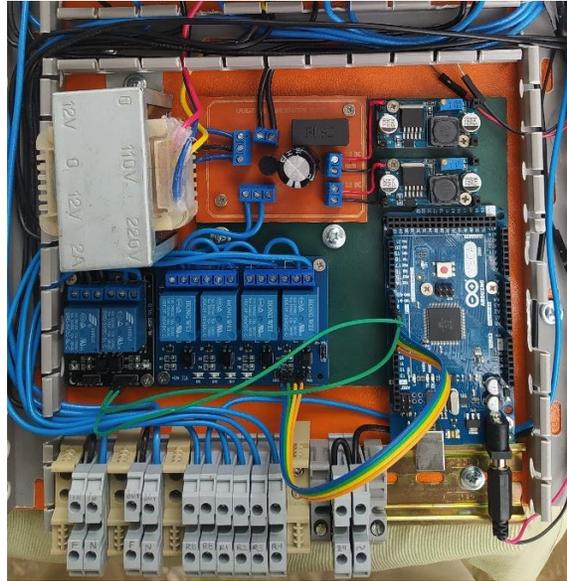
Al igual que el anterior dispositivo el contactor fue seleccionado en base a la corriente nominal del motor y a la bobina mediante la cual se activa el mismo. Este dispositivo integra una bobina que se excita con 24 VAC.



**Figura 4. 8** Ensamble del sistema de potencia

#### ***4.4.2 Integración de elementos de control***

Una vez completada la integración del sistema de potencia en el gabinete metálico, se procede a la integración de los componentes electrónicos seleccionados en el Capítulo 3. La tarjeta de control, los actuadores que en este caso son relés, la fuente de alimentación, el rectificador de onda completa y los reguladores de voltaje descendente DC-DC LM2596 son sujetos en una base, que, a su vez se encuentra acoplada al gabinete.



**Figura 4. 9 Ensamble sistema de control**

#### ***4.4.3 Instalación y cableado de botoneras en el tablero***

El montaje de los botones y posicionadores 2 y 3 en el panel de control es fundamental para que el usuario final pueda operar el sistema de control VPD de manera segura, sin riesgo de descarga eléctrica al abrir la tapa del gabinete.



Figura 4. 10 Cableado de botones y selectores



Figura 4. 11 Vista externa del tablero de control

#### 4.5 Instalación del sistema

Los sistemas de potencia y control están instalados dentro del gabinete y se agregan selectores, botones y luces indicadoras para una interfaz fácil de usar (Fig. 4.14). El gabinete se instala en una columna ubicada a dos metros de distancia de la entrada al invernadero y a 170 cm de altura. Diagrama esquemático del invernadero (Fig. 3.1).

Finalmente, el sistema de control automático de VPD está listo para funcionar y luego se puede calibrar de acuerdo con las necesidades del usuario si es necesario.



Figura 4. 12 Interfaz de usuario

## 5. Resultados del sistema de control de VPD

### 5.1 Curva dinámica de VPD con el sistema puesto en marcha vs curva antes de instalar el sistema

En la Figura 5.1, se puede observar la primera curva obtenida al utilizar el sistema de control VPD en modo automático, se puede ver que el método elegido (control de retardo ON-OFF) funciona correctamente, la presión diferencial siempre fluctúa entre los límites recomendados para plantas de tomates.

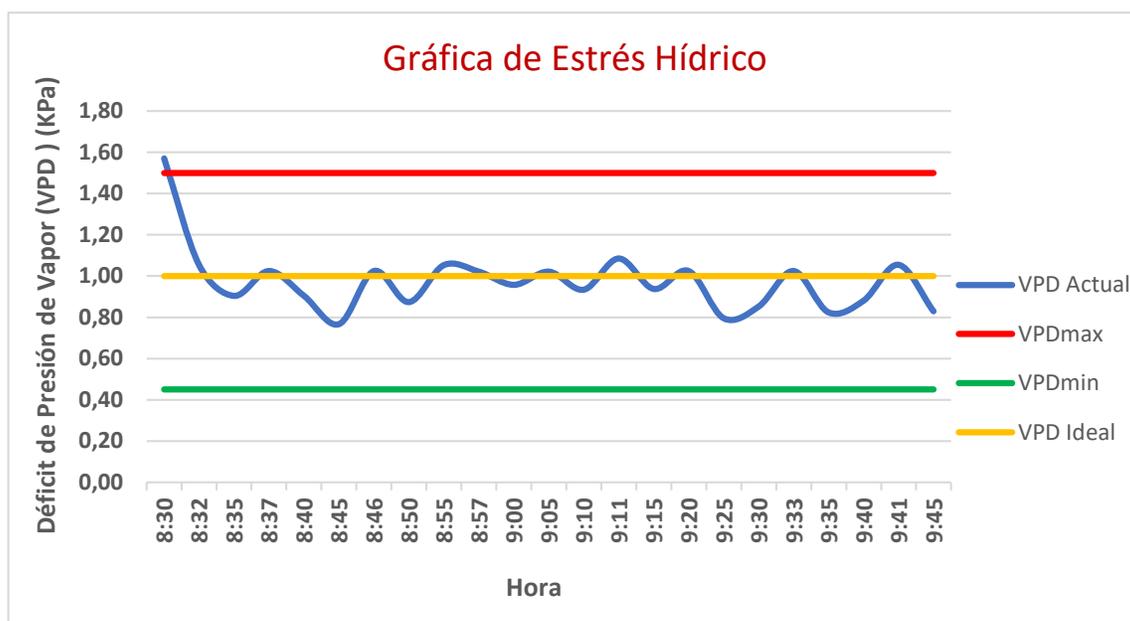


Figura 5. 1 Gráfica de VPD con el sistema en funcionamiento

A primera vista, se puede ver que los valores de la variable controlada han descendido fuertemente de la curva tomada antes de instalar el sistema (Fig. 5.2), para permanecer dentro del rango deseado.

La curva de la Fig. 5.2 muestra el comportamiento del VPD antes de utilizar el controlador. Previo a esto, la presión diferencial excedía 4 veces el punto VPD ideal. Sin embargo, los ajustes en el software del controlador son necesarios para mejorar el tiempo de muestreo y reducir el

número de conmutaciones para prolongar la vida útil del actuador.

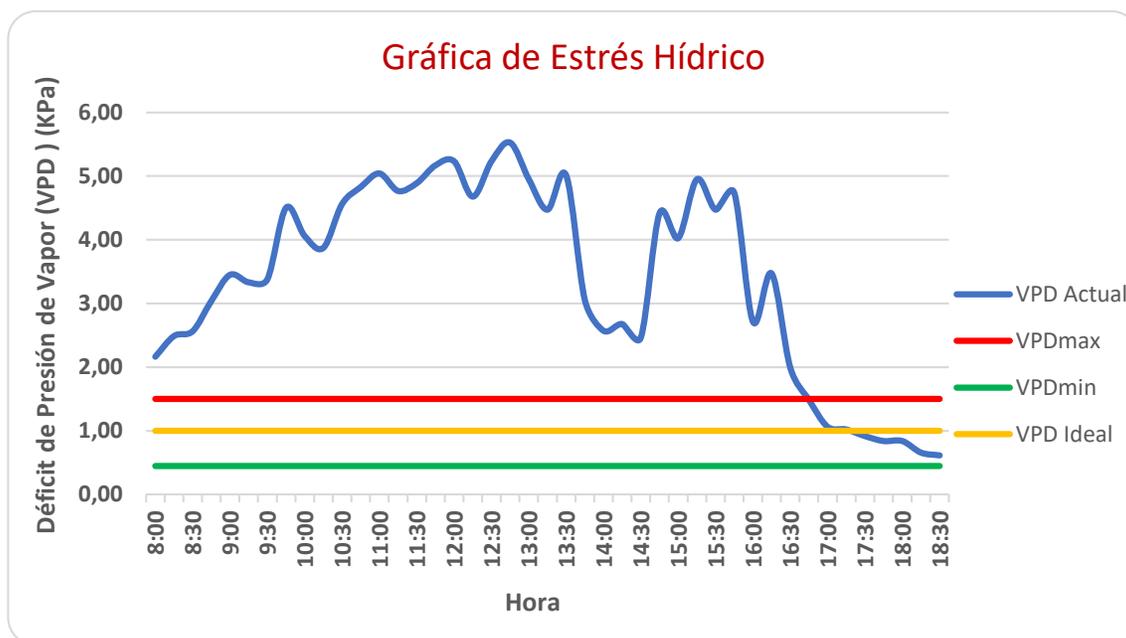


Figura 5. 2 Gráfica de VPD antes de instalar el sistema

## 5.2 Ajustes de parámetros de control

Se requiere un ajuste para mejorar el rendimiento de la curva VPD a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos en la Fig. 5.1 indican que el sistema implementado controla efectivamente la variable, sin embargo, en el momento del muestreo, el sistema se encendió / apagó 11 veces en una hora. Esto es perjudicial para los actuadores porque la vida útil es corta. Es por eso por lo que se realizaron nuevas pruebas funcionales, aumentando el tiempo de atomización a 13 y 14 segundos, para reducir el número de activaciones de la bomba. A continuación, se muestran los resultados.



Figura 5. 3 Gráfica de VPD en pruebas de sistema

Al aumentar el tiempo de disolución del agua, se obtiene que la variable controlada tarda hasta 6 minutos más en igualar el SET POINT, pudiendo reducir en 3 veces el número de conmutaciones por hora. Entonces, una vez que se realizan estos cambios, el ciclo de vida de la válvula solenoide tiene prioridad. Sin embargo, se tomó la decisión de aumentar la histéresis y tomar el VPD máximo como línea de referencia para el punto de consigna, proporcionando así una mayor optimización.

### 5.3 Determinación de la curva optima de VPD vs Tiempo

Tomando un nuevo punto de consigna, la dinámica del VPD en el invernadero fluctuó dentro del rango requerido (Figura 5.4). De igual forma, al haber aumentado la histéresis, no hay necesidad de cambiar el diseño de la ecuación que regula la bomba en cuanto a tiempos de activación, ya que, si se rocía agua por más de 10 segundos, el follaje se empieza a mojar. Aunque no se ha comprobado que esto tiene un efecto en él, lo mejor es evitar que el agua entre en contacto con la planta. Como resultado, el sistema se adapta a los requisitos del usuario y se optimiza para

lograr los beneficios en cuanto al ciclo de vida de los actuadores.

Modificación de histéresis, en donde:

$$SP = VPD \text{ Máximo}$$

$$PV = VPD \text{ Mínimo}$$

Por lo tanto:

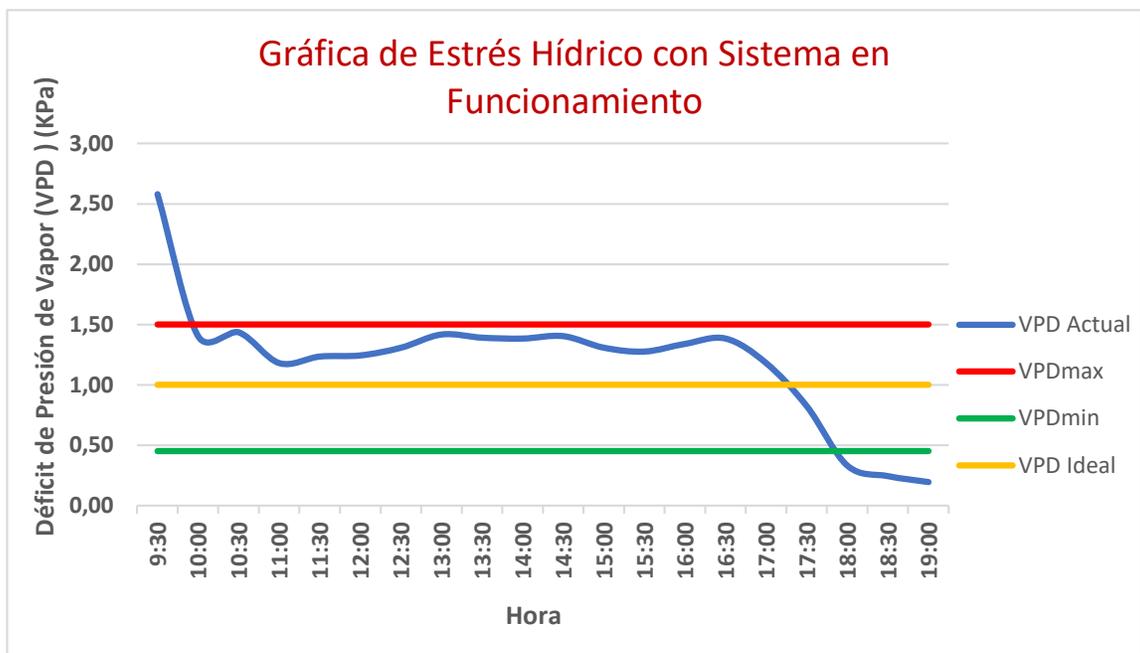
$$error(\%) = 1.5KPa - 0.45KPa$$

$$error(\%) = 1.05KPa$$

$$Vi(t) = \begin{cases} V_{ON} & \text{Sí } e(t) > SP \\ Vi(t) & \text{S } PV \leq e(t) \leq SP \\ V_{OFF} & \text{Sí } e(t) < PV \end{cases}$$

Finalmente, luego de un mes de operar el sistema en modo automático con una histéresis más amplia, los resultados de una mejora son evidentes en la curva que se muestra a continuación y además se puede observar un progreso en el color de las plantas y sus frutos, el follaje sigue siendo verde y los productos han aumentado su dureza.

Asimismo, se compararon los frutos con las características que debe poseer uno para ser clasificado en tres categorías según la Organización para la Agricultura y Alimentación (FAO), y este se encuentra entre la Categoría “Extra” e “I”, por mantener un diámetro adecuado como también por conservar su forma y aspectos característicos de la variedad. (Figura 5.5).



**Figura 5. 4 Gráfica de VPD con SET POINT = VPDmax**



**Figura 5. 5 Cultivo de tomate con el sistema en funcionamiento**

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1 Conclusiones**

El sistema de control en modo automático cumple con los requerimientos de la planta, lo que significa que el VPD dentro del invernadero oscila entre los parámetros establecidos para que un cultivo de tomates se pueda desarrollar adecuadamente en sus diferentes etapas de crecimiento.

Aunque el sistema de control está diseñado para encenderse por la mañana y apagarse por la noche, ha sido probado durante una semana sin ser desenergizado, por lo que la unidad de control y sensores trabajaron óptimamente en este tiempo de prueba, incluso por la noche, mostrando datos cambiantes sin activar el sistema nebulizador.

La unidad y sus componentes, como sensores y actuadores, han sido probados en condiciones reales de invernadero, cuando este se encontraba con un cultivo de tomates en etapa de cosecha, siendo esta una de las etapas más importantes del ciclo de la planta y donde se requiere un mejor control del VPD, dado que la variable es muy variante debido al abundante volumen de la planta, los componentes del dispositivo han mostrado una gran operatividad en entornos hostiles.

El método de control ON-OFF por histéresis aplicado en este proyecto funciona eficazmente, al mantenerse en pruebas durante toda la etapa de cosecha se obtuvieron mejoras en el color de las hojas y los frutos. Las plantas conservan el color verde característico de los tomates hasta un mes después del tiempo máximo especificado para este período. Por otro lado, los frutos se mantienen en la Categoría I de la FAO, que establece que los tomates de esta categoría deben ser de buena calidad, poseyendo pulpa firme y superficie homogénea.

### **6.2 Recomendaciones**

Dejar instalado el equipo para realizar un seguimiento completo con la nueva producción de tomate y recopilar la información necesaria que permita realizar una nueva publicación.

Estudiar la viabilidad de completar el sistema de control, mediante calefacción del ambiente, en los periodos de tiempo que sea necesario, para mejorar el rendimiento de la dinámica del VPD en los lapsos donde la pérdida de calor afecta a la variable controlada.

En las medidas tomadas con el sistema nebulizador en modo manual, se determinó que el tiempo requerido para que las gotas de agua actuaran sobre el VPD era de 2-3 minutos, sin embargo, este tiempo requerido se puede reducir cambiando las boquillas nebulizadoras por otras denominadas de “presión”, estas boquillas reducen el diámetro de la gota y por lo tanto se evaporan más rápidamente en el medio, provocando así el efecto de reducción temprana de VPD.

Además de la boquilla, en el sistema de nebulización es posible aumentar la capacidad de la bomba de agua en 2HP para que el sistema no sea dividido en sectores. Con este cambio, la presión en la tubería aumenta y el rocío se activa uniformemente en toda el área de cultivo.

En trabajos adicionales se puede incluir el análisis del sistema de nebulización para determinar la viabilidad de aplicar fumigación a través de la misma red de tuberías. Asimismo, el sistema existente también puede ser utilizado para aplicación de fertilizantes o germinación.

## Bibliografía

- [1] E. García y F. Flego, «Agricultura de precisión,» *Revista Ciencia y Tecnología. Recuperado de [http://www.palermo.edu/ingenieria/Ciencia\\_y\\_tecnologia/ciencia\\_y\\_tecno\\_8.html](http://www.palermo.edu/ingenieria/Ciencia_y_tecnologia/ciencia_y_tecno_8.html)*, p. 100, 2008.
- [2] G. J. Ramírez Vargas, Artist, “*EVALUACIÓN AGRONÓMICA BAJO CUBIERTA DE TRES HÍBRIDOS DE TOMATE RIÑÓN (Lycopersicon sculentum Mill), EN LA PROVINCIA DE SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS*”. [Art]. Escuela Politécnica del Ejército, 2012.
- [3] Z. Serrano Cermeño, de *Construcción de invernaderos*, Barcelona, Mundi-Prensa Libros, 2005, p. 38.
- [4] R. Shamshiri, Artist, *Principles of Greenhouse Control Engineering*. [Art]. Universiti Putra Malaysia, 2006-2007.
- [5] M. d. P. Viteri Vera y M. C. Tapia Toral, «Economía ecuatoriana: de la producción agrícola,» *ESPACIOS*, vol. 39, nº 32, p. 30, 2018.
- [6] M. L. Fanjul y M. Hiriart, *Biología funcional de los animales I/ Functional Biology of Animals I*, Siglo XXI, 2008.
- [7] J. V. Maroto Borrego, *Elementos de Horticultura General (3ª ed. rev. amp.)*, Mundi-Prensa Libros, 2008.

- [8] S. R. Gliessman, *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*, CATIE, 2002.
- [9] «PROAIN TECNOLOGÍA AGRÍCOLA,» 8 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/condiciones-ambientales-optimas-para-el-cultivo-de-tomate-en-invernadero>. [Último acceso: 24 Octubre 2021].
- [10] A. Alpi y F. Tognoni, *Cultivo en invernadero*, Mundi-Prensa Libros, 1991.
- [11] «YARA,» [En línea]. Available: <https://www.yara.com.pe/nutricion-vegetal/tomate/principios-agronicos-en-tomate/>. [Último acceso: 24 Octubre 2021].
- [12] M. Steffes, «QUEST,» 30 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.questclimate.com/es/deficiencia-de-presi%C3%B3n-de-vapor-interior-creciente-parte-2-vpd-importante/>. [Último acceso: 31 Octubre 2021].
- [13] T. Howell y D. Dusek, «Comparison of vapor pressure deficit calculation,» *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 121, n° 2, pp. 190-198, 1995.
- [14] M. Golato, Artist, *SISTEMAS DE CONTROL*. [Art]. Universidad Nacional de Tucumán, 2016.
- [15] M. Bollaín Sánchez, «Control de proceso básico y avanzado,» de *Ingeniería de instrumentación de plantas de proceso*, España, Ediciones Díaz de Santos, 2019, p. 314.

- [16] fitosofia, «fitosofia,» 28 Marzo 2015. [En línea]. Available:  
<https://fitosofia.blogspot.com/2015/03/nebulizacion-en-cultivos-hortícolas.html>.  
[Último acceso: 1 Noviembre 2021].
- [17] «Proyecto Arduino,» [En línea]. Available:  
<https://proyectoarduino.com/arduino-mega-2560/>. [Último acceso: 22 Diciembre 2021].
- [18] G. González y Antony, «PANAMAHITEK,» 23 Enero 2013. [En línea].  
Available: <http://panamahitek.com/arduino-mega-caracteristicas-capacidades-y-donde-conseguirlo-en-panama/>. [Último acceso: 22 Diciembre 2021].
- [19] «naylamp MECHATRONICS,» [En línea]. Available:  
<https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/58-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht22-am2302.html>. [Último acceso: 23 Diciembre 2021].
- [20] «POOLARIA,» [En línea]. Available:  
<https://www.poolaria.com/electrovalvulas-riego/1218-electrovalvula-hunter-tapa-roscada-pgv-jar-top.html>. [Último acceso: 23 Diciembre 2021].
- [21] D. V. Hernández y Luis, «programarfacil,» [En línea]. Available:  
<https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/ssd1306-pantalla-oled-con-arduino/>.  
[Último acceso: 24 Diciembre 2021].
- [22] «MAZ,» [En línea]. Available: <https://mazcr.com/gabinetes-y-cajas-de->

metal/459048-gabinete-metalico-40-x-30-x-20-ip54-nxw5-chint.html. [Último acceso: 4 Enero 2022].

## Anexos

### Anexo A. Valoración de opciones de unidad de control

Dimensión	Arduino Uno	Arduino Mega	PLC Siemens Logo	$\Sigma+1$	Ponderación
Arduino Uno		1	0,5	2,5	0,42
Arduino Mega	0		1	2	0,33
PLC Siemens Logo	0,5	0		1,5	0,25
			<b>SUMA</b>	6	1

Capacidad de procesamiento	Arduino Uno	Arduino Mega	PLC Siemens Logo	$\Sigma+1$	Ponderación
Arduino Uno		0,5	0	1,5	0,25
Arduino Mega	0,5		0,5	2	0,33
PLC Siemens Logo	1	0,5		2,5	0,42
			<b>SUMA</b>	6	1

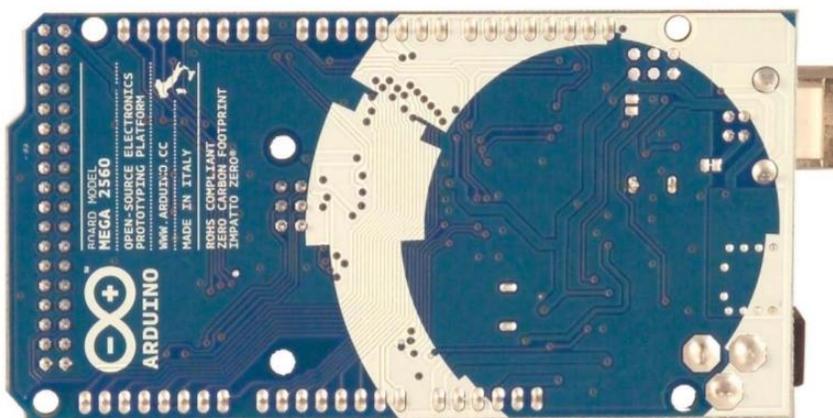
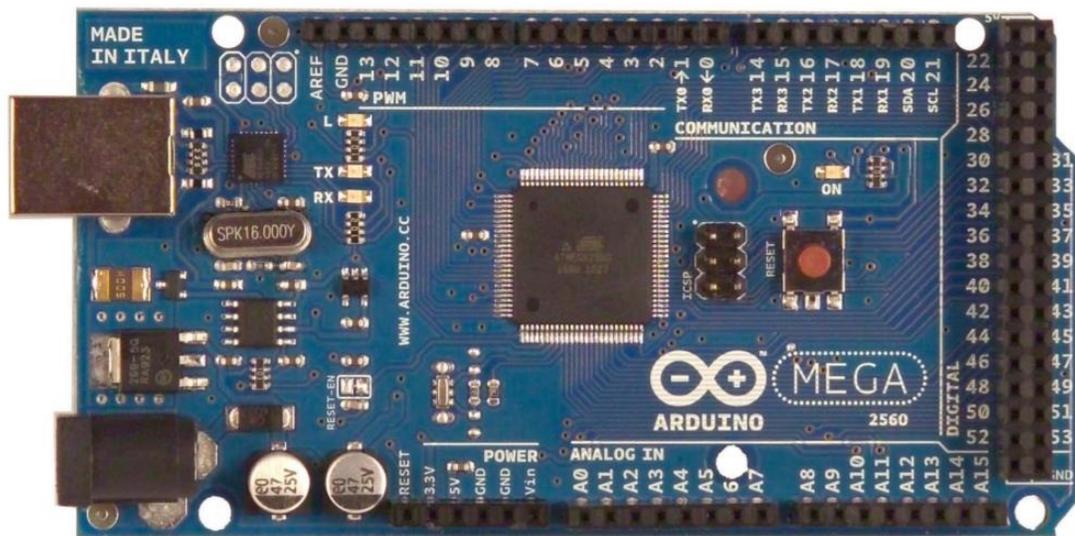
Entradas y salidas digitales	Arduino Uno	Arduino Mega	PLC Siemens Logo	$\Sigma+1$	Ponderación
Arduino Uno		0	0	1	0,17
Arduino Mega	1		1	3	0,50
PLC Siemens Logo	1	0		2	0,33
			<b>SUMA</b>	6	1

Comunicación con sensores	Arduino Uno	Arduino Mega	PLC Siemens Logo	$\Sigma+1$	Ponderación
Arduino Uno		0	0	1	0,17
Arduino Mega	1		0,5	2,5	0,42
PLC Siemens Logo	1	0,5		2,5	0,42
			<b>SUMA</b>	6	1

<b>Costo</b>	<b>Arduino Uno</b>	<b>Arduino Mega</b>	<b>PLC Siemens Logo</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Arduino Uno</b>		1	0,5	2,5	0,36
<b>Arduino Mega</b>	0,5		1	2,5	0,36
<b>PLC Siemens Logo</b>	0,5	0,5		2	0,29
			<b>SUMA</b>	7	1

**Anexo B.** Data sheet Arduino Mega 2560

## Arduino Mega 2560



The Arduino Mega 2560 is a microcontroller board based on the ATmega2560 ([datasheet](#)). It has 54 digital input/output pins (of which 14 can be used as PWM outputs), 16 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Mega is compatible with most shields designed for the Arduino Duemilanove or Diecimila.

### Schematic & Reference Design

EAGLE files: [arduino-mega2560-reference-design.zip](#)

Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

### Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

### Power

The Arduino Mega can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The Mega2560 differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega8U2 programmed as a USB-to-serial converter.

The power pins are as follows:

- ✦ **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- ✦ **5V.** The regulated power supply used to power the microcontroller and other components on the board. This can come either from VIN via an on-board regulator, or be supplied by USB or another regulated 5V supply.
- ✦ **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- ✦ **GND.** Ground pins.

### Memory

The ATmega2560 has 256 KB of flash memory for storing code (of which 8 KB is used for the bootloader), 8 KB of SRAM and 4 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

### Input and Output

Each of the 54 digital pins on the Mega can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- ✦ **Serial: 0 (RX) and 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) and 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) and 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) and 14 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. Pins 0 and 1 are also connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip.
- ✦ **External Interrupts: 2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 18 (interrupt 5), 19 (interrupt 4), 20 (interrupt 3), and 21 (interrupt 2).** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- ✦ **PWM: 0 to 13.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.
- ✦ **SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS).** These pins support SPI communication using the [SPI library](#). The SPI pins are also broken out on the ICSP header, which is physically compatible with the Uno, Duemilanove and Decimila.
- ✦ **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.
- ✦ **I<sup>2</sup>C: 20 (SDA) and 21 (SCL).** Support I<sup>2</sup>C (TWI) communication using the [Wire library](#) (documentation on the Wiring website). Note that these pins are not in the same location as the I<sup>2</sup>C pins on the Duemilanove or Decimila.

The Mega2560 has 16 analog inputs, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though is it possible to change the upper end of their range using the AREF pin and [analogReference\(\)](#) function.

There are a couple of other pins on the board:

- ✦ **AREF**. Reference voltage for the analog inputs. Used with `analogReference()`.
- ✦ **Reset**. Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

### Communication

The Arduino Mega2560 has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega2560 provides four hardware UARTs for TTL (5V) serial communication. An ATmega8U2 on the board channels one of these over USB and provides a virtual com port to software on the computer (Windows machines will need a .inf file, but OSX and Linux machines will recognize the board as a COM port automatically). The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the ATmega8U2 chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Mega2560's digital pins.

The ATmega2560 also supports I2C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a Wire library to simplify use of the I2C bus; see the [documentation on the Wiring website](#) for details. For SPI communication, use the [SPI library](#).

### Programming

The Arduino Mega can be programmed with the Arduino software ([download](#)). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega2560 on the Arduino Mega comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It communicates using the original STK500 protocol ([reference](#), [C header files](#)).

You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

The ATmega8U2 firmware source code is available [in the Arduino repository](#). The ATmega8U2 is loaded with a DFU bootloader, which can be activated by connecting the solder jumper on the back of the board (near the map of Italy) and then resetting the 8U2. You can then use [Atmel's FLIP software](#) (Windows) or the [DFU programmer](#) (Mac OS X and Linux) to load a new firmware. Or you can use the ISP header with an external programmer (overwriting the DFU bootloader). See [this user-contributed tutorial](#) for more information.

### Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Mega2560 is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2 is connected to the reset line of the ATmega2560 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can

## Anexo C. Valoración de opciones de sensor de Temperatura y humedad

Dimensión	DHT11	DHT22	LM35	$\Sigma+1$	Ponderación
DHT11		0,5	0	1,5	<b>0,25</b>
DHT22	0,5		0	1,5	<b>0,25</b>
LM35	1	1		3	<b>0,50</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

Comunicación	DHT11	DHT22	LM35	$\Sigma+1$	Ponderación
DHT11		0,5	1	2,5	<b>0,42</b>
DHT22	0,5		1	2,5	<b>0,42</b>
LM35	0	0		1	<b>0,17</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

Rango de Medición	DHT11	DHT22	LM35	$\Sigma+1$	Ponderación
DHT11		0	1	2	<b>0,33</b>
DHT22	1		1	3	<b>0,50</b>
LM35	0	0		1	<b>0,17</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

Costo	DHT11	DHT22	LM35	$\Sigma+1$	Ponderación
DHT11		0,5	0,5	2	<b>0,33</b>
DHT22	0,5		0,5	2	<b>0,33</b>
LM35	0,5	0,5		2	<b>0,33</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

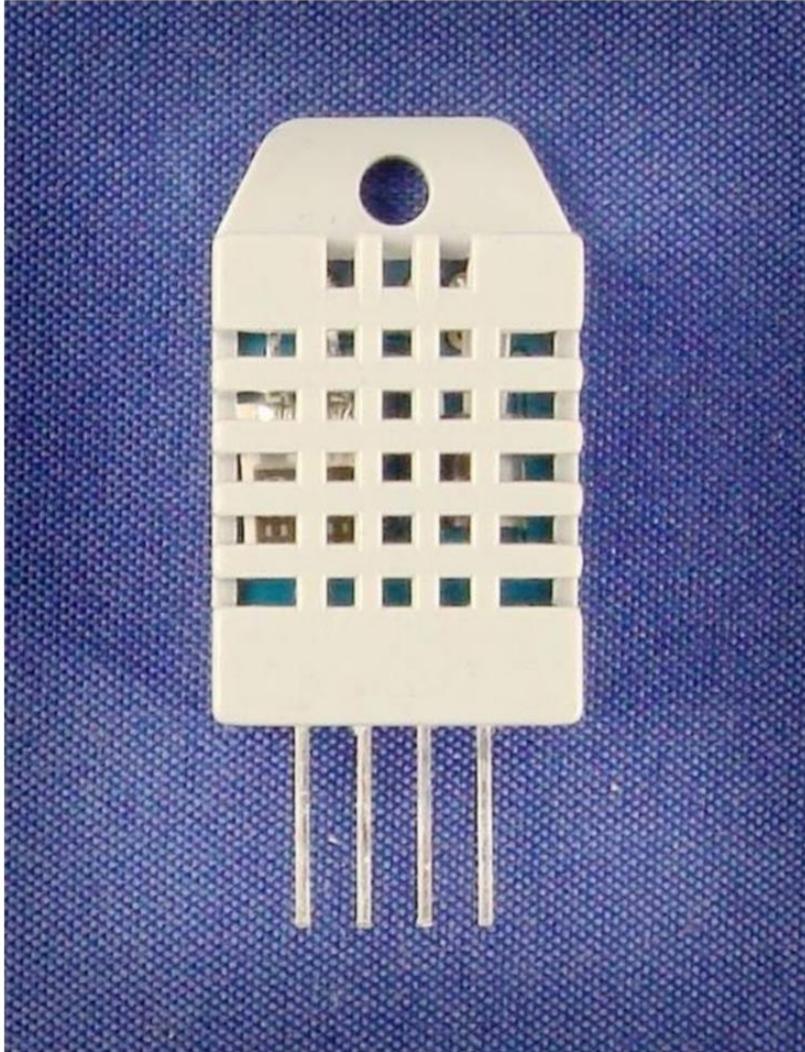
Disponibilidad	DHT11	DHT22	LM35	$\Sigma+1$	Ponderación
DHT11		0,5	0,5	2	<b>0,33</b>
DHT22	0,5		0,5	2	<b>0,33</b>
LM35	0,5	0,5		2	<b>0,33</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

Anexo D. Data sheet sensor DHT22

## Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors

### Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)



Capacitive-type humidity and temperature module/sensor

1

Thomas Liu (Business Manager)

Email: [thomasliu198518@yahoo.com.cn](mailto:thomasliu198518@yahoo.com.cn)

# Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors

## 1. Feature & Application:

- \* Full range temperature compensated      \* Relative humidity and temperature measurement
- \* Calibrated digital signal      \*Outstanding long-term stability      \*Extra components not needed
- \* Long transmission distance      \* Low power consumption      \*4 pins packaged and fully interchangeable

## 2. Description:

DHT22 output calibrated digital signal. It utilizes exclusive digital-signal-collecting-technique and humidity sensing technology, assuring its reliability and stability. Its sensing elements is connected with 8-bit single-chip computer.

Every sensor of this model is temperature compensated and calibrated in accurate calibration chamber and the calibration-coefficient is saved in type of programme in OTP memory, when the sensor is detecting, it will cite coefficient from memory.

Small size & low consumption & long transmission distance(20m) enable DHT22 to be suited in all kinds of harsh application occasions.

Single-row packaged with four pins, making the connection very convenient.

## 3. Technical Specification:

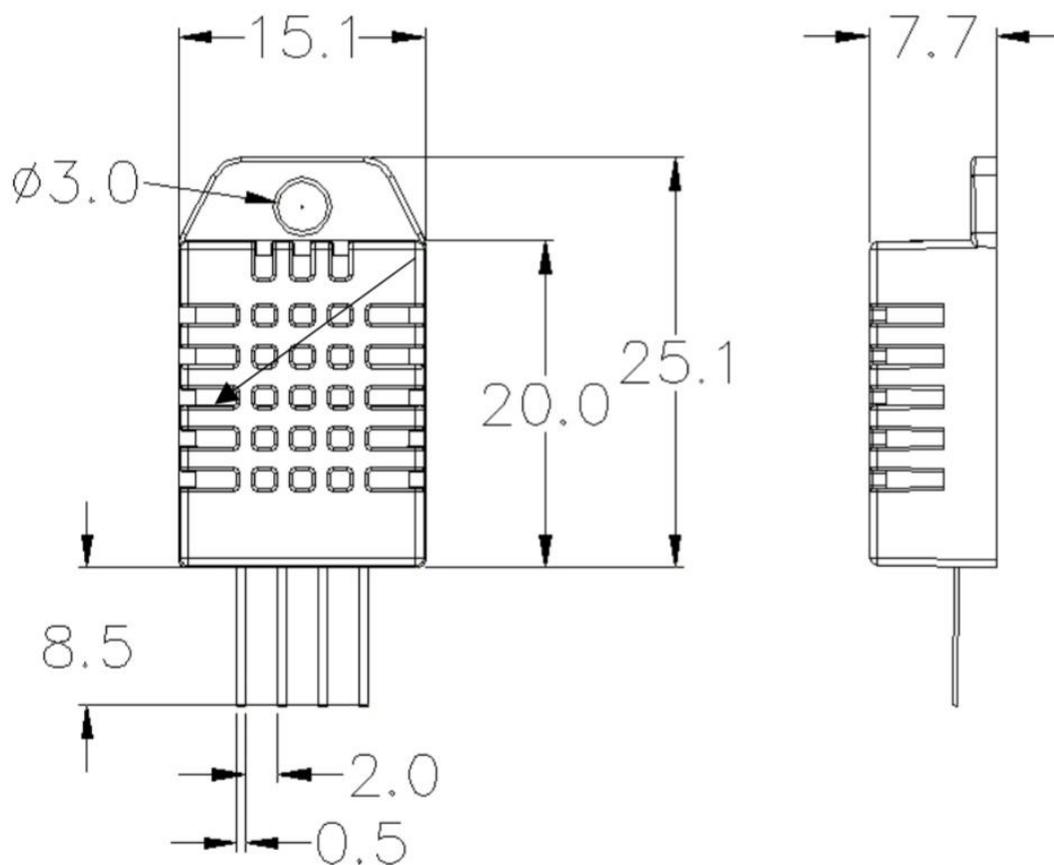
Model	DHT22
Power supply	3.3-6V DC
Output signal	digital signal via single-bus
Sensing element	Polymer capacitor
Operating range	humidity 0-100%RH;      temperature -40~80Celsius
Accuracy	humidity +-2%RH(Max +-5%RH);      temperature <+-0.5Celsius
Resolution or sensitivity	humidity 0.1%RH;      temperature 0.1Celsius
Repeatability	humidity +-1%RH;      temperature +-0.2Celsius
Humidity hysteresis	+/-0.3%RH
Long-term Stability	+/-0.5%RH/year
Sensing period	Average: 2s
Interchangeability	fully interchangeable
Dimensions	small size 14*18*5.5mm;      big size 22*28*5mm

## 4. Dimensions: (unit----mm)

### 1) Small size dimensions: (unit----mm)

# Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors



Pin sequence number: 1 2 3 4 (from left to right direction).

Pin	Function
1	VDD----power supply
2	DATA--signal
3	NULL
4	GND

## Anexo E. Valoración de opciones de sensor de Flujo

<b>Dimensión</b>	<b>YF-S201</b>	<b>FS-400A</b>	<b>YF-DN50</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>YF-S201</b>		0	0	1	<b>0,17</b>
<b>FS-400A</b>	1		0,5	2,5	<b>0,42</b>
<b>YF-DN50</b>	1	0,5		2,5	<b>0,42</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

<b>Comunicación</b>	<b>YF-S201</b>	<b>FS-400A</b>	<b>YF-DN50</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>YF-S201</b>		0,5	0,5	2	<b>0,33</b>
<b>FS-400A</b>	0,5		0,5	2	<b>0,33</b>
<b>YF-DN50</b>	0,5	0,5		2	<b>0,33</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

<b>Rango de Medición</b>	<b>YF-S201</b>	<b>FS-400A</b>	<b>YF-DN50</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>YF-S201</b>		0,5	0	1,5	<b>0,25</b>
<b>FS-400A</b>	0,5		0	1,5	<b>0,25</b>
<b>YF-DN50</b>	1	1		3	<b>0,50</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

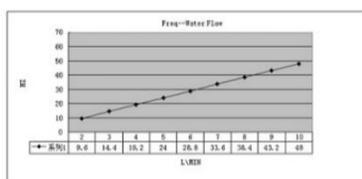
<b>Disponibilidad</b>	<b>YF-S201</b>	<b>FS-400A</b>	<b>YF-DN50</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>YF-S201</b>		0,5	1	2,5	<b>0,42</b>
<b>FS-400A</b>	0,5		1	2,5	<b>0,42</b>
<b>YF-DN50</b>	0	0		1	<b>0,17</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

<b>Costo</b>	<b>YF-S201</b>	<b>FS-400A</b>	<b>YF-DN50</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>YF-S201</b>		0,5	1	2,5	<b>0,42</b>
<b>FS-400A</b>	0,5		1	2,5	<b>0,42</b>
<b>YF-DN50</b>	0	0		1	<b>0,17</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

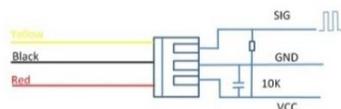
## Anexo F. Especificaciones técnicas sensor FS-400A



El sensor de flujo de agua emite pulsos proporcionales al flujo de agua con: Frecuencia de pulso = Flujo \*4.8. Es decir, si la frecuencia de salida es 48, entonces el flujo de agua:  $48/4.8=10$  (L/min):



Conecte el sensor de flujo de agua al microcontrolador de la siguiente manera:



### Especificación

- Mini. Voltaje de trabajo: CC 4,5 V.
- máx. Corriente de trabajo: 15mA (DC 5V)
- Voltaje de funcionamiento: CC 5 V ~ 24 V.
- Rango de caudal: 1~60L/min
- Capacidad de carga:  $\leq 10\text{mA}$  (CC 5V)
- Temperatura de funcionamiento:  $\leq 80$  °C
- Temperatura del líquido:  $\leq 120$  °C
- Humedad de funcionamiento: 35% ~ 90% HR
- Presión de agua:  $\leq 2.0\text{MPa}$
- Temperatura de almacenamiento:  $-25 \sim + 80$  °C
- Humedad de almacenamiento: 25% ~ 95% HR

## Anexo G. Valoración de opciones de Electroválvulas

<b>Dimensión</b>	<b>Hunter PGV-100- JTG-B</b>	<b>Válvula Solenoides 1/2"</b>	<b>CEPEX S390T</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Hunter PGV-100-JTG-B</b>		1	0,5	2,5	<b>0,42</b>
<b>Válvula Solenoide 1/2"</b>	0		0	1	<b>0,17</b>
<b>CEPEX S390T</b>	0,5	1		2,5	<b>0,42</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

<b>Consumo Energético</b>	<b>Hunter PGV-100- JTG-B</b>	<b>Válvula Solenoides 1/2"</b>	<b>CEPEX S390T</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Hunter PGV-100-JTG-B</b>		1	1	3	<b>0,50</b>
<b>Válvula Solenoide 1/2"</b>	0		0,5	1,5	<b>0,25</b>
<b>CEPEX S390T</b>	0	0,5		1,5	<b>0,25</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

<b>Presión de Trabajo</b>	<b>Hunter PGV-100- JTG-B</b>	<b>Válvula Solenoides 1/2"</b>	<b>CEPEX S390T</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Hunter PGV-100-JTG-B</b>		1	0	2	<b>0,33</b>
<b>Válvula Solenoide 1/2"</b>	0		0	1	<b>0,17</b>
<b>CEPEX S390T</b>	1	1		3	<b>0,50</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

<b>Disponibilidad</b>	<b>Hunter PGV-100- JTG-B</b>	<b>Válvula Solenoides 1/2"</b>	<b>CEPEX S390T</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Hunter PGV-100-JTG-B</b>		0,5	0,5	2	<b>0,33</b>
<b>Válvula Solenoide 1/2"</b>	0,5		0,5	2	<b>0,33</b>
<b>CEPEX S390T</b>	0,5	0,5		2	<b>0,33</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

<b>Costo</b>	<b>Hunter PGV-100- JTG-B</b>	<b>Válvula Solenoides 1/2"</b>	<b>CEPEX S390T</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
--------------	--------------------------------------	--	------------------------	------------------------------	--------------------

<b>Hunter PGV-100-JTG-B</b>		0	1	2	<b>0,33</b>
<b>Válvula Solenoide 1/2"</b>	1		1	3	<b>0,50</b>
<b>CEPEX S390T</b>	0	0		1	<b>0,17</b>
			<b>SUMA</b>	6	1

## Anexo H. Características técnicas electroválvula Hunter PGV-101G-B

# Hunter®

RIEGO RESIDENCIAL Y COMERCIAL  
Built on Innovation®



- 01 **Trabajando Duro:** Construida para durar y funcionar durante años
- 02 **Versátil:** La PGV está disponible en una gran variedad de configuraciones, adaptándose prácticamente a cualquier situación
- 03 **Práctica:** Las opciones de bajo caudal permiten el uso de los productos Hunter de riego localizado

## PGV VÁLVULAS

*Válvulas de Categoría Profesional Preparadas para Instalaciones de Cualquier Tamaño*

Esta excelente y resistente válvula ofrece las mejores prestaciones de las electroválvulas Hunter. Creada con suficiente robustez para resistir los rigores de la mayoría de instalaciones residenciales y pequeñas áreas comerciales, la PGV está disponible en un amplio abanico de configuraciones. Para uso en jardines pequeños, conexión 1" BSP está disponible en tres configuraciones: diseño de ángulo, en línea y macho - macho. A su vez, cada modelo está disponible en la versión con control de caudal y sin control de caudal. Para aplicaciones en jardines más grandes hay conexiones disponibles de 1.5" (40 mm) y 2" (50 mm) BSP, la PGV viene en modelos en línea/ángulo con control de caudal. Todos los modelos cuentan con una construcción duradera de gran calidad y de un sólido diafragma con soporte para evitar deformaciones.

### PGV con tapa roscada

Un simple giro de la muñeca es lo que se requiere para acceder al interior de la válvula, lo que la convierte en la preferida a la hora de dar mantenimiento.



### Accu-Sync®

Accu-Sync es un regulador simple de presión que es compatible con todas las válvulas Hunter de control.



■ **Aprenda mas.** Visite [hunterindustries.com](http://hunterindustries.com) para mas informacion.

## PGV VALVE CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES

### Características

- Aplicación (PGV-100): Residencial
- Aplicación (PGV-101, 151, 201): Residencial/pequeñas áreas comerciales
- Conexión rosca: 1" (25 mm), 1½" (40 mm) y 2" (50 mm)
- La purga manual interna y externa permite una activación rápida y sencilla a "nivel de la válvula"
- Diseño durable con tornillos para una máxima resistencia
- Diseño de junta de diafragma con doble reborde para un rendimiento superior sin pérdidas
- Los solenoides tipo "latch" CC admiten los programadores Hunter con pilas
- Los tornillos cautivos de la tapa permiten un mantenimiento de la válvula sin problemas
- La posibilidad de caudal bajo permite utilizar los productos de microrriego de Hunter
- Solenoide encapsulado de 24 V CA con émbolo cautivo para un mantenimiento sin problemas
- Temperatura máxima: 151 F (66° C)
- Período de garantía: 2 años

### Especificaciones de funcionamiento

- Caudal:
  - PGV-100: 0.2 a 40 GPM (PGV-100: de 0,05 a 9 m<sup>3</sup>/h de 0,7 a 150 l/min)
  - PGV-101: 0.2 a 40 GPM (PGV-101: de 0,05 a 9 m<sup>3</sup>/h de 0,7 a 150 l/min)
  - PGV-151: 20 a 120 GPM (PGV-151: de 5 a 27 m<sup>3</sup>/h de 75 a 450 l/min)
  - PGV-201: 20 a 150 GPM (PGV-201: de 5 a 34 m<sup>3</sup>/h de 75 a 570 l/min)
- Intervalo de presión recomendado: 20 to 150 PSI (de 1,5 a 10 bar; de 150 a 1.000 kPa)

### Especificaciones del Solenoide

- Solenoide de 24 VAC:
  - 350 mA en arranque, 190mA en mantenimiento, 60 HZ
  - 370 mA en arranque, 210mA en mantenimiento, 50 HZ

### PGV VALVES

Model	Description
PGV-100G	Válvula en línea de plástico de 1" (25 mm), rosca hembra
PGV-101G	Válvula en línea de plástico de 1" (25 mm) con control de caudal, rosca hembra
PGV-100MM	Válvula en línea de plástico de 1" (25 mm), macho x rosca macho
PGV-101MM	Válvula en línea de plástico de 1" (25 mm) con control de caudal, macho x rosca macho
PGV-100JT-G	Válvula de globo de 1" (25 mm) con tapa superior roscada; sin control de flujo
PGV-101JT-G	Válvula de globo de 1" (25 mm) con tapa superior roscada; con control de flujo
PGV-100JT-S	Válvula de globo de 1" (25 mm) con tapa superior roscada; con control de flujo y conexión hembra para cementar
PGV-101JT-S	Válvula de globo de 1" (25 mm) con tapa superior roscada; con control de flujo y conexión hembra para cementar
PGV-100JT-MM	Válvula de globo de 1" (25 mm) con tapa superior roscada; sin control de flujo y conexión macho roscada en ambos extremos
PGV-101JT-MM	Válvula de globo de 1" (25 mm) con tapa superior roscada; con control de flujo y conexión macho roscada en ambos extremos
PGV-151	Válvula en línea/ángulo de plástico de 1½" (40 mm) con control de caudal
PGV-201	Válvula en línea/ángulo de plástico de 2" (50 mm) con control de caudal

### PGV, PÉRDIDA DE PRESIÓN EN BARES

m <sup>3</sup> /h	1" (25 mm)		1½" (40 mm)		2" (50 mm)	
	en línea	en ángulo	en línea	en ángulo	en línea	en ángulo
0,3	0,1	0,07				
1,0	0,1	0,07				
2,50	0,1	0,08				
3,50	0,2	0,09				
4,50	0,2	0,12	0,2	0,1	0,1	0,1
7,00	0,4	0,22	0,2	0,1	0,1	0,1
8,0	1,0		0,2	0,2	0,1	0,1
9,00	1,0		0,2	0,2	0,1	0,1
11,00			0,3	0,2	0,1	0,1
13,50			0,3	0,3	0,1	0,1
18,00			0,4	0,4	0,2	0,1
22,50			0,6	0,5	0,3	0,2
27,00			0,8	0,8	0,4	0,3
30,50					0,6	0,5
34,00					0,7	0,6

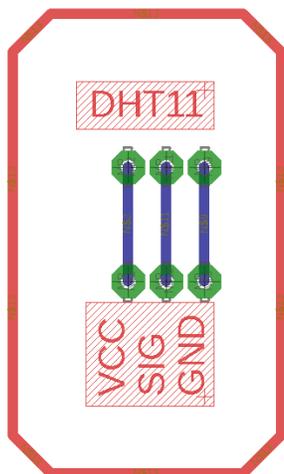
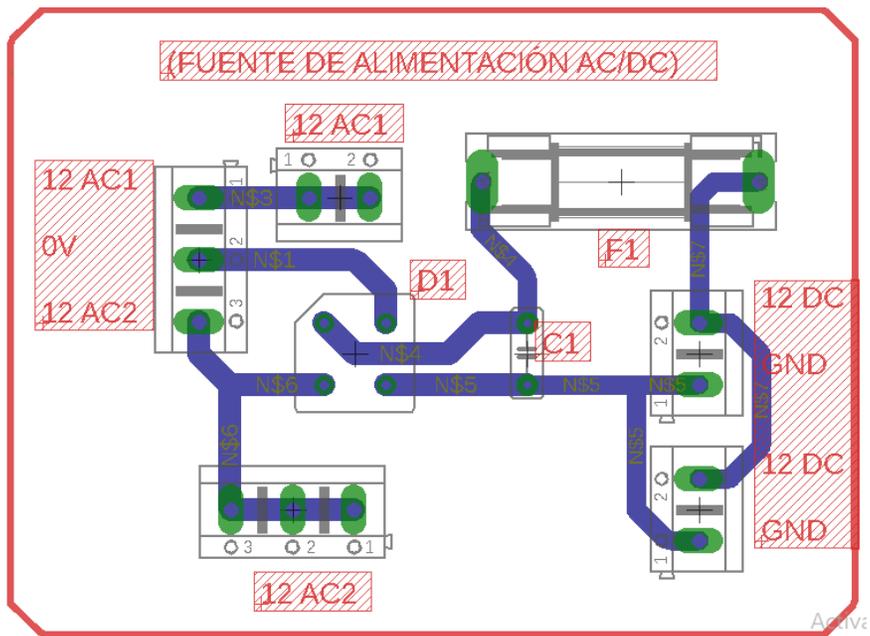


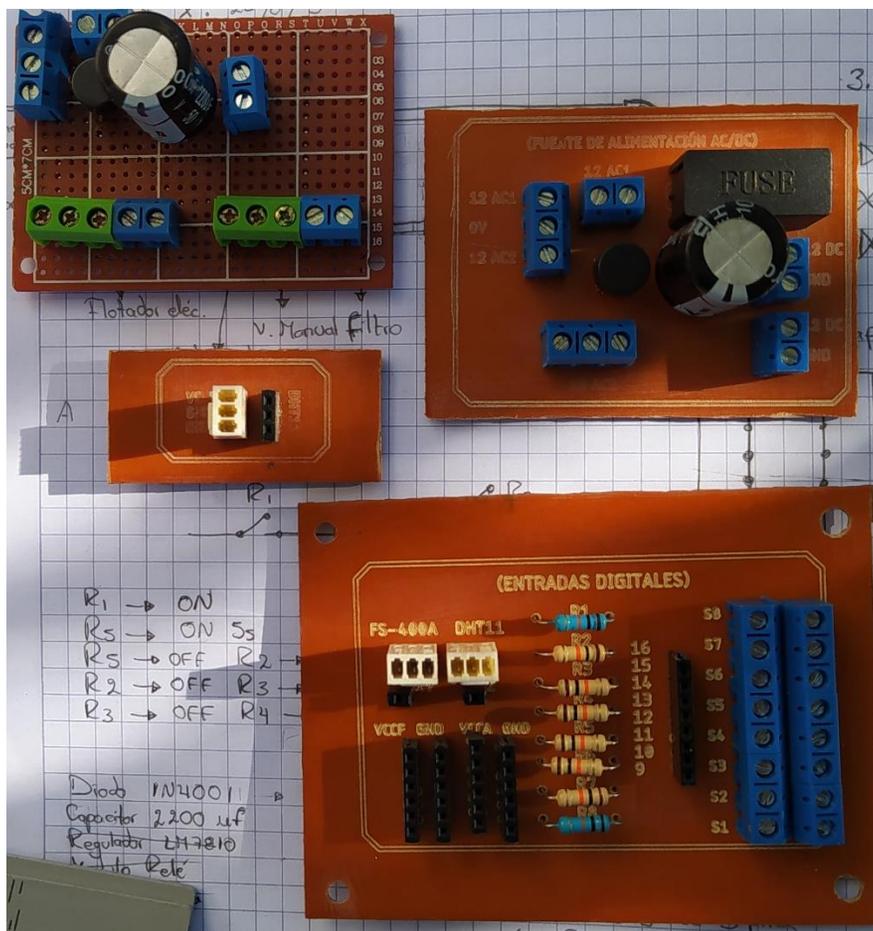
Sitio web [hunterindustries.com](http://hunterindustries.com) | Tel +1 760-744-5240 | Asistencia Técnica [SoporteTecnico@hunterindustries.com](mailto:SoporteTecnico@hunterindustries.com)

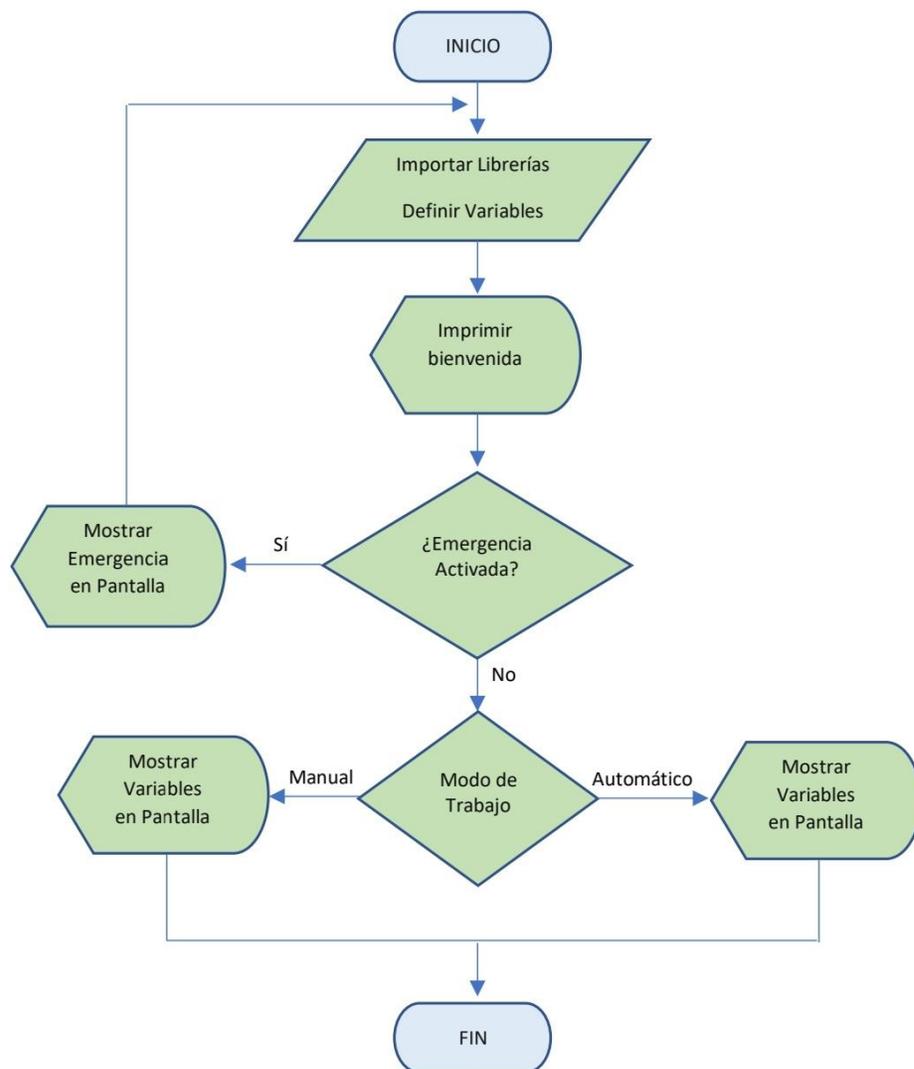
Lo que nos motiva es contribuir al éxito de nuestros clientes. Aunque nuestra pasión por la innovación y la ingeniería está presente en todo lo que hacemos, es el compromiso que hemos contraído de ofrecerle una asistencia excepcional lo que nos hace albergar la esperanza de que siga formando parte de la familia de clientes de Hunter en los próximos años.



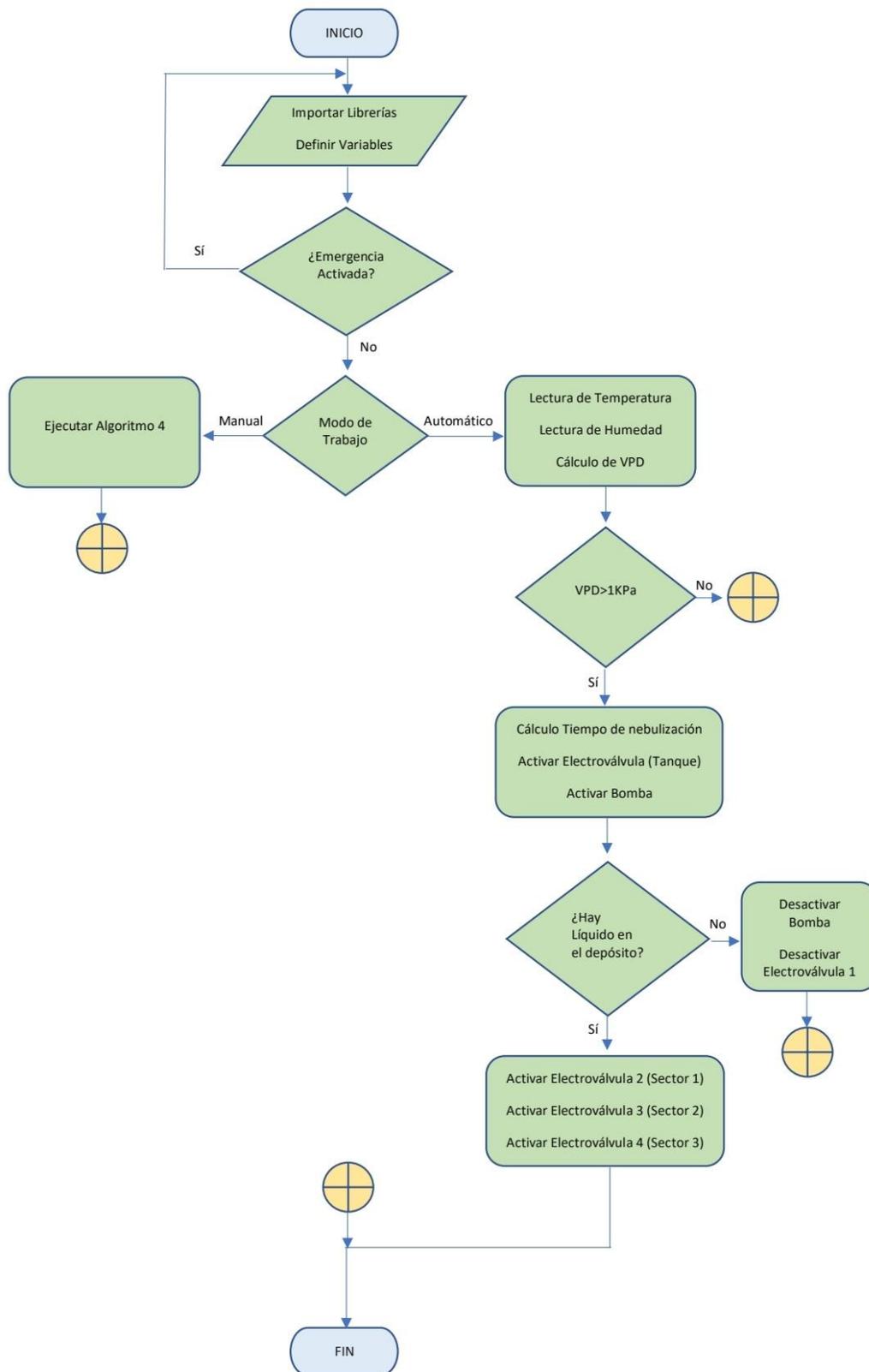
## Anexo I. Diseño de tarjetas PCB



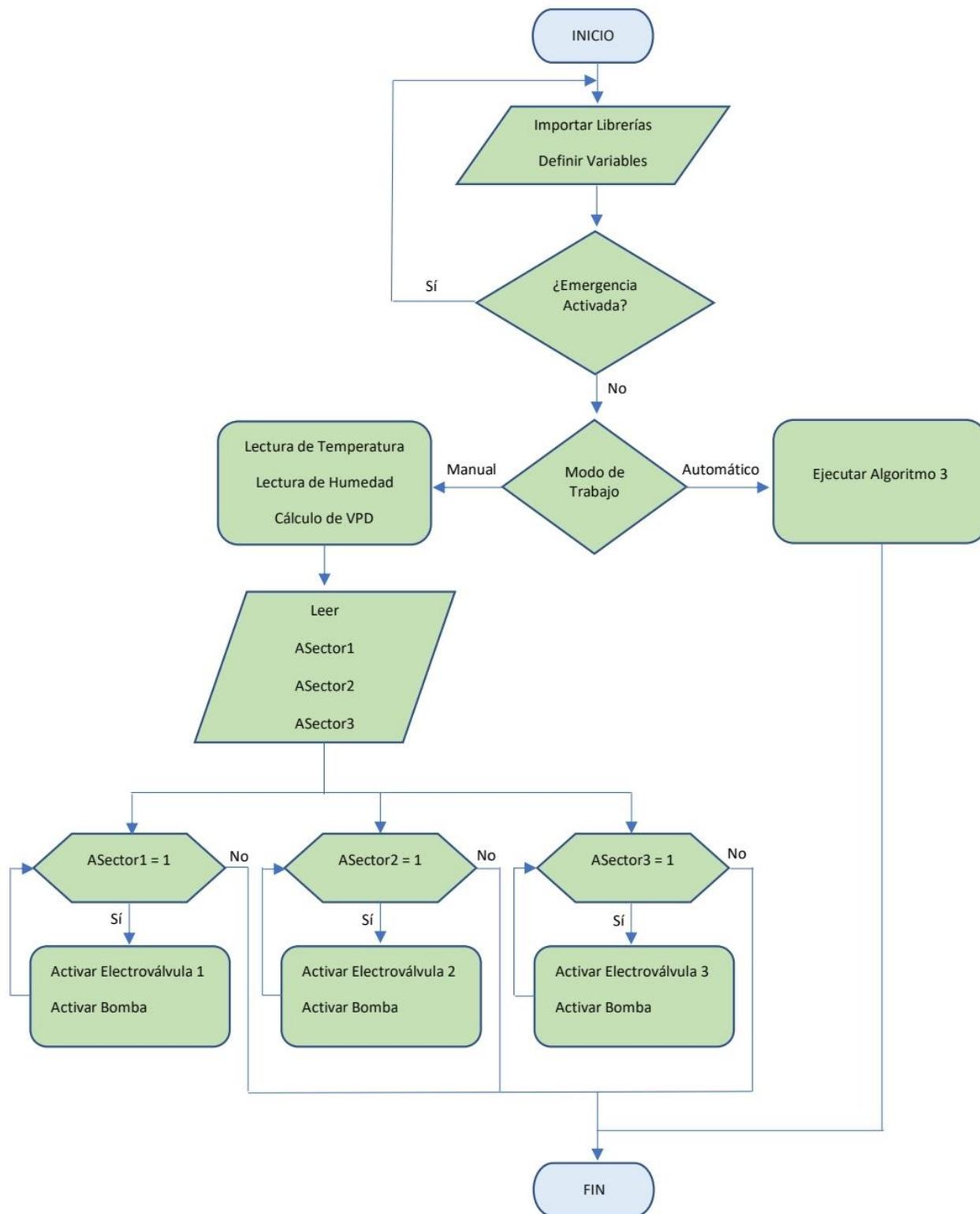


**Anexo J.** Pseudocódigo impresión de datos

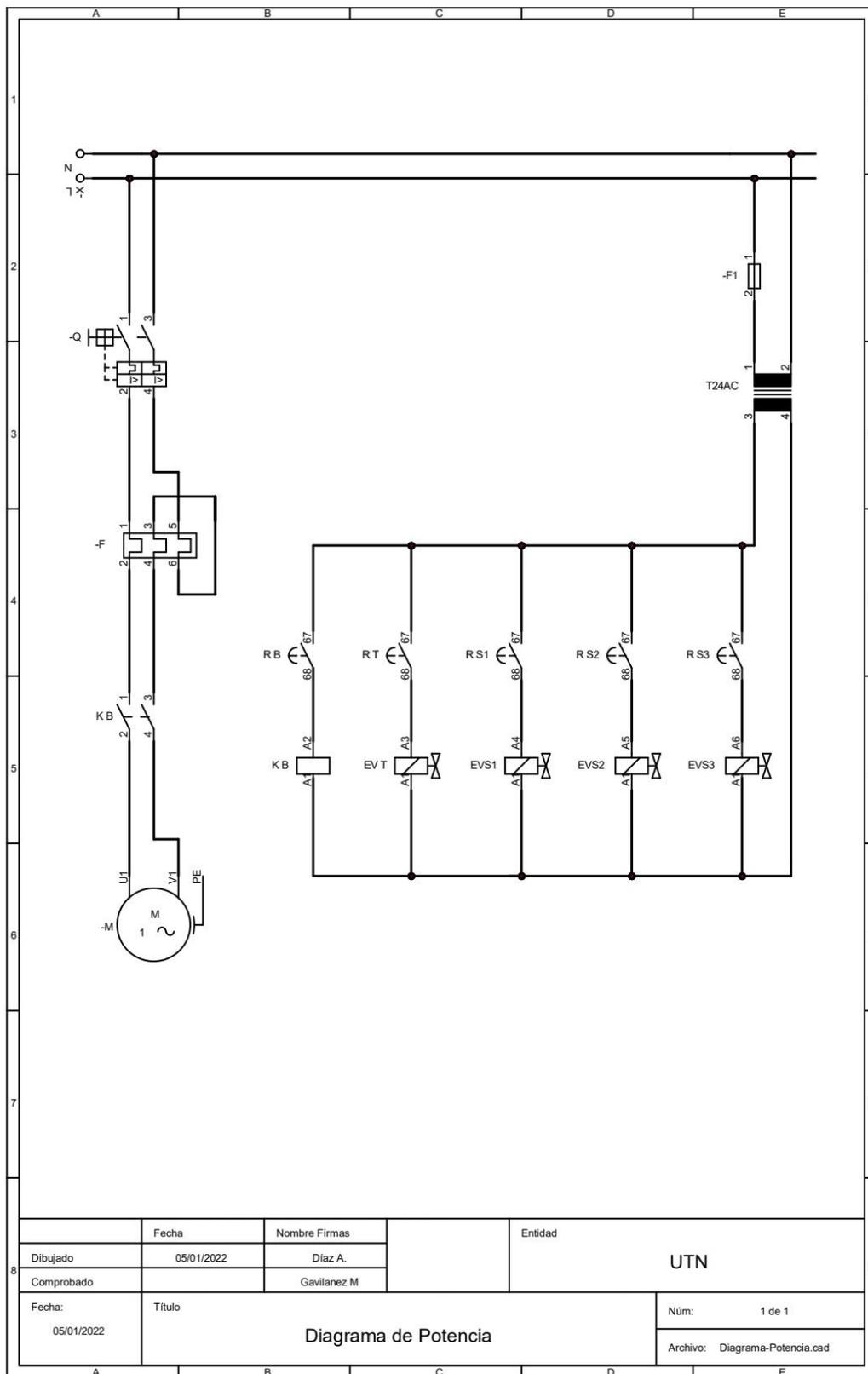
### Anexo K. Pseudocódigo modo automático



## Anexo L. Pseudocódigo modo manual



Anexo M. Diagrama Eléctrico



**Anexo N. Código Arduino**

```

//*****

// Definir variables y puertos digitales para Relés
#define RELAY_ON 0
#define RELAY_OFF 1
int releEstadoSistema = 4;
int releBomba = 5;
int releEV1 = 6;
int releEV2 = 7;
int releEV3 = 8;
int releEV4 = 9;

//*****

// Definir puertos digitales para modo Automático y Manual
int selecAutomatico;
int selecManual;
int RTanque;
int ASector1;
int ASector2;
int ASector3;

//*****

// Librería sensor DHT11 y variables para (variables climáticas)
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
int sensor = 3;           // Entrada de señal del sensor
int temperatura;
int humedad;
DHT dht(sensor, DHT11);

```

```

//*****

// Librería para pantalla OLED 128x64
#include <Wire.h>           // libreria de comunicacion por I2C
#include <Adafruit_GFX.h>   // Manipulación de texto y gráficas de pantalla
#include <Adafruit_SSD1306.h>

#define ANCHO 128          // Pixeles de ancho
#define ALTO 64            // Pixeles de alto
#define OLED_RESET -1

#define DIRECCION_PANTALLA 0x3C // Dirección de comunicación para 128x64
Adafruit_SSD1306 oled(ANCHO, ALTO, &Wire, OLED_RESET);

//*****

// Variables para sensor de flujo fs-400a
volatile int NPulsos; //variable para la cantidad de pulsos recibidos
int SFlujo = 2; //Sensor conectado en el pin 2
float k = 3.5; // Factor de conversión (frecuencia a caudal) (k=4.8)

//*****

// Variables para uso de timers
unsigned long tiempoMuestreo = 0; // Variable de tiempo real
unsigned long tiempo2 = 0; // Variable usada para medir variables climaticas cada
15 segundos
int muestra = 0;
int tiempoMinutos = 0;
unsigned long tiempo3 = 0; // Variable usada para medir VPD cada 5 minutos
int accion = 1;

//*****

```

```

// Variables para realizar cálculos
float SVP;                // Presión de Vapor Saturado
float PVair;              // Presión de Vapor dentro del Invernadero
double VPD;               // Déficit de Presión de Vapor
double VPDideal = 1;
double x;                  // x = VPD
double y;                  // Y = Tiempo de nebulización

//*****

// Variables para Interrupción Paro de Emergencia
const byte PE = 18;       // Entrada digital para Interrupción
int EstadoPE;             // Variable para asignar estado de PE

//*****

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  //Inicialización
  //Asegurar nivel ALTO en cada entrada de relé
  digitalWrite (releEstadoSistema, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releBomba, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV1, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV2, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV3, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV4, RELAY_OFF);

  //Definir los pines para Relés como salida
  pinMode (4, OUTPUT); // Relé para Luces Piloto del sistema (Buen estado o Mal
estado)
  pinMode (5, OUTPUT); // Relé para Bomba
  pinMode (6, OUTPUT); // Relé para Electroválvula 1 Tanque

```

```

pinMode (7, OUTPUT); // Relé para Electroválvula 2 Sector 1
pinMode (8, OUTPUT); // Relé para Electroválvula 3 Sector 2
pinMode (9, OUTPUT); // Relé para Electrovalvula 4 Sector 3

// Definir pines digitales como entrada
pinMode (52, INPUT);           // Entrada para selección automática
pinMode (53, INPUT);           // Entrada para selección manual
tanque pinMode (45, INPUT);      // Entrada para activar Retorno de líquido al

pinMode (46, INPUT);           // Entrada para activar Nebulización del Sector 1
pinMode (47, INPUT);           // Entrada para activar Nebulización del Sector 2
pinMode (48, INPUT);           // Entrada para activar Nebulización del Sector 3
//pinMode (49, INPUT);         // Entrada Reset

//Inicialización Interrupciones
pinMode(PE, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PE), PEmergencia, LOW);

//Inicialización Sensor DHT11 (Temperatura y humedad)
dht.begin();

// Inicialización Sensor de Flujo
pinMode(SFlujo, INPUT);
subida attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING); //((Interrupcion 0(Pin2),funcion,Flanco de

// Inicialización de Pantalla OLED 128x64
Wire.begin(); // Iniciar comunicación
if(!oled.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)){ // Comando de alimentación para
la pantalla 3.3V
Serial.println("Oled Failed");

```

```

    digitalWrite(releEstadoSistema, RELAY_ON);
    for(;;);
}
oled.display();
delay(5000);
oled.clearDisplay();
oled.display();
// Imprimir en OLED al inicio
oled.setTextColor(WHITE);          // Color de Pixel a mostrar
oled.setCursor(15, 0);              // Coordenadas para inicio de texto
oled.setTextSize(2);                // Tamaño de caracteres
oled.print("WELLCOME");             // Imprimir
oled.setCursor(0, 30);              // Segunda fila
oled.setTextSize(2);
oled.print(" Starting System");
oled.display();
delay(5000);
}

void loop() {
    tiempoMuestreo = millis();        // Inicializar reloj
    tiempoMinutos = tiempoMuestreo/60000;

    // Leer modo de trabajo (automático o manual)
    selecAutomatico = digitalRead(52);
    selecManual = digitalRead(53);

    // Condición para tomar una muestra de las variables climáticas cada 10 seg
    if(tiempoMuestreo >= (tiempo2 + 10000)){
        tiempo2 = tiempoMuestreo;    // Actualizar tiempo
    }
}

```

```

muestra = tiempo2/15000;          // Variable para contar muestras
temperatura = dht.readTemperature(); // Leer Temperatura actual
humedad = dht.readHumidity();     // Leer Humedad Relativa actual
calculoVPD();                     // Función para calcular VPD
imprimirVariables();              // Función para imprimir resultados de variables en
LCD
}

if((temperatura > 0) && (humedad > 0)){
  digitalWrite(releEstadoSistema, RELAY_OFF);

  // Modo AUTOMÁTICO
  if((selecAutomatico == HIGH)&&(tiempoMinutos >= (tiempo3 + 25))){
    tiempo3 = tiempoMinutos;

    if(VPD > VPDideal){
      Serial.print("Acción");
      Serial.print(accion);

      x = VPD;
      y = ((12*x)-8)*1000;
      SistemaAutomatico();
      frecuencia = ObtenerFrecuencia(); //obtener la Frecuencia de los pulsos en Hz
      l_m = frecuencia/k; //calcular el caudal en L/m
      accion++;
    }
  }
}
else{
  if(tiempoMuestreo > tiempo2 + 9500){

```

```

    SFalla();
}
}
// Modo MANUAL
if(selecManual == HIGH){
    SistemaManual();
}
}

//*****

// CALCULAR PRESIÓN DE VAPOR SATURADO (SVP) Y DÉFICIT DE PRESIÓN
DE VAPOR (VPD)
int calculoVPD() {
    SVP = 0.61078*(exp((17.27*temperatura)/(237.3+temperatura)));
    PVair = (humedad*0.01)*SVP;
    VPD = SVP-PVair;
    return VPD;
}

//*****

// Función que se ejecuta en interrupción para sensor de flujo
void ContarPulsos ()
{
    NPulsos++; //incrementamos la variable de pulsos
}

//*****

//Función para obtener frecuencia de los pulsos
int ObtenerFrecuencia()
{

```

```

int frecuencia;
NPulsos = 0; //Ponemos a 0 el número de pulsos
interrupts(); //Habilitamos las interrupciones
delay(1000); //muestra de 1 segundo
noInterrupts(); //Desabilitamos las interrupciones
frecuencia=NPulsos; //Hz(pulsos por segundo)
return frecuencia;
}

//*****

// Función en caso de activar Paro de Emergencia
void PEmergencia() {
  EstadoPE = digitalRead(PE);
  while(EstadoPE == LOW) {
    digitalWrite (releBomba, RELAY_OFF);
    digitalWrite (releEV1, RELAY_OFF);
    digitalWrite (releEV2, RELAY_OFF);
    digitalWrite (releEV3, RELAY_OFF);
    digitalWrite (releEV4, RELAY_OFF);
    digitalWrite(releEstadoSistema, RELAY_ON);
    Serial.print(" EMERGENCIA ");
    EstadoPE = digitalRead(PE);
    //ImpPEmergencia();
  }
}

//*****

// Función para imprimir variables Climáticas en pantalla Oled
void imprimirVariables() {
  oled.clearDisplay();          // Limpiar pantalla

```

```

oled.setTextSize(2);           // Tamaño de caracteres
//oled.setTextColor(WHITE);    // Color de Pixel a mostrar
oled.setCursor(0, 0);          // Coordenadas para inicio de texto
oled.print("Tem = ");          // Imprimir
oled.print(temperatura);
oled.print(" C");
oled.display();
oled.setCursor(0, 23);         // Segunda fila
oled.print("H/R = ");
oled.print(humedad);
oled.print(" %");
oled.display();
oled.setCursor(0, 45);         // Tercer fila
oled.print("VPD = ");
oled.print(VPD);
oled.display();
}

//*****

// Función para imprimir en caso de fallo de sensores
void SFalla (){
  digitalWrite(releEstadoSistema, RELAY_ON);
  Serial.println("Sensor Falling");
  oled.clearDisplay();
  oled.setCursor(15, 0);        // Coordenadas para inicio de texto
  oled.setTextSize(2);         // Tamaño de caracteres
  oled.print("ALERTA");         // Imprimir
  oled.setCursor(0, 30);        // Segunda fila
  oled.setTextSize(2);
  oled.print(" Fallando Sensores");
}

```

```

oled.display();
}

//*****

// Función para imprimir en caso de no haber agua en el depósito
void FLiquido (){
  if(accion >= 1) {
    for(;;){
      digitalWrite(releEstadoSistema, RELAY_ON);
      oled.clearDisplay();
      oled.setCursor(15, 0);          // Coordenadas para inicio de texto
      oled.setTextSize(2);          // Tamaño de caracteres
      oled.print("ALERTA");          // Imprimir
      oled.setCursor(0, 30);        // Segunda fila
      oled.setTextSize(2);
      oled.print(" Sistema Sin Agua");
      oled.display();
    }
  }
}

//*****

// Función para imprimir Paro de Emergencia
void ImpPEmergencia (){
  Serial.println("Paro de Emergencia Activado");
  oled.clearDisplay();
  oled.setCursor(15, 0);          // Coordenadas para inicio de texto
  oled.setTextSize(2);          // Tamaño de caracteres
  oled.print("ALERTA");          // Imprimir
  oled.setCursor(0, 30);        // Segunda fila

```

```

oled.setTextSize(2);
oled.print(" Paro de Emergencia");
oled.display();
}

//*****
// Función para Activar Sistema de atomización de agua en Modo Automático
void SistemaAutomatico() {
  digitalWrite (releBomba, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV1, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV2, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV3, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV4, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV1, RELAY_ON);    // Retorno de líquido al Tanque
  digitalWrite (releBomba, RELAY_ON);  // Activar Bomba
  delay (10000);

  //Sensor de Flujo medición
  Serial.print ("FrecuenciaPulsos: ");
  Serial.print (frecuencia,0);
  Serial.print ("Hz\tCaudal: ");
  Serial.print (l_m,3);
  Serial.print (" L/m\t");

  if((frecuencia > 0) || (l_m > 0)){
    digitalWrite (releEV3, RELAY_ON);
    digitalWrite (releEV1, RELAY_OFF);
    delay (y);
    digitalWrite (releEV2, RELAY_ON);
    digitalWrite (releEV3, RELAY_OFF);
  }
}

```

```

    delay (y);
    digitalWrite (releEV4, RELAY_ON);
    digitalWrite (releEV2, RELAY_OFF);
    delay (y);
    digitalWrite (releBomba, RELAY_OFF);
    digitalWrite (releEV4, RELAY_OFF);
}

else {
    digitalWrite (releBomba, RELAY_OFF);
    digitalWrite (releEV1, RELAY_OFF);
    digitalWrite (releEV2, RELAY_OFF);
    digitalWrite (releEV3, RELAY_OFF);
    digitalWrite (releEV4, RELAY_OFF);
    FLiquido();
}
}

//*****

// Función para Activar Sistema de atomización de agua en Modo Manual
void SistemaManual (){
    selecManual = digitalRead(53);
    if(tiempoMuestreo >= (tiempo2 + 10000)){
        tiempo2 = tiempoMuestreo;           // Actualizar tiempo
        muestra = tiempo2/15000;             // Variable para contar muestras
        temperatura = dht.readTemperature(); // Leer Temperatura actual
        humedad = dht.readHumidity();       // Leer Humedad Relativa actual
    }

    while(selecManual == HIGH) {

```

```

if((temperatura<=0) || (humedad<=0) || isnan (temperatura) || isnan (humedad)){
  SFalla();
}
else{
  digitalWrite(releEstadoSistema, RELAY_OFF);
  calculoVPD();          // Función para calcular VPD
  imprimirVariables();
  digitalWrite (releBomba, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV1, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV2, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV3, RELAY_OFF);
  digitalWrite (releEV4, RELAY_OFF);

  RTanque = digitalRead(45);
  ASector1 = digitalRead(46);
  ASector2 = digitalRead(47);
  ASector3 = digitalRead(48);

  while(RTanque == HIGH) {
    digitalWrite (releEV1, RELAY_ON);
    digitalWrite (releBomba, RELAY_ON);
    digitalWrite (releEV2, RELAY_OFF);
    digitalWrite (releEV3, RELAY_OFF);
    digitalWrite (releEV4, RELAY_OFF);
    RTanque = digitalRead(45);
  }

  while(ASector1 == HIGH) {
    digitalWrite (releEV2, RELAY_ON);

```

```
digitalWrite (releBomba, RELAY_ON);
digitalWrite (releEV1, RELAY_OFF);
digitalWrite (releEV3, RELAY_OFF);
digitalWrite (releEV4, RELAY_OFF);
ASector1 = digitalRead(46);
}

while(ASector2 == HIGH) {
digitalWrite (releEV3, RELAY_ON);
digitalWrite (releBomba, RELAY_ON);
digitalWrite (releEV1, RELAY_OFF);
digitalWrite (releEV2, RELAY_OFF);
digitalWrite (releEV4, RELAY_OFF);
ASector2 = digitalRead(47);
}

while(ASector3 == HIGH) {
digitalWrite (releEV4, RELAY_ON);
digitalWrite (releBomba, RELAY_ON);
digitalWrite (releEV1, RELAY_OFF);
digitalWrite (releEV2, RELAY_OFF);
digitalWrite (releEV3, RELAY_OFF);
ASector3 = digitalRead(48);
}
selecManual = digitalRead(53);
}
}
}
```

## Anexo O. Interruptor Magnetotérmico



## DATA SHEET

Code: LE-411509

RESIDUAL CURRENT CIRCUIT BREAKER **LE-411509** ONE-PHASE, AC TYPE 30 mA  
25 A LEGRAND

Residual current circuit breaker with rated sensitivity of  $I_{\Delta n} = 30\text{mA}$ , AC type. The LE-411509 circuit breaker is compatible to DIN TS-35 rail mounting system.



Device type:	Residual current circuit breaker, One-phase, AC type
Rated sensitivity:	30 mA
Rated current:	25 A
Number of poles:	2
Breaking capacity:	10000 A
Rated voltage:	230 V AC / 50 Hz
Connectors type:	screw terminals
Main features:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Can be equipped with DX3 series signalling and remote tripping auxiliaries and motorised controls</li> <li>• Provided space for a label with description</li> <li>• Can be connected with using the supply busbars fork-type or prong-type</li> </ul>
Housing:	Plastic, DIN, TS-35 rail mounting
Width in 17.5 mm modules:	2
Weight:	0.186 kg

Anexo P. Interruptor Diferencial



**EBS1BLE**  
Residual Current Circuit Breaker  
with Over Current Protection

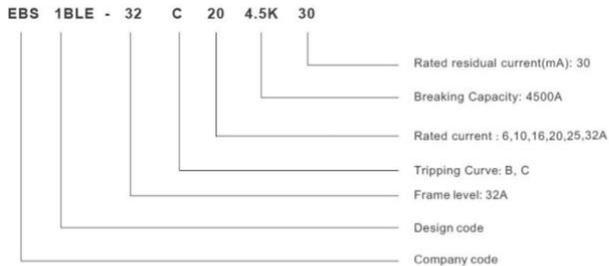


**Function**

- Switching and isolation function
- Protect against electric shock caused by direct contact or indirect contact
- Protect against fire hazard caused by insulation faults
- Can be used in housing, tertiary sector and industry
- Overload protection and short circuit protection



**Nomenclature**



**Features**

- Electromagnetic type, voltage independent

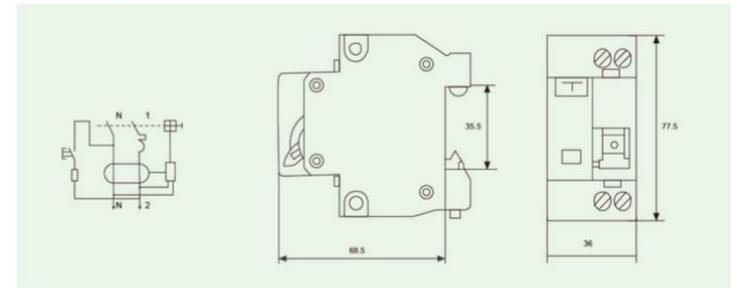
**Type**

- Type AC : For which tripping is ensured for residual sinusoidal alternating currents, whether suddenly applied or slowly rising.

**Technical Parameter**

Standard	IEC61009-1
Poles	1P+N
Rated current In (A)	6,10,16,20,25,32A
Rated voltage Un (V)	230V AC 50/60Hz
Tripping characteristic	B,C
Rated sensitivity currents, I $\Delta$ n(mA)	30
Rated short circuit breaking capacity	4500
Protection grade	IP20
Installation	installed on 35mm DIN rail

**Dimensions**



**Tripping Curve**

**Curve B:**

(3-5In) protect and control circuit against overload and short circuit; protect people and length cables in TN and IT systems.

**Curve C:**

(5-10In) protect and control circuit against overload and short circuit; protect resistive and inductive loads with low inrush current.

**Order Note**

Following items should be marked when ordering	Ordering sample
Product Name, Model&Frame level	To order the EBS1BLE RCBO,frame level 32A, rated current is 20A, tripping curve is C, rated residual current 30mA and quantity is 100 pieces, should be marked: RCBO EBS1BLE-32/C/20/30,100pcs
Rated current	
Rated residual current	
Tripping curve	
Quantity	

Anexo Q. Guardamotor

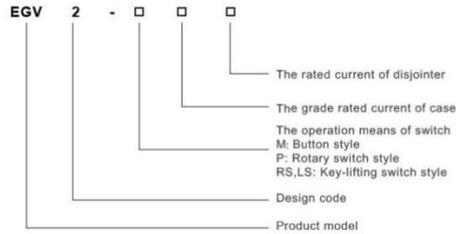
## EGV2 Motor Protection Circuit Breaker

### Application

EGV2 series motor protection circuit breakers are mainly used for the overload and short circuit protection of the motor in AC 50/60Hz, up to 660V, 0.1-80A, as a full-voltage starter to start and stop the motor, under the AC3 load or for the overload and short circuit protection of the equipment.



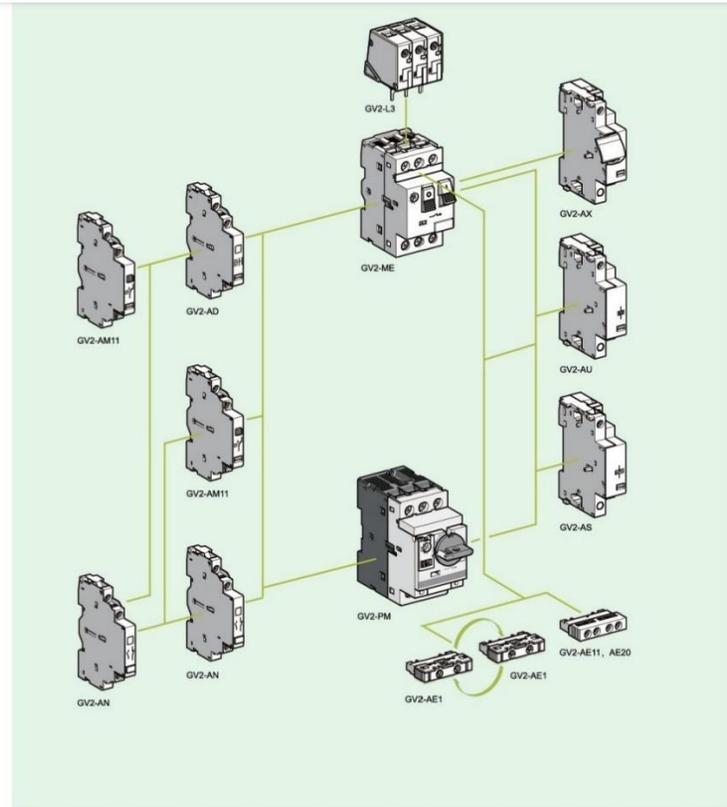
### Nomenclature



### Introduction

"EGV2 series motor protection circuit breaker adopts modular design, beautiful shape, small volume, open phase protection, with thermal relay built-in, functional and generality."

EGV2-MME conforms to IEC60947.2, IEC60947-4.1 and EN60947.1 standard. Switch and contactor can be composed of motor starter. Enclosure of EGV2 series with IP65 protection level. This series has three models: (EGV2-MME) controlled by button motor with thermal magnetic circuit breaker, (EGV2-RS) controlled by switch motor with thermal magnetic circuit breaker, (EGV2-LS) controlled by changeover switch motor with thermal magnetic circuit breaker (without thermal delay protection).



**Anexo R.** Manual de funcionamiento



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**MANUAL DE USUARIO**

**Sistema de control automático de Déficit de Presión de Vapor (VPD) mediante nebulización  
para cultivo de tomate Solanum Lycopersicum en invernadero**

**Autor: Díaz Alex**

Ibarra 2021

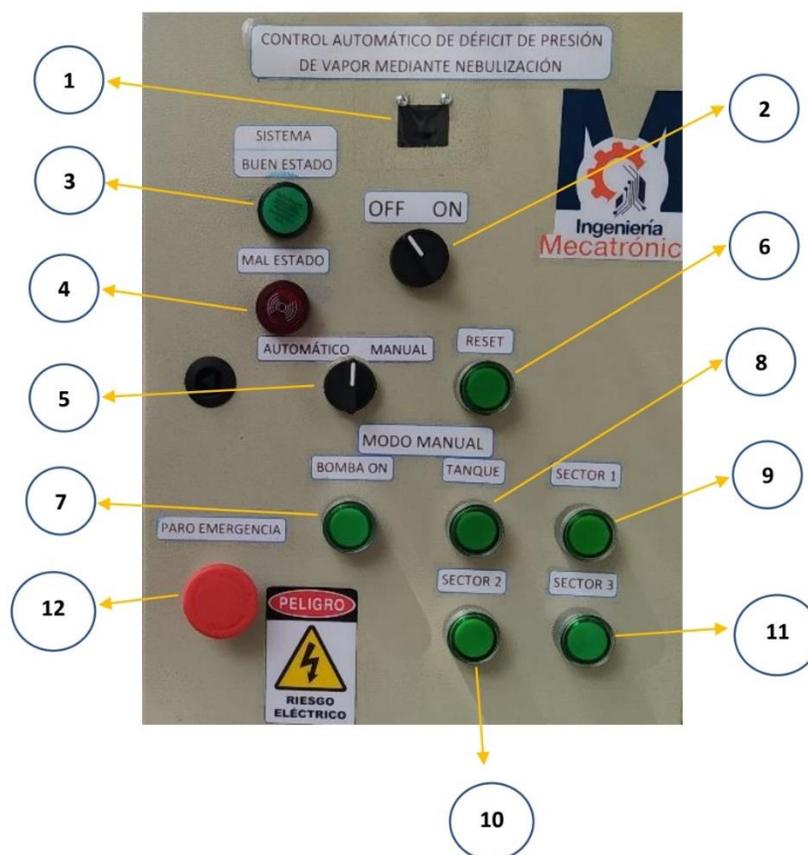
## 1. Introducción

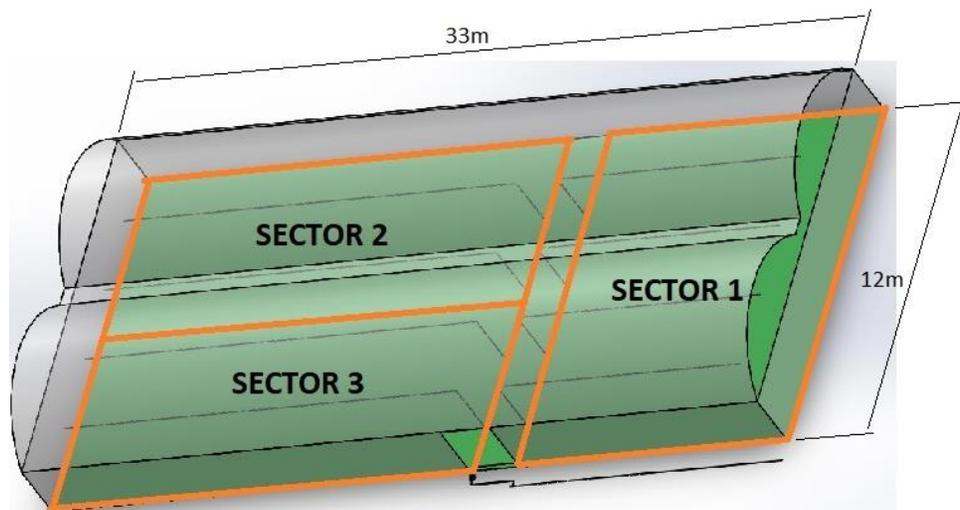
El manual de usuario tiene como finalidad ayudar al operador del sistema a dar un correcto uso del dispositivo, asimismo, dar a conocer los componentes internos y externos del módulo, como también indicar futuras advertencias que pueden aparecer en pantalla y que hacer en determinado caso.

## 2. Componentes del sistema

A continuación, se muestran los elementos que conforman el tablero de control y el sistema nebulizador. Además, en las tablas se puede observar detalles de los dispositivos, con estos datos el elemento puede ser reemplazado en caso de avería.

### 2.1. Componentes externos del tablero de control



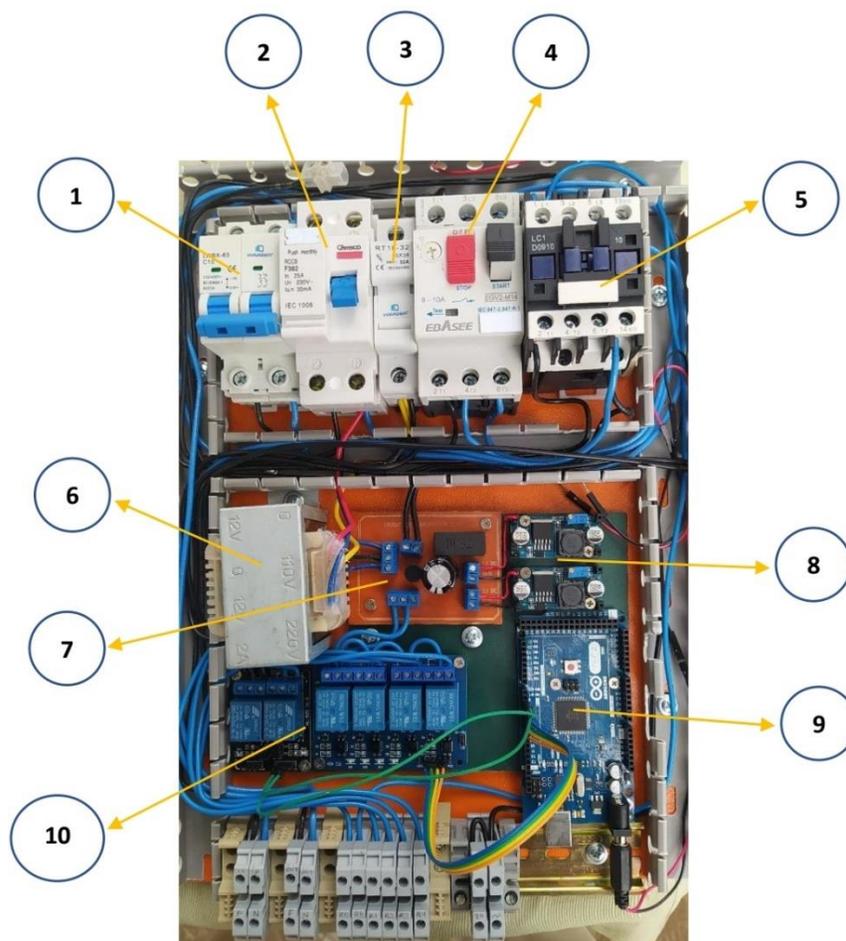
**Tabla 1**

Descripción de componentes externos del tablero de control

Número	Elemento	Descripción
1	Pantalla OLED	Permite visualizar información proveniente de la unidad de control
2	Selector 2 posiciones	Dispositivo que permite energizar o desenergizar el sistema
3	Luz piloto	Cuando esta luz se encuentra encendida, significa que el sistema funciona correctamente
4	Luz piloto	Cuando esta luz se encuentra encendida, significa que el sistema no está funcionando adecuadamente (revisar apartado de alertas)
5	Selector 3 posiciones	Dispositivo que permite al usuario seleccionar el modo de trabajo, este puede ser automático o manual, o en su defecto en

		la posición central solo indicará los valores de las variables temperatura, humedad y VPD en pantalla.
<b>6</b>	Pulsador	Al presionar este dispositivo la unidad de control es reiniciada
<b>7</b>	Pulsador	Este botón funciona solo si el sistema se encuentra en modo manual y al presionarlo se enciende la bomba
<b>8</b>	Pulsador	Este botón funciona solo si el sistema se encuentra en modo manual. Al presionarlo se abre la electroválvula que permite el retorno de agua al tanque y enciende la bomba de agua
<b>9</b>	Pulsador	Este botón funciona solo si el sistema se encuentra en modo manual. Al presionarlo se abre la electroválvula del sector 1 y enciende la bomba de agua para nebulizar el sector
<b>10</b>	Pulsador	Este botón funciona solo si el sistema se encuentra en modo manual. Al presionarlo se abre la electroválvula del sector 2 y enciende la bomba de agua para nebulizar el sector
<b>11</b>	Pulsador	Este botón funciona solo si el sistema se encuentra en modo manual. Al presionarlo se abre la electroválvula del sector 3 y enciende la bomba de agua para nebulizar el sector
<b>12</b>	Botón Emergencia	Al presionar el botón de emergencia el sistema deja de funcionar

## 2.2.Componentes internos del tablero de control



**Tabla 2**

Descripción de componentes internos del tablero de control

Número	Elemento	Descripción
1	Interruptor Diferencial	BREAKER DIFERENCIAL RIEL DIN 1P 25A
2	Interruptor Magnetotérmico	BREAKER MAGNETOTÉRMICO RIEL DIN 1P 10A
3	Fusible	BASE PORTAFUSIBLE 10X38 1P

4	Guardamotor	GUARDAMOTOR 6A-10A 1HP 3P
5	Contactador	CONTACTOR 8A 1HP Bobina 24AC
6	Transformador	TRANSFORMADOR 110/24 VAC
7	Rectificador	Fuente rectificadora de voltaje AC-DC
8	Modulo Regulador	ESTABILIZADOR DESCENDENTE DC-DC LM2596 1.23-3.7V 2A
9	Unidad de Control	ARDUINO MEGA 2560
10	Módulo de Relés	RELÉ 5V 10A 1-4 Y 1-2 CANALES

### 2.3. Componentes del sistema nebulizador



**Tabla 3**

Descripción de componentes del sistema nebulizador

Número	Elemento	Descripción
1	Bomba de Agua	Bomba eléctrica periférica para agua 1/2 HP, Pedrollo
2	Electroválvula	Hunter PGV-100-JTG-B 24VAC 1" NPS, este dispositivo permite el retorno de agua al tanque
3	Electroválvula	Hunter PGV-100-JTG-B 24VAC 1" NPS, este dispositivo permite el paso del agua para nebulizar el sector 1
4	Electroválvula	Hunter PGV-100-JTG-B 24VAC 1" NPS, este dispositivo permite el paso del agua para nebulizar el sector 2
5	electroválvula	Hunter PGV-100-JTG-B 24VAC 1" NPS, este dispositivo permite el paso del agua para nebulizar el sector 3

### 3. Funcionamiento

#### 3.1. Encendido del sistema

Para dar inicio al sistema es necesario permitir el paso de corriente eléctrica a los elementos que conforman el módulo, para esto hay que girar la perilla al lado derecho, como se indica en la imagen.



### 3.2. Modo Automático

El tablero de control dispone de un selector de tres posiciones, si la perilla está posicionada a la izquierda el sistema será capaz de realizar el control automático del Déficit de Presión de Vapor sin la intervención humana.



### 3.3. Modo Manual

Por otra parte, si la perilla está posicionada a la derecha el sistema trabajará en modo manual, y se mantendrá a la espera de que el ser humano presione uno de los botones de comando para realizar una acción.

### 3.4. Paro de Emergencia

El pulsador de parada de emergencia es un dispositivo que desactiva todas las opciones del sistema, es decir, cuando este haya sido presionado el usuario no podrá realizar ninguna acción manual, además, el sistema dejará de tomar mediciones de las variables y no las controlará.

Este elemento debe ser presionado en caso de observar que el sistema no funciona de la manera en la que está programado. Por ejemplo, en caso de que exista una fuga de agua en el sistema de tuberías, o en caso de observar que los sensores estén en peligro.



#### 4. Mantenimiento

Para alargar la vida útil de los componentes que conforman el sistema de control automático y el sistema de nebulización, es necesario realizar un mantenimiento periódico. A continuación, se describen las actividades que se debe llevar a cabo para conservar el sistema en general.

**Tabla 4**

Descripción de actividades a realizar

<b>Tiempo</b>	<b>Actividad</b>
Diario	Verificar funcionamiento de la pantalla OLED
	Verificar funcionamiento del sensor de temperatura y humedad
	Verificar funcionamiento del sensor de caudal
Semanal	Revisar si existen fugas de agua en la red de tuberías del sistema nebulizador
	Revisar impermeabilidad del gabinete
	Revisar boquillas de nebulización
	Verificar funcionamiento de relés

	Verificar activación de electroválvulas
Mensual	Revisar unidad de control (Arduino Mega 2560)
	Revisar transformador, rectificador y reguladores
	Revisar cableado visible de electroválvulas
	Verificar funcionamiento de selectores e interfaz de tablero de control
Trimestral	Verificar continuidad de los componentes internos del gabinete
	Revisar el cableado
	Revisar terminales de componentes de potencia
	Revisar la bomba eléctrica y sus conexiones

## 5. Advertencias y Soluciones

Es necesario mencionar que el sistema podría tener fallas comunes, las cuales pueden ser fácil solución. A continuación, se describen las posibles causas del fallo y un consejo para su solución.

**Tabla 5**

Posibles causas de fallo en el sistema y sus soluciones

<b>Problema</b>	<b>Causa</b>	<b>Solución</b>
Sistema no enciende	No hay energía eléctrica	Revisar alimentación
	Selector averiado	Revisar continuidad
	Breaker magnetotérmico	Verificar si los breakers se han

	averiado	activado
	Breaker diferencial averiado	
	Componentes de potencia quemados	Reemplazar el componente
	Pines mal conectados	Revisar conexiones
Sistema de nebulización no se activa	Sensores dañados	Reemplazar dispositivos
	Fusibles del sistema de control en mal estado	Revisar continuidad del elemento o reemplazarlo
	Transformador desconectado	Revisar alimentación
	Bomba averiada	Verificar su funcionamiento en modo manual
	Llaves de paso de agua cerradas	Revisar válvulas manuales
	Red de tubería obstruida	Probar en modo manual
	Nebulizadores taponados	Verificar las boquillas nebulizadoras
	Contactador dañado	Revisar la bobina del contactor
	Módulo de relés quemado	Verificar su funcionamiento en modo manual
Pantalla con interferencias	Cables de alimentación y señales desconectados	Revisar los pines de la pantalla
	Cableado en mal estado	Remplazar cables
	Existe ruido externo	Verificar algún tipo de ruido externo y tratar de reducirlo

Activación del sistema nebulización fuera de los rangos determinados	Unidad de control en mal estado	Reiniciar el sistema, en caso de no haber mejoras llamar al técnico
	Cables de entradas y salidas digitales en mal estado	Verificar y reemplazar cableado
	Contactador quemado	Revisar su activación en modo manual
	Sensores en mal estado	Verificar que las medidas mostradas en pantalla sean correctas
	Cortocircuito de electroválvulas	Revisar aislamiento en los pines de alimentación de las electroválvulas