



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGÓN

PROPUESTA DE CONTROL DE  
TEMPERATURA, HUMEDAD Y  
RIEGO EN EL INVERNADERO DE  
LA FES ARAGÓN

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA

PRESENTA  
ASHLEY ZULEIKA HERNÁNDEZ MORALES

DIRECTOR DE TESIS  
MTRO. JUAN GASTALDI PÉREZ



Nezahualcóyotl, Edo. de México

2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar a esta etapa de mi vida, en el que logro concluir mi carrera universitaria, un sueño por el que luche día a día y uno de los momentos más importantes de mi vida.

A mi mamá, que con su dedicación y amor me ha enseñado a no desfallecer ni rendirme ante nada y siempre perseverar a través de sus sabios consejos, corrigiendo mis fallas y celebrando mis triunfos.

A mi profesor Dr. Ismael Díaz Rangel, por transmitirme sus conocimientos, por su persistencia, su paciencia y su motivación que han sido fundamentales para mi formación.

A mi asesor Mtro. Juan Gastaldi Pérez, por haberme orientado, apoyado y corregido en mi formación y en el desarrollo de mi tesis.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, en donde decidí el rumbo de mi vida, quien fue mi segunda casa, donde por fin después de un largo camino concluyo la etapa más importante de mi vida y podré realizar el sueño que tanto he anhelado.

# CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>II</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>MOTIVACIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>6</b>
OBJETIVO GENERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
<b>METODOLOGÍA DE TRABAJO</b> .....	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 1. INVERNADEROS</b> .....	<b>8</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	8
1.1.1 <i>El primer invernadero</i> .....	9
1.2 TIPOS.....	10
1.2.1 <i>Invernadero Plano o Tipo Parral</i> .....	11
1.2.2 <i>Invernadero en Raspa y Amagado</i> .....	12
1.2.3 <i>Invernadero Asimétrico o Inacral</i> .....	13
1.2.4 <i>Invernadero de Capilla</i> .....	14
1.2.5 <i>Invernadero de Doble Capilla</i> .....	14
1.2.6 <i>Invernadero Túnel o Semicilíndrico</i> .....	15
1.2.7 <i>Invernaderos de Cristal o Tipo Venlo</i> .....	16
1.3 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS.....	17
1.3.1 <i>Riego</i> .....	17
1.3.2 <i>Fertirrigación</i> .....	17
1.3.3 <i>Hidroponia</i> .....	18
1.3.4 <i>Calefacción</i> .....	18
1.3.5 <i>Refrigeración</i> .....	19
1.3.6 <i>Humidificación</i> .....	20
1.3.7 <i>Iluminación</i> .....	20
1.3.8 <i>CO<sub>2</sub></i> .....	21
<b>CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DEL INVERNADERO A UTILIZAR</b> .....	<b>22</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	22
2.2 PLANOS DEL INVERNADERO.....	22
2.3 CULTIVO.....	24
2.3.1 <i>Características del jitomate</i> .....	24
2.4 PARÁMETROS DE CALIDAD.....	26
2.5 SISTEMAS DE CONTROL EN EL INVERNADERO.....	27
<b>CAPÍTULO 3. PROPUESTA</b> .....	<b>28</b>
3.1 VARIABLES A CONTROLAR.....	28
3.1.1 <i>Riego</i> .....	28
3.1.2 <i>Sistema de control de temperatura</i> .....	29
3.1.3 <i>Humidificación</i> .....	30
3.2 HIPÓTESIS.....	31
3.3 PROTOTIPO.....	31
3.4 TIPOS DE CONTROLADORES.....	31
3.4.1 <i>Controlador Lógico Programable (PLC)</i> .....	32
3.4.2 <i>Procesador Digital de Señales DSP</i> .....	32
3.4.3 <i>Microprocesadores</i> .....	32
3.4.4 <i>Microcontrolador</i> .....	32

3.5	CONTROLADOR.....	33
3.6	SENSORES .....	34
3.6.1	<i>DHT11: Sensor de humedad/temperatura</i> .....	34
3.6.2	<i>YL38 y YL69; Sensor de humedad del suelo</i> .....	35
3.7	ACTUADOR.....	35
3.8	COMPONENTES EXTRA .....	36
3.8.1	<i>Pantalla LCD (Liquid Crystal Display)</i> .....	36
3.8.2	<i>Teclado Matricial 4x4</i> .....	37
<b>CAPITULO 4. CIRCUITERIA DEL SISTEMA .....</b>		<b>38</b>
4.1	ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE TEMPERATURA.....	38
4.1.1	<i>Sensor de temperatura</i> .....	38
4.1.2	<i>Etapas de enfriamiento</i> .....	38
4.1.3	<i>Etapas de calefacción</i> .....	39
4.2	SISTEMA DE HUMEDAD RELATIVA .....	39
4.2.1	<i>Sensor de humedad relativa</i> .....	39
4.2.2	<i>Etapas de humidificación</i> .....	40
4.3	ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO.....	40
4.3.1	<i>Sensor de humedad del suelo</i> .....	40
4.3.2	<i>Etapas de riego</i> .....	41
<b>CAPÍTULO 5. PROGRAMACIÓN.....</b>		<b>42</b>
5.1	CONTROL DEL CLIMA .....	42
5.1.1	<i>Modelado climático y su historia</i> .....	42
5.1.2	<i>Control difuso</i> .....	44
5.1.3	<i>Lógica difusa</i> .....	44
5.1.4	<i>Control difuso en sistemas con retroalimentación.</i> .....	44
5.1.5	<i>Lógica difusa en el invernadero</i> .....	45
5.1.6	<i>Clasificación difusa o fuzzificación</i> .....	45
5.1.7	<i>Diseñando reglas de control difuso (Defuzzificación).</i> .....	46
5.2	CONTROL DEL RIEGO .....	48
5.3	DIAGRAMAS DE FLUJO .....	49
5.4	ESQUEMA DEL SISTEMA PROPUESTO .....	50
<b>CAPÍTULO 6. PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>		<b>51</b>
6.1	RESULTADOS.....	51
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>53</b>
<b>TRABAJOS A FUTURO .....</b>		<b>54</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>55</b>
	ANEXO A: HOJA DE DATOS DEL ATMEGA328.....	55
	ANEXO B: HOJA DE DATOS DEL SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DHT11.....	58
	ANEXO C: HOJA DE DATOS DEL SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO.....	60
	ANEXO D: ARDUINO MEGA.....	63
	ANEXO E: LCD.....	64
	ANEXO F: TECLADO MATRICIAL.....	66
	ANEXO G: PROGRAMA .....	68
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>76</b>

## INTRODUCCIÓN

Desde siempre, la agricultura se ha visto afectada por factores externos como lluvia, viento o granizo, que hasta hace poco no se podían controlar sino empleando técnicas de riego, fertilización o cultivo bajo abrigo. Los avances de la ciencia y la tecnología en las últimas décadas han sido espectaculares, impulsando todas las ramas del saber humano incluida la agricultura. Actualmente, en el ámbito agronómico, existen nuevos conceptos que engloban y dan cuenta de avances que están contribuyendo a revolucionar todas las ramas de la agricultura.

Los invernaderos son estructuras de diversas formas y tamaños que tienen la capacidad de generar condiciones de temperatura y humedad ideales para cultivar plantas durante el invierno, o en sectores donde las condiciones climáticas son muy adversas. Las plantas y árboles necesitan de ciertas condiciones climáticas específicas para su cultivo, por ejemplo, el jitomate no resiste de buena forma las heladas, así que con los invernaderos se pueden cultivar estas plantas.

Para el diseño de un invernadero y su clima interno debemos tener en cuenta parámetros tan importantes como la temperatura, la humedad, la radiación y la concentración de CO<sub>2</sub>. Las ventajas del sistema de invernaderos automatizados es: la mayor productividad por m<sup>2</sup>, la garantía de tener una producción de calidad, el control eficiente de plagas y enfermedades del cultivo, un mayor control de los factores ambientales para poder producir fuera de época, tener las condiciones ambientales para producir cultivos inicuos, y tener más oportunidad de comercializar cultivos de alta calidad en un mercado competitivo.

El invernadero, su cultivo, y su administración forman un sistema. Un modelo es una representación simplificada de estos sistemas. El conjunto de expresiones matemáticas que describen el comportamiento del invernadero constituyen lo que se llama un modelo climático. La formulación de modelos climáticos permite predecir el comportamiento de las diferentes variables que integran el agrosistema del invernadero, para condiciones climáticas específicas de cada región; y sus interacciones. La utilidad de los modelos es múltiple en el diseño de herramientas de ingeniería, permiten comprender cómo se produce el ambiente protegido en función de las condiciones meteorológicas exteriores, sirven para interpretar las observaciones del clima y del comportamiento de los cultivos, proveen información para el diseño de invernaderos y sistemas de control automático.

Sin embargo, la modelación matemática del ambiente físico en nuestro país es muy escasa, debido a que la tecnología de producción en invernadero es relativamente nueva, por lo que hay una gran necesidad de generarla, ya que la tecnología existente es del extranjero y para nuestros agricultores no suele ser rentable la instalación de invernaderos por el gran capital económico que se requiere y ahora si hablamos de un invernadero automatizado la cifra se podría triplicar.

En este trabajo de tesis se presenta el sistema de control automático del invernadero, que se basa en la modelación climática en ambiente controlado de los sistemas de temperatura y humedad relativa, y el sistema de riego por goteo

del invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón. Para éste se diseñó un prototipo a escala del invernadero, para realizar pruebas para el mejoramiento de los sistemas y del sensado de las diferentes variables que lo conforman.

Uno de los principales objetivos de este trabajo fue el dar una solución práctica a los problemas que presentan los invernaderos semiautomatizados. Específicamente se centró en los problemas que agravian el invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, como el excesivo consumo de energía eléctrica, el mal sensado de las principales variables, así como el desperdicio de agua.

En esta tesis se utilizó un microcontrolador ATMEGA328P, ya que con este se puede tener el control de todas las variables de manera prácticamente simultánea, además de que tiene un fácil manejo. Con este se puede controlar de manera precisa los sistemas, ya que al utilizar sensores estos mandarían señales cuando se haya alterado alguna de las variables. Se utilizaron sensores adecuados para la medición de cada variable para el mejor desempeño del invernadero. Estos serán el medio por el cual el ATMEGA328P tomará las decisiones para activar los sistemas de acuerdo a las necesidades requeridas.

## MOTIVACIÓN

En la actualidad en nuestro país existen grandes necesidades de optimizar los recursos agrícolas, ¿Cómo nos vamos a alimentar en un futuro cuando el cambio climático agota las tierras y el agua disponibles?, tenemos que producir más alimentos con menores recursos. En la mayoría de los países en desarrollo, la agricultura sigue siendo la columna vertebral de la economía. Es crucial para ayudar a que las personas salgan de la pobreza y el hambre en las zonas rurales al ofrecerles una fuente de ingresos estable.

El cultivo bajo invernadero siempre ha permitido obtener producciones de primera calidad y mayores rendimientos, en cualquier época del año. Este incremento del valor de los productos permite que el agricultor pueda invertir tecnológicamente en su explotación mejorando la estructura del invernadero, los sistemas de riego y fertilización, los sistemas de gestión del clima, etc., que se reflejan posteriormente en una mejora de los rendimientos y de la calidad del producto final.

Además de que este tema es interesante me permite interactuar con las diferentes áreas de la ingeniería como son: comunicaciones, electrónica, agronomía, hidráulica entre otras.

## JUSTIFICACIÓN

En las décadas siguientes, la agricultura deberá afrontar, por una parte, una demanda creciente en alimentos y materias primas básicas, y a la necesidad de utilizar los recursos sin causar degradación o agotamiento del ambiente. Las civilizaciones generalmente han prosperado durante los periodos de clima benigno, incluso muchas fueron incapaces de optimizar sus prácticas agrícolas para ayudar al control del sistema natural; por ello la historia documenta la caída de los sistemas socioeconómicos que no tuvieron capacidad para responder a los cambios del clima o en los recursos de agua y suelo.

Se tiene muchas ventajas al tener cultivos bajo invernadero, esto evita los cambios bruscos del clima como la variación de temperatura, la escasez o exceso de humedad. También se puede producir cultivos en las épocas del año más difíciles teniendo cosechas fuera de temporal, sustituyendo el clima de otras regiones y alargando el ciclo del cultivo. Otra de las ventajas es el de obtener productos de mejor calidad y una mayor producción en la cosecha, y así incrementar la economía.

Al optimizar los recursos al máximo con la ayuda de la ingeniería se tiene un ahorro considerable de energía eléctrica y agua. Este último es un problema grave en nuestro país el 78% del agua es para uso agrícola con una eficiencia de riego del 45%. Hoy en día, en México existen alrededor de 20,000 hectáreas bajo agricultura protegida de las cuales aproximadamente 12,000 son de invernadero y las otras 8,000 corresponden a malla sombra y macrotúnel entre otras estructuras. Los principales cultivos que se producen bajo agricultura protegida son el jitomate (70%), pimiento (16%) y pepino (10%).

Gracias al cultivo de jitomate, México se encuentra en el décimo lugar de productores de todo el mundo con una producción anual de 3 millones de toneladas; por otro lado, el jitomate es el tercer producto más exportado en el país y este cultivo convierte a México en el principal exportador mundial con una cifra de 1.5 millones de toneladas al año, es decir, el 50% de la producción total. Alrededor del 86% de las unidades de producción son inferiores a 0.5 hectáreas; el 11.5%, de 0.51 a 5, y el 2.5% tienen más de 5 hectáreas. Esto indica que la mayor parte de los agricultores tienen unidades muy pequeñas de producción, lo que limita su acceso a la tecnología, la capacitación y la asistencia técnica, así como a una mayor penetración en los mercados más exigentes.

Ahora si analizamos los costos de instalación de un invernadero nos encontraremos que estos serán muy elevados. Primero es necesario conocer y definir el mercado destino y las características del producto que demanda (tamaños, colores, grados de madurez y el tipo de empaque). Asimismo, es necesario que el terreno para el invernadero sea preferentemente plano y con buen acceso, y tener un clima sin temperaturas extremosas para evitar fuertes costos de calefacción en invierno o enfriamiento en verano. Además, se requiere de una fuente de agua permanente y suficiente. Por ejemplo, un invernadero de 1,000 m<sup>2</sup> con plantas de jitomate difícilmente podrá regarse con una noria o pipas de agua. Finalmente, es necesario considerar que un invernadero demanda de

mucha atención para las labores de producción, por lo que es indispensable la capacitación y el apoyo de un buen asesor técnico.

Por lo que se refiere a la evaluación económica es indispensable que se tome en cuenta que las inversiones de un invernadero son considerables. Por ejemplo, el invernadero de baja tecnología requiere para construirse de 350 a 500 pesos por metro cuadrado, es decir, un invernadero de 1,000 m<sup>2</sup> costaría entre 350,000 y 500,000 pesos. No obstante, luego de la inversión inicial, también se requiere de capital de trabajo. Dado que los costos de producción por cada 1,000 m<sup>2</sup> son de 100,000 a 120,000 pesos, será necesario soportar de alguna forma estos gastos hasta tener ventas e ingresos.

Finalmente, en un invernadero de 1,000 m<sup>2</sup> con baja tecnología obtendrás entre 20 y 25 toneladas de jitomate al año. Con estos factores en mente, la viabilidad del proyecto dependerá del precio al que se logre colocar el producto. Así, por ejemplo, si el precio promedio del jitomate es 7 pesos el kilo y el costo de producción de 5 pesos por kilo, se tendría una utilidad de 40,000 a 50,000 pesos anuales por 1,000 m<sup>2</sup>. La producción de cultivos bajo invernadero es una de las técnicas modernas que se utilizan actualmente en la producción agrícola, por lo que se tiene la necesidad de comprar equipo extranjero para la automatización de los invernaderos siendo estos de costos elevados aparte de la instalación que como vimos también es elevada, es por ello que diseñar un sistema capaz de controlar los factores que intervienen en el desarrollo de las plantas y reducir cada uno de los problemas que se presenta en el sector agropecuario a la vez de hacerlo que sea accesible en el precio ayudando así a evitar la compra de sistemas de control ya existentes, que debido a los excesivos costos, lucran con el campesino y en ocasiones éste no tiene la forma de adquirirlo.

Por eso es importante invertir en investigación y desarrollo de tecnologías. Es por eso que para el desarrollo económico de este país la inversión de invernaderos no es un lujo sino una necesidad.

# OBJETIVOS

## Objetivo General

Diseñar un sistema de control de las variables de Temperatura, Humedad Relativa y Riego para el cultivo de jitomate en el invernadero de la Facultad de Estudios Superiores. Manteniendo los valores de estas variables en los rangos recomendados de acuerdo a las necesidades de la planta sembrada en su interior, teniendo un sistema de bajo costo y que requiera poco mantenimiento, por lo que cualquier persona con un invernadero lo pueda adquirir.

## Objetivos Específicos

- Investigar tipos y características de los invernaderos.
- Investigar las características del invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón.
- Analizar los sistemas existentes en el invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón.
- Investigar las condiciones óptimas para cultivar jitomate.
- Investigar sistemas de control y entornos de programación para la automatización de invernaderos a bajo costo.
- Investigar sensores para medir temperatura, humedad relativa y humedad del suelo para obtener un mejor control en los rangos de las variables y tener un rendimiento óptimo.
- Investigar actuadores para riego y control de temperatura y humedad adecuados para lograr un ahorro considerable de agua y electricidad.

## METODOLOGÍA DE TRABAJO

El diseño del sistema de control se desarrolla mediante la programación del microcontrolador AVR ATmega328P, utilizando además los sensores DHT-11 el cual es un sensor de temperatura y humedad del aire y el módulo YL-69 un sensor de humedad del suelo los cuales nos servirán para saber las condiciones en el invernadero y si no se encuentran en el rango optimo poder modificar el parámetro que así lo requiera.

El sistema propuesto estará precargado con los valores adecuados para el cultivo de jitomate pero contará con un teclado y un display que nos servirá como interfaz entre el sistema y el usuario lo que le permitirá modificar los parámetros de acuerdo al cultivo.

Para controlar la temperatura se contará con un ventilador helicoidal que se encargará de la circulación del aire para disminuirla y con un calefactor para aumentarla. Mientras que para el control de la humedad se utilizará un sistema de nebulización (ficfog) que ayudará a incrementar la humedad relativa y para disminuirla se hará uso del mismo ventilador helicoidal.

En cuanto al riego se conservará el sistema de riego por goteo con el que cuenta el invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón modificando la activación de este de acuerdo a las condiciones de humedad del suelo y no por tiempo sin saber si el cultivo requiere agua como se encuentra actualmente.

# CAPÍTULO 1. INVERNADEROS

El invernadero es una estructura, habitualmente de manera semicilíndrica, que está protegida externamente por plástico o vidrio, de esta forma protege a las plantas del frío y la lluvia, ya que en su interior las condiciones climáticas son mucho más cálidas. La forma en que funcionan es muy sencilla, debido al plástico o vidrio que los recubre, tiene la capacidad de retener de mejor forma el calor en su interior. Por lo tanto, las plantas que no toleran el frío o mucha agua de lluvia, pueden ser cultivadas en un invernadero, el cual tiene la capacidad de generar un pequeño microclima.

La característica distintiva del invernadero, si se compara con la producción a campo abierto, es la presencia de una barrera entre el cultivo y el ambiente externo. Esta barrera crea un microclima en el interior (temperatura, humedad relativa, CO<sub>2</sub>, cantidad y calidad de luz, etcétera) que protege contra viento, lluvia, plagas, enfermedades y animales; además permite aplicar efectivamente el control biológico para proteger el cultivo. Todas estas características hacen que la producción en ambiente protegido tenga rendimientos más altos que a campo abierto.

El sistema de cultivo bajo invernadero proporciona un ambiente controlado y adecuado para la producción de cultivo de frutas, flores y hortalizas. El hecho de poder sembrar plantas fuera de temporada en cualquier época del año sin temor a que las plantas mueran debido a los cambios climáticos, es una de las principales ventajas de un invernadero. También nos otorga la capacidad de sembrar plantas poco antes de su época de desarrollo dentro del invernadero y cuando la temperatura sea propicia para los vegetales entonces retirarlos del invernadero y resembrarlos en el exterior, pudiendo así cosechar más cantidad de un mismo vegetal en los meses en los cuales crece normalmente.

Los invernaderos no solo son utilizados para sembrar y cosechar plantas para el consumo humano, sino que también es de gran utilidad para la investigación hacia las plantas como son: el tipo de tierra más propicia, cada cuánto tiempo hay que regarlas, las enfermedades mismas de las plantas y como tratarlas e incluso para ver si de alguna manera, esas plantas pueden ayudar a combatir enfermedades del ser humano. También es posible la hibridación de vegetales por medio de ingeniería genética dentro de los invernaderos, y así conseguir vegetales que puedan sobrevivir más fácilmente hasta su maduración, que posean mejor sabor y que sean más nutritivos al tener mayor cantidad de macronutrientes y minerales.

## 1.1 Antecedentes

En referencias históricas del uso de plantas de interior, dos cosas son obvias: en primer lugar, la introducción de plantas en macetas y en segundo lugar de la colocación de estas plantas en el interior. Mientras que las plantas nativas pueden crecer en macetas al aire libre, las plantas exóticas tienen requisitos climáticos especiales y se deben cultivar dentro.

Hacia finales del siglo IV A.C., las macetas eran ya una cosa normal y los jardines de azotea no eran tomados ya como algo fuera de lo común. Los egipcios ya sentían un gran amor por las plantas y las flores. No obstante, las pruebas escritas que demuestran la utilización de las plantas de interior data del siglo III A.C. Las plantas estaban en recipientes de arcilla y fueron colocadas en los patios de los palacios con propósitos ornamentales.

Las plantas de interior incluso existieron en Pompeya donde los resultados arqueológicos de las ruinas demuestran que los romanos también han utilizados el cultivo en maceta para uso de interior. Hay prueba que los atrios fueron adornados con numerosas plantas en flor y cestas que colgaban. El emperador Tiberius construyó invernaderos usando *Lapis specularis* (*Piedras de espejo*) que permitió dar una luz tenue en vez del sol directo. El utilizó el calor del sol para calentar el abono que era utilizado para abonar las plantas exóticas que Tiberius había recolectado en sus campañas.

### 1.1.1 El primer invernadero

Muchas de las plantas exóticas que fueron llevadas a Gran Bretaña no habrían sobrevivido a no ser por la existencia de los invernaderos. En 1545 se fundó el jardín botánico de Padua en Italia con fines académicos, para facilitar el aprendizaje y el conocimiento de las plantas medicinales (figura 1.1). Este sufrió modificaciones en su estructura alrededor en 1550 para introducir algunas partes de cristal y poder adaptar así las plantas más delicadas, aunque no fue hasta el siglo XVII que se utilizó ese material como técnica común para el cultivo de invernadero. Este invernadero se empleó sólo para el cultivo de plantas medicinales.



Figura 1.1 Grabado del jardín botánico de Padua, Italia

Estas son las bases fundamentales de los invernaderos modernos, siempre teniendo como objetivo la producción de plantas de distintos tipos de clima.

## 1.2 Tipos

Un invernadero es toda aquella estructura que protege al cultivo de las condiciones climatológicas externas, permitiendo su crecimiento y la realización de las labores culturales en el interior del mismo, durante todo su ciclo. Dentro de la cual es posible obtener unas condiciones artificiales de microclima, y con ello cultivar plantas fuera de estación en condiciones óptimas. En la construcción de un invernadero hay que tomar en consideración al menos los siguientes factores:

- Los materiales que configuran la estructura deben resistir los esfuerzos mecánicos a los que van a ser sometidos y no deformarse con el paso del tiempo. El peso de la propia estructura, el empuje del viento y la sobrecarga de nieve son los efectos más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar e instalar un invernadero.
- Los materiales de cobertura o recubrimiento han de ser resistentes a los factores climáticos adversos (lluvia, viento, nieve y granizo) y permitir la mayor transmisión posible de la radiación solar que reciben.
- La superficie y el volumen del invernadero tienen que ser lo suficientemente grandes como para permitir una mecanización que resulte utilizable rápida y cómodamente.
- La orientación y el diseño del invernadero han de reunir características tales que le permitan recibir la mayor radiación solar posible y que se produzca una renovación del aire satisfactoria, especialmente durante las épocas del año en que estos aspectos son más necesarios: solar en invierno y ventilación en verano.

Los invernaderos se pueden clasificar de distintas formas, según se atiende a determinadas características de sus elementos constructivos, por ejemplo: por su perfil externo, según su fijación o movilidad, por el material de cubierta, según el material de la estructura, etc. La elección de un tipo de invernadero está en función de una serie de factores o aspectos técnicos:

- Tipo de suelo. Se deben elegir suelos con buen drenaje y de alta calidad; aunque con los sistemas modernos de fertirriego es posible utilizar suelos pobres con buen drenaje o sustratos artificiales.
- Topografía. Son preferibles lugares con pequeña pendiente orientados de norte a sur.
- Vientos. Se tomarán en cuenta la dirección, intensidad y velocidad de los vientos dominantes.
- Exigencias bioclimáticas de la especie en cultivo
- Características climáticas de la zona o del área geográfica donde vaya a construirse el invernadero
- Disponibilidad de mano de obra (factor humano)
- Imperativos económicos locales (mercado y comercialización).

### 1.2.1 Invernadero Plano o Tipo Parral

Este tipo de invernadero se utiliza en zonas poco lluviosas. La estructura de estos invernaderos se encuentra constituida por dos partes claramente diferenciadas, una estructura vertical y otra horizontal.

La estructura vertical está constituida por soportes rígidos que se pueden diferenciar según sean perimetrales (soportes de cerco situados en las bandas y los esquineros) o interiores (pies derechos). Los pies derechos intermedios suelen estar separados unos 2.0 m en sentido longitudinal y 4.0 m en dirección transversal, aunque también se presentan separaciones de 2.0 m x 2.0 m y 3.0 m x 4.0 m. Los soportes perimetrales tienen una inclinación hacia el exterior de aproximadamente 30° con respecto a la vertical y junto con los postes que sujetan su extremo superior sirven para tensar las cordadas de alambre de la cubierta. Estos apoyos generalmente tienen una separación de 2.0 m, aunque en algunos casos se utilizan distancias de 1.5 m. Tanto los apoyos exteriores como interiores pueden ser rollizos de pino o eucalipto y tubos de acero galvanizado.

La estructura horizontal está constituida por dos mallas de alambre galvanizado superpuestas, implantadas manualmente de forma simultánea a la construcción del invernadero y que sirven para portar y sujetar la lámina de plástico.

Los invernaderos planos tienen una altura de cubierta que varía entre 2.15 m y 3.5 m y la altura de las bandas oscila entre 2.0 m y 2.7 m. Los soportes del invernadero se apoyan en bloques troncados piramidales, prefabricados de hormigón, colocados sobre pequeños pozos de cimentación. Este invernadero se muestra en la figura 1.2.

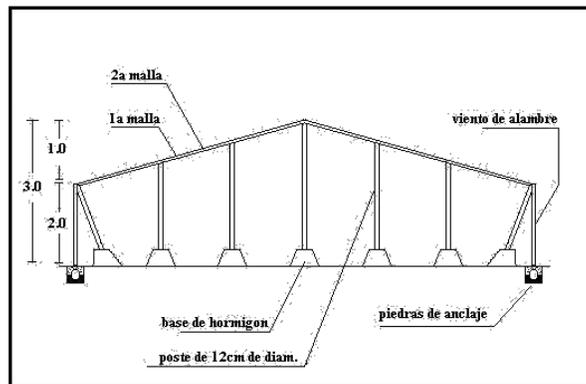


Figura 1.2 Invernadero tipo Plano o Parral.

Sus principales ventajas son:

- Su economía de construcción.
- Su gran adaptabilidad a la geometría del terreno.
- Mayor resistencia al viento.
- Aprovecha el agua de lluvia en periodos secos.
- Presenta una gran uniformidad luminosa.

Mientras que sus desventajas son:

- Poco volumen de aire.

- Mala ventilación.
- La instalación de ventanas cenitales es bastante difícil.
- Demasiada especialización en su construcción y conservación.
- Rápido envejecimiento de la instalación.
- Poco o nada aconsejable en los lugares lluviosos.
- Peligro de hundimiento por las bolsas de agua de lluvia que se forman en la lámina de plástico.
- Peligro de destrucción del plástico y de la instalación por su vulnerabilidad al viento.
- Dificil mecanización y dificultad en las labores de cultivo por el excesivo número de postes, alambre de los vientos, piedras de anclaje, etc.
- Poco estanco al goteo del agua de lluvia y al aire ya que es preciso hacer orificios en el plástico para la unión de las dos mallas con alambre, lo que favorece la proliferación de enfermedades fúngicas.

### 1.2.2 Invernadero en Raspa y Amagado

Su estructura es muy similar al tipo parral, pero varía la forma de la cubierta. Se aumenta la altura máxima del invernadero en la cumbrera, que oscila entre 3.0 m y 4.2 m, formando lo que se conoce como “raspa”. En la parte más baja, conocida como “amagado”, se unen las mallas de la cubierta al suelo mediante postes y horquillas de hierro que permite colocar los canalones para el desagüe de las aguas pluviales. La altura del amagado oscila de 2.0 m a 2.8 m, la de las bandas entre 2.0 m y 2.5 m.

La separación entre apoyos y los postes del amagado es de 2.0 m x 4.0 m y el ángulo de la cubierta oscila entre 6° y 20°, siendo este último el valor óptimo. La orientación recomendada es en dirección este-oeste. Este invernadero se ilustra en la figura 1.3.

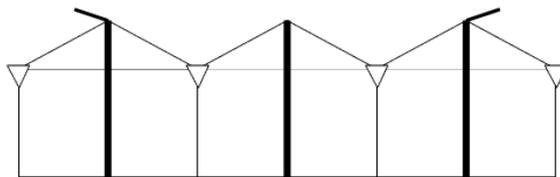


Figura 1.3 Invernadero del tipo Raspa y Amagado

Sus principales ventajas son:

- Su economía.
- Tiene mayor volumen unitario y por tanto una mayor inercia térmica que aumenta la temperatura nocturna con respecto a los invernaderos planos.
- Presenta buena estanqueidad a la lluvia y al aire, lo que disminuye la humedad interior en periodos de lluvia.
- Presenta una mayor superficie libre de obstáculos.
- Permite la instalación de ventilación cenital situada a sotavento, junto a la arista de la cumbrera.

Mientras sus principales desventajas son:

- Diferencias de luminosidad entre la vertiente sur y la norte del invernadero.
- No aprovecha las aguas pluviales.
- Se dificulta el cambio del plástico de la cubierta.
- Al tener mayor superficie desarrollada se aumentan las pérdidas de calor a través de la cubierta.

### 1.2.3 Invernadero Asimétrico o Inacral

Difiere del tipo raspa y amagado en el aumento de la superficie en la cara expuesta al sur, con objeto de aumentar su capacidad de captación de la radiación solar. Para ello el invernadero se orienta en sentido este-oeste, paralelo al recorrido aparente del sol.

La inclinación de la cubierta debe ser aquella que permita que la radiación solar incida perpendicularmente sobre la cubierta al mediodía solar durante el solsticio de invierno, época en la que el sol alcanza su punto más bajo. Este ángulo deberá ser próximo a  $60^\circ$ , pero ocasiona grandes inconvenientes por la inestabilidad de la estructura a los fuertes vientos. Por ello se han tomado ángulos comprendidos entre los  $8^\circ$  y  $11^\circ$  en la cara sur y entre los  $18^\circ$  y  $30^\circ$  en la cara norte.

La altura máxima de la cumbrera varía entre 3.0 m y 5.0 m, y su altura mínima de 2.3 m a 3.0 m. La altura de las bandas oscila entre 2.15 m y 3.0 m. La separación de los apoyos interiores suele ser de 2.0 m x 4.0 m. En la figura 1.4 se muestra una ilustración de este invernadero.

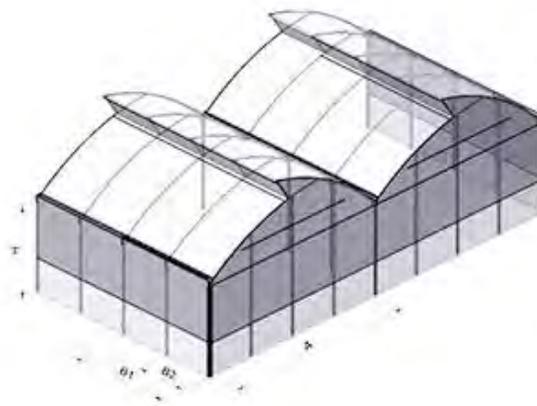


Figura 1.4 Invernadero tipo Asimétrico o Inacral

Sus principales ventajas son:

- Buen aprovechamiento de la luz en la época invernal.
- Su economía.
- Elevada inercia térmica debido a su gran volumen unitario.
- Es estanco a la lluvia y al aire.
- Buena ventilación debido a su elevada altura.
- Permite la instalación de ventilación cenital a sotavento.

Y sus principales desventajas:

- No aprovecha el agua de lluvia.
- Se dificulta el cambio del plástico de la cubierta.
- Tiene más pérdidas de calor a través de la cubierta debido a su mayor superficie desarrollada en comparación con el tipo plano.

#### 1.2.4 Invernadero de Capilla

Los invernaderos de capilla simple tienen la techumbre formando uno o dos planos inclinados, según sea a un agua o a dos aguas. En la figura 1.5 se muestra este tipo de invernadero.



Figura 1.5 Invernadero de Capilla

Sus principales ventajas son:

- Es de fácil construcción y de fácil conservación.
- Es muy aceptable para la colocación de todo tipo de plástico en la cubierta.
- La ventilación vertical en paredes es muy fácil y se puede hacer de grandes superficies, con mecanización sencilla. También resulta fácil la instalación de ventanas cenitales.
- Tiene grandes facilidades para evacuar el agua de lluvia.

Desventajas:

- Problemas de ventilación con invernaderos en baterías.
- A igual altura cenital, tiene menor volumen encerrado que los invernaderos curvos.
- Mayor número de elementos que disminuyen la transmitancia (mayor sombreo).
- Elementos de soportes internos que dificultan los desplazamientos y el emplazamiento de cultivo.

#### 1.2.5 Invernadero de Doble Capilla

Los invernaderos de doble capilla están formados por dos naves yuxtapuestas. Su ventilación es mejor que en otros tipos de invernadero, debido a la ventilación cenital que tienen en cumbrera de los dos escalones que forma la yuxtaposición de las dos naves; estas aberturas de ventilación suelen permanecer abiertas constantemente y suele ponerse en ellas malla mosquitera. Además, también

poseen ventilación vertical en las paredes frontales y laterales. En la figura 1.6 se ilustra este tipo de invernaderos.

Las dimensiones más comunes de estos invernaderos son de ancho de cada módulo 6,0 m, altura lateral de 2,4 m, altura cenital 3,6 m y abertura cenital: 0,3-0,5 m.

Los postes se plantan cada 2,0 m, tanto en el lateral como en la parte central, utilizándose postes sulfatados o bien, impregnados con brea al menos en los 0,40-0,60 m que van enterrados.

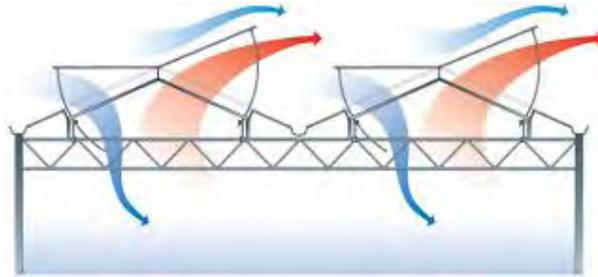


Figura 1.6 Invernadero tipo Doble Capilla

Ventajas:

- Construcción de mediana complejidad.
- Excelente ventilación (al igual que el diente de sierra), siendo muy adecuados para la conformación de baterías.
- Empleo de materiales de bajo costo

Desventajas:

- Sombreo mayor que capilla (debido a mayor número de elementos estructurales de sostén), pero menor que diente de sierra.
- A igual altura cenital, tiene menor volumen encerrado que los invernaderos curvos.
- Elementos de soportes internos que dificultan los desplazamientos y el emplazamiento de cultivos.

### 1.2.6 Invernadero Túnel o Semicilíndrico

Se caracteriza por la forma de su cubierta y por su estructura totalmente metálica. El empleo de este tipo de invernadero se está extendiendo por su mayor capacidad para el control de los factores climáticos, su gran resistencia a fuertes vientos y su rapidez de instalación al ser estructuras prefabricadas. Los soportes son de tubos de hierro galvanizado y tienen una separación interior de 5.0 m x 8.0 m o 3.0 m x 5.0 m. La altura máxima de este tipo de invernaderos oscila entre 3.5m y 5.0m. En las bandas laterales se adoptan alturas de 2.5 m a 4.0 m.

El ancho de estas naves está comprendido entre 6.0 m y 9.0 m y permiten el adosamiento de varias naves en batería. La ventilación es mediante ventanas cenitales que se abren hacia el exterior del invernadero. En la figura 1.7 se muestra una imagen de este tipo de invernadero.

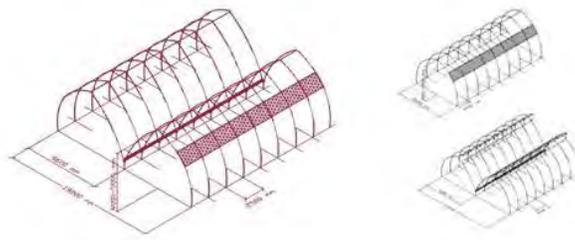


Figura 1.7 Invernadero de Túnel o Semicilíndrico

Sus principales ventajas son:

- Estructuras con pocos obstáculos en su diseño.
- Buena ventilación.
- Buena estanqueidad a la lluvia y al aire.
- Permite la instalación de ventilación cenital a sotavento y facilita su accionamiento mecanizado.
- Buen reparto de la luminosidad en el interior del invernadero.
- Fácil instalación.

Mientras que sus principales desventajas son:

- Elevado costo.
- No aprovecha el agua de lluvia.

### 1.2.7 Invernaderos de Cristal o Tipo Venlo

Este tipo de invernadero, también llamado “Venlo”, es de estructura metálica prefabricada con cubierta de vidrio y se emplean generalmente en el Norte de Europa.

El techo de este invernadero industrial está formado por paneles de vidrio que descansan sobre los canales de recogida de pluviales y sobre un conjunto de barras transversales. La anchura de cada módulo es de 3.2 m. Desde los canales hasta la cumbrera hay un solo panel de vidrio de una longitud de 1.65 m, y anchura que varía desde 0.75 m hasta 1.6 m. La separación entre columnas en la dirección paralela a las canales es de 3.0 m.

En sentido transversal está separadas 3.2 m si hay una línea de columnas debajo de cada canal, ó 6.4 m si se construye algún tipo de viga en celosía. En la figura 1.8 se muestra este tipo de invernadero.

Su principal ventaja es que tiene una buena estanqueidad lo que facilita una mejor climatización de los invernaderos.

Sus inconvenientes son:

- La abundancia de elementos estructurales implica una menor transmisión de luz.
- Su elevado costo.
- Naves muy pequeñas debido a la complejidad de su estructura.

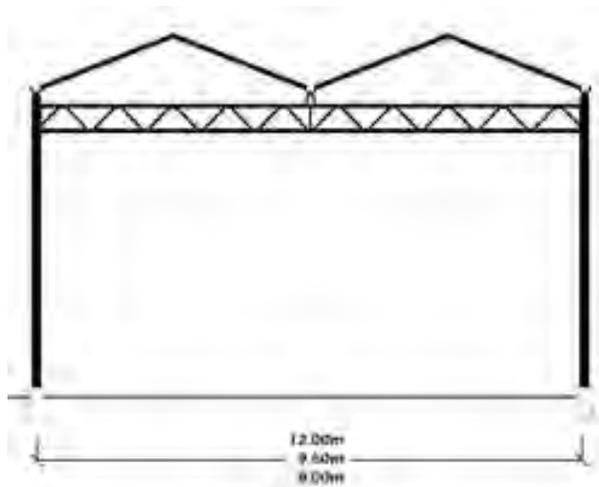


Figura 1.8 Invernadero del tipo Cristal o Tipo Venlo

## 1.3 Descripción de los Sistemas

### 1.3.1 Riego

El agua en las plantas es necesaria, ya que los tres átomos que constituyen su molécula, con la consiguiente polaridad de sus cargas eléctricas, facilitan mucho la disolución en agua de otras sustancias, y con esta pueden producir la fotosíntesis la cual es un proceso en el que la planta fabrica sustancias necesarias para su nutrición y desarrollo.

El riego consiste en aportar agua al suelo para que los vegetales tengan el suministro que necesitan (alimento) favoreciendo así su crecimiento, mientras que el fertilizante es una sustancia o mezcla química natural o sintética utilizada para enriquecer el suelo y favorecer el crecimiento vegetal. Se busca tener un equilibrio en el riego y la fertilización para que haya un ahorro de agua y la planta tenga un crecimiento óptimo.

En la mayor parte de los cultivos hortícolas se utiliza el riego como técnica habitual para conseguir la máxima producción. Existen varios sistemas de riego: el riego tradicional por gravedad, ya sea por desbordamiento, por inundación (a manta) o por surcos; el riego por aspersión, mediante sistemas fijos, semifijos y móviles, y el riego localizado (por goteo).

Existen varios sistemas de riego, entre los cuales sobresalen:

- Aspersión
- Puente móvil
- Goteo

### 1.3.2 Fertirrigación

El término fertirrigación se usa desde 1983, referido a la técnica de aplicar fertilizantes con el agua del riego o, en concreto, el riego con soluciones nutritivas. Según algunos autores, la fertirrigación es el método más racional de que

disponen ciertos países para realizar una fertilización automatizada respetando el medio ambiente. Su aplicación destaca en los cultivos hortícolas.

Fertilizante es una sustancia o mezcla química natural o sintética utilizada para nutrir el suelo y favorecer el crecimiento de la planta de forma natural.

### 1.3.3 Hidroponia

La palabra Hidroponia deriva del griego Hydro (agua) y Ponos (labor o trabajo) lo cual significa literalmente trabajo en agua. La Hidroponia es una ciencia que estudia los cultivos sin tierra.

#### 1.3.3.1 Sustrato

Se denomina sustrato a un medio sólido inerte que cumple dos funciones esenciales:

- Anclar y aferrar las raíces protegiéndolas de la luz y permitiéndoles respirar.
- Contener el agua y los nutrientes que las plantas necesitan.

Los gránulos componentes del sustrato deben permitir la circulación del aire y de la solución nutritiva. Se consideran buenos aquellos que permiten la presencia entre 15% y 35% de aire y entre 20% y 60% de agua en relación con el volumen total.

Muchas veces es útil mezclar sustratos buscando que unos aporten lo que les falta a otros, teniendo en cuenta los aspectos siguientes:

- Retención de humedad.
- Alto porcentaje de aireación.
- Físicamente estable.
- Químicamente inerte.
- Biológicamente inerte.
- Excelente drenaje.
- Poseer capilaridad.
- Liviano.
- De bajo costo.
- Alta disponibilidad.

### 1.3.4 Calefacción

La temperatura es la principal variable a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es la que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas; por tal motivo se desea tener la temperatura en un rango óptimo.

Existen varios sistemas de calefacción según el método a utilizar:

- Por agua caliente. Este sistema se basa en la transferencia de calor que se produce al hacer fluir un caudal de agua caliente por una tubería que recorre el interior del invernadero.

- Por vapor de agua. Es una variante del caso anterior; aquí el fluido que circula por una gran parte del circuito de calefacción es vapor de agua a media presión. Éste tiene peor uniformidad en la distribución del calor y humedece el ambiente.
- Por aire caliente. En este sistema el fluido circulante es una masa de aire previamente calentada en un generador de combustión directa o en un intercambiador de calor. En la combustión directa el aire es arrastrado hacia el interior del invernadero que contiene los gases de la combustión; éstos pueden resultar tóxicos para el cultivo, en especial si son portadores de etileno y óxidos de azufre o nitrógeno. Cuando se emplean combustibles libres de contaminantes, como son el gas natural o el gas licuado de petróleo, las emanaciones que resultan de la combustión, ricas en anhídrido carbónico y vapor de agua, pueden utilizarse a modo de fertilización carbónica.
- Mediante electricidad. La energía eléctrica puede utilizarse de distintas formas para generar calor. La más simple (termoventilador) consiste en calentar mediante resistencias eléctricas una masa refractaria que actúa como acumulador de calor, mientras un ventilador se encarga de distribuir el aire caliente por el interior del invernadero. Otra modalidad es la del cable radiante, que consiste en extender sobre una capa de material aislante un conductor eléctrico que, debido a su resistencia, transforma la energía eléctrica en energía calorífica.
- Mediante instalación solar. Una serie de colectores planos u ondulados, formados por dos láminas de cristal o de material plástico, por los que circula agua o diversas soluciones; captan la energía solar y la transfieren mediante una bomba de circulación o un acumulador de calor.
- Otras fuentes de energía. Se pueden emplear la energía geotérmica y la eólica para calentar invernaderos.

### 1.3.5 Refrigeración

Dependiendo del clima, a veces puede ser necesario enfriar un invernadero para proporcionar las condiciones adecuadas de crecimiento de las plantas que crecen en climas más fríos. Ya sea porque la temperatura se eleva demasiado en el verano o porque un cultivo de clima frío se está produciendo en una zona tropical, hay varias soluciones disponibles para reducir la temperatura dentro de un invernadero.

- Ventilación natural. Usa el movimiento natural del aire caliente y frío para mantener un clima templado en el invernadero mediante la utilización del efecto chimenea. Esto se logra mediante la apertura de los diferentes sistemas de ventilación, del invernadero: ya sean las ventanas cenitales o laterales, con apertura manual o mediante un motor. Promueve el control de la temperatura estable sin cambios bruscos o corrientes de aire que podrían dañar la salud de las plantas.
- Ventilación mecánica. Se expulsa el aire caliente del invernadero, con la ayuda de ventiladores de extracción, lo cuales crean una presión negativa.

Normalizando entonces la presión al permitir la entrada de aire fresco, con lo que se refresca el invernadero de manera efectiva. Hace que los cambios repentinos y bruscos de temperatura y crea corrientes de aire debido a la activación y/o desactivación de los ciclos.

- Nebulización. Enlazado al sistema de riego, esta solución refresca el invernadero mediante la dispersión de agua con un rociado muy fino. Esta niebla, conforme se evapora, refresca la temperatura dentro del invernadero. No se recomienda en climas templados o para cultivos susceptibles a hongos.
- Paneles de enfriamiento. Los paneles, están hechos de material de celulosa especial, se humedece y el aire caliente se enfría, evaporando el agua del panel, antes de ser canalizados de nuevo en el invernadero. Es útil para la refrigeración eficaz de grandes áreas. Requiere un clima cálido y seco para ser eficiente. Buena alternativa en vez de la nebulización con cultivos susceptibles a las enfermedades fungosas.

### 1.3.6 Humidificación

Humedad relativa (HR) es la cantidad de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura. Existe una relación inversa de la temperatura con la humedad, por lo que a elevadas temperaturas aumenta la capacidad de contener vapor de agua y disminuye la HR. Con temperaturas bajas la HR aumenta. Cuando la HR es excesiva las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, cuando la HR es mínima las plantas transpiran en exceso y se deshidratan.

Este sistema depende del lugar en el que se encuentra el invernadero, ya que en muchos ambientes no se requiere proporcionarle vapor, para elevar la HR. Uno de los sistemas más relevantes es el llamado “pared húmeda”, el cual se basa en una pared formada por fibras de cera que se encargan de distribuir agua por las celdas en esta pared. En el lado contrario de este dispositivo se ubica un extractor de aire, el cual succionará el agua en forma de rocío, la cual se distribuirá dentro del invernadero.

### 1.3.7 Iluminación

A mayor luminosidad en el interior del invernadero se debe aumentar la temperatura, la HR y el CO<sub>2</sub>, para que la fotosíntesis sea máxima; por el contrario, si hay poca luz pueden descender las necesidades de otros factores. Para mejorar la luminosidad natural se usan los siguientes medios:

- Materiales de cubierta con buena transparencia.
- Orientación adecuada del invernadero.
- Materiales que reduzcan al mínimo las sombras interiores.
- Aumento del ángulo de incidencia de las radiaciones sobre las cubiertas.
- Acolchado del suelo con plástico blanco.

Es interesante destacar el uso del blanqueo, el cual tiene la función de filtro para evitar algunos tipos de rayos solares, tales como los rayos UV; ya que esta labor está en función del desarrollo del cultivo y de las temperaturas, y tiene efectos contradictorios que hay que conocer para hacer un correcto uso. Hay que saber que la planta sombreada se ahíla y se producen abortos de flores en determinadas especies sensibles a la luz (especialmente tomate, pimiento y berenjena), por lo que el manejo del riego y de la solución nutritiva tiene que ir unida al efecto que produce el blanqueo. Los plásticos sucios o envejecidos provocan el mismo efecto que el blanqueo.

### 1.3.8 CO<sub>2</sub>

El anhídrido carbónico de la atmósfera es la materia prima imprescindible de la función clorofílica de las plantas. El enriquecimiento de la atmósfera del invernadero con CO<sub>2</sub>, es muy interesante en muchos cultivos. La concentración normal de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es del 0,03%. Este índice debe aumentarse a límites de 0,1-0,2%, cuando los demás factores de la producción vegetal sean óptimos, si se desea el aprovechamiento al máximo de la actividad fotosintética de las plantas. Las concentraciones superiores al 0,3% resultan tóxicas para los cultivos.

En los invernaderos en los que no se aplica anhídrido carbónico, la concentración de este gas es muy variable a lo largo del día. Alcanza el máximo de la concentración al final de la noche y el mínimo a las horas de máxima luz que coinciden con el mediodía. En un invernadero cerrado por la noche, antes de que se inicie la ventilación por la mañana, la concentración de CO<sub>2</sub> puede llegar a límites mínimos de 0,005-0,01%, que los vegetales no pueden tomarlo y la fotosíntesis es nula. En el caso de que el invernadero esté cerrado durante todo el día, en épocas demasiado frías, esa concentración mínima sigue disminuyendo y los vegetales se encuentran en situación de extrema necesidad en CO<sub>2</sub> para poder realizar la fotosíntesis. Los niveles aconsejados de CO<sub>2</sub> dependen de: la especie o variedad cultivada, la radiación solar, la ventilación, la temperatura y de la humedad. El óptimo de asimilación está entre los 18 y 23° C de temperatura, descendiendo por encima de los 23°-24° C. Respecto a la luminosidad y humedad, cada especie vegetal tiene un óptimo distinto.

El efecto que produce la fertilización con CO<sub>2</sub> sobre los cultivos hortícolas, es el de aumento de la precocidad de aproximadamente un 20% y aumento de los rendimientos en un 25-30%; mejora la calidad del cultivo, así como la de su cosecha.

Sin embargo, no se puede hablar de una buena actividad fotosintética sin una óptima luminosidad. La luz es factor limitante, y así, la tasa de absorción de CO<sub>2</sub> es proporcional a la cantidad de luz recibida, además de depender también de la propia concentración de CO<sub>2</sub> disponible en la atmósfera de la planta. Se puede decir que el periodo más importante para el enriquecimiento carbónico es el mediodía, ya que es la parte del día en que se dan las máximas condiciones de luminosidad.

## CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DEL INVERNADERO A UTILIZAR

El sistema a implementar se hará de acuerdo a las necesidades de uno de los invernaderos de la Facultad de Estudios Superiores Aragón en el cual se cultiva jitomate pero con la opción a modificar las variables para cualquier otro cultivo.

### 2.1 Características Generales

Cabe mencionar que la mayoría de los sistemas se simularán en maqueta, tales como la temperatura, humedad relativa y riego por medio de sensor.

El invernadero en el que se trabajará (figura 2.1) pertenece a la Facultad de Estudios Superiores Aragón. Su ubicación Av. Rancho Seco s/n, Impulsora Popular Avícola, C.P. 57130 Nezahualcóyotl, México, México. Coordenadas geográficas 19°28'32.3" latitud Norte, y 99°02'45.1" longitud Oeste, a una altitud de 2240 m. Orientación sureste-noroeste. Las características más importantes de este invernadero son: es de tipo túnel, sus dimensiones son de una longitud de 24 m x 6.60 m de ancho, con una altura bajo el canal 2.5 m y altura al cenit 4 m; Solo cuenta con sistema de riego por goteo controlado por tiempo.



Figura 2.1 Parte frontal del invernadero

### 2.2 Planos del Invernadero

En las siguientes páginas se mostrarán los planos de cómo está constituido el invernadero de forma externa (figura 2.2). La cual está formada por sus caras frontal (figura 2.3), trasera (figura 2.4), superior (figura 2.5) y lateral (figura 2.6).

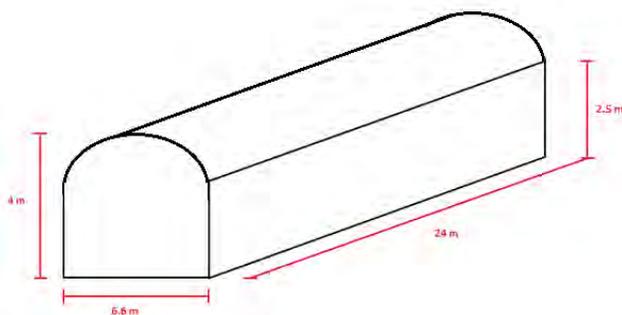


Figura 2.2 Vista general

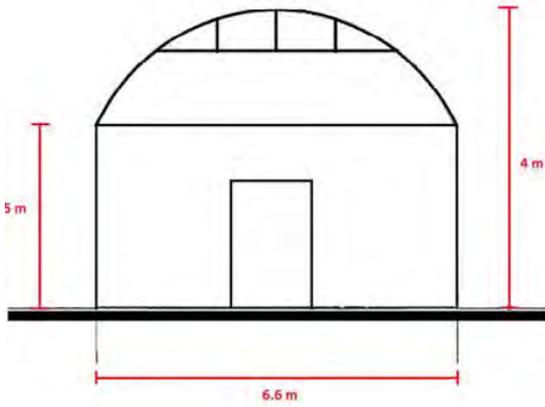


Figura 2.3 Cara frontal

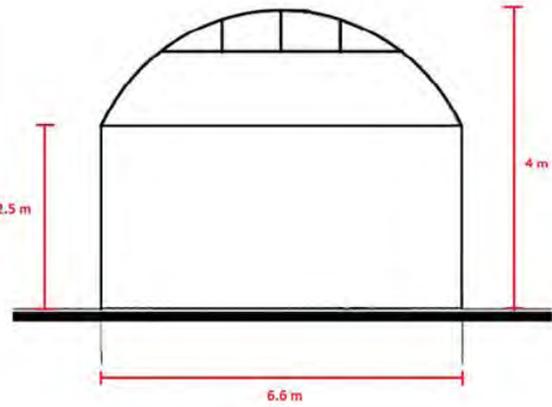


Figura 2.4 Cara Trasera

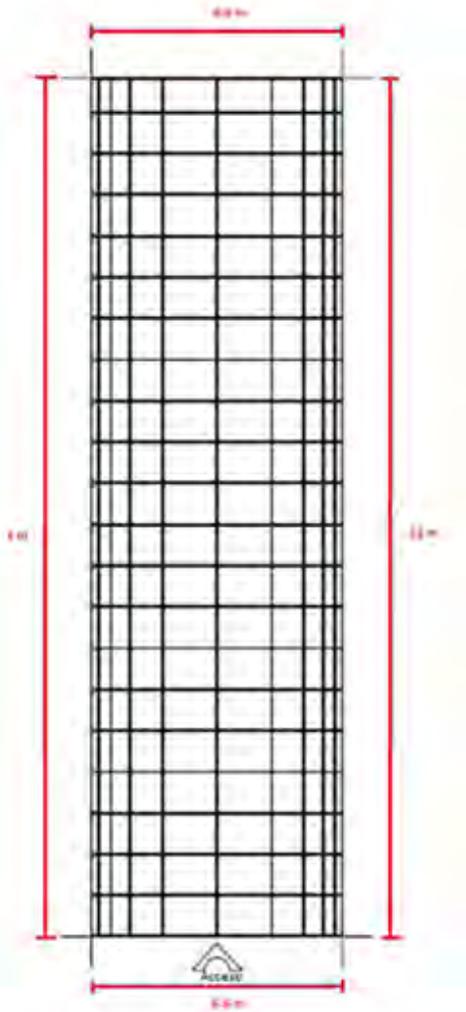


Figura 2.5 Cara superior

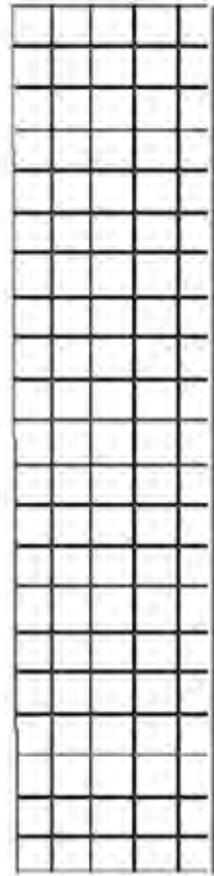


Figura 2.6 Cara Lateral

## 2.3 Cultivo

Existen 4 Invernaderos donde se cultivan diferentes plantas como jitomate, pepino, lechuga, chile, fresa y tulipanes. El invernadero en el que nos enfocaremos será el de jitomate el cual el ciclo del último cultivo fue del 10 de Agosto del 2016 al 27 de Noviembre del 2016. En éste se cultivó tomate con una cantidad de 198 plantas las cuales se les aplicó el sistema riego por goteo, con recirculación manual del agua. A cada planta se le aplicó aproximadamente de 3.2 a 3.5 litros de agua, aunque varió dependiendo de la etapa de crecimiento de la planta.

### 2.3.1 Características del jitomate

El jitomate es una planta de clima cálido pero se adapta muy bien a climas templados; por lo que en México se puede sembrar en gran parte del territorio, prefiriéndose aquellos ubicados en alturas entre los 100 y 1500 m.s.n.m. Este cultivo se puede sembrar todo el año, pero los problemas cambian según la época.

En el periodo de lluvias la incidencia de enfermedades es mayor mientras que en la época seca las plagas son el mayor problema. Sin embargo dichos problemas son superables mediante un conjunto de prácticas agrícolas que incluyan métodos de manejo y controles adecuados, los cuales tienen que ser realizados en el momento y la forma precisa en que se indican, ya que de estas depende el éxito de una buena cosecha.

#### 2.3.1.1 *Temperatura*

La temperatura del aire es el principal componente del ambiente que influye en el crecimiento vegetativo, desarrollo de racimos florales, el cuaje de frutos, desarrollo de los frutos, maduración de los frutos y la calidad de los frutos. Los rangos para un desarrollo óptimo del cultivo oscilan entre los 28° a 30° durante el día y 15° a 18° durante la noche. Temperatura de más de 35° y menos de 10° durante la floración provocan caída de flor y limitan el cuajado del fruto.

#### 2.3.1.2 *Humedad Relativa*

La humedad relativa óptima para el cultivo de tomate oscila entre el 65% y 70%, dentro de este rango se favorece el desarrollo normal de la polinización, garantizando así una buena producción, ya que si tenemos condiciones de baja humedad relativa la tasa de transpiración de la planta crece, lo que puede ocasionar estrés hídrico, cierre estomático y reducción de fotosíntesis, afectando directamente da polinización especialmente en la fase de fructificación cuando la actividad radicular es menor. Valores extremos de humedad reducen el cuajado de los frutos; valores muy altos, especialmente con baja iluminación, reducen la viabilidad del polen, y puede eliminar la evapotranspiración, reducir la absorción de agua y nutrientes y generen déficit de elementos como el calcio, induciendo desordenes fisiológicos, además esta condición es muy favorable para el desarrollo de enfermedades fungosas. Por otro lado valores muy bajos producen

grandes exigencias en la evapotranspiración, lo que puede generar que la planta aumente el consumo de agua y deje de consumir nutrientes, limitando su crecimiento y acumulando sales del medio, las cuales pueden llegar a ser un problema más, para el buen desarrollo del cultivo.

#### *2.3.1.3 Humedad del suelo*

Las plantas en su ambiente natural tienen que vivir, sin casi ninguna excepción en asociación con el suelo, una asociación conocida como relación suelo-planta. El suelo provee cuatro necesidades básicas de las plantas: agua, nutrientes, oxígeno y soporte. Se considera que un suelo ideal debe tener las siguientes condiciones: 45% de minerales, 5% de materia orgánica, 25% de agua y 25% de aire o espacio poroso. El tipo y la cantidad relativa de minerales, más los constituyentes orgánicos del suelo, determinan las propiedades químicas del suelo.

#### *2.3.1.4 Variedades*

El tipo de jitomate a sembrar dependerá del propósito de consumo y el mercado de destino; ya que podemos clasificarlo en tomate de mesa o ensalada y tomate de pasta, industrial o de cocina. Dependiendo de cuál tipo de tomate seleccionaremos, la variedad tendrá que cumplir con los requerimientos que el mercado demande, siguiendo características tales como: buena firmeza, buen porcentaje de sólidos solubles, resistencia al manipuleo y al transporte, etc. Además, el productor tiene que seleccionar aquellos materiales que tengan características de tolerancia o resistencia a enfermedades y plagas.

#### *2.3.1.5 Crecimiento*

Existen dos tipos de crecimiento: el determinado que son plantas arbustivas, con un tamaño de planta definido, donde en cada extremo del crecimiento aparece una yema floral, tienen periodos restringidos de floración y cuajado; y el indeterminado que son plantas donde su crecimiento vegetativo es continuo, florecen y cuajan uniformemente. Este tipo de crecimiento es el preferido para cultivarse en invernaderos.

#### *2.3.1.6 Preparación de la tierra*

La preparación de la tierra puede realizarse en forma mecánica, con tracción animal o labranza mínima dependiendo de las condiciones en donde se siembre. El suelo se debe preparar unos 30 días antes del trasplante, para poder sembrar la barrera vegetal, y así lograr que esta prueba tener un tamaño adecuado para cuando se trasplante el tomate. Deberá dividirse en las fases de sub-suelo, arado, rastreo, encamado y otras labores de preparación según sean las condiciones del terreno.

### 2.3.1.7 Riego

Existen diversos sistemas de riego como gravedad, aspersión, goteo, y su uso depende de la disponibilidad de recursos, pendiente del terreno, textura de suelo, abastecimiento y calidad de agua. Con cualquier sistema se debe evitar someter el cultivo a deficiencias o excesos de agua y es importante la buena distribución del riego durante todo el ciclo del cultivo, principalmente antes de la formación de frutos. El consumo diario de agua por planta adulta de jitomate es de aproximadamente 1.5 a 2 lt/día, la cual varía dependiendo de la zona, las condiciones climáticas del lugar, la época del año y el tipo de suelo que se tenga. El sistema más eficiente de los antes mencionados es el riego por goteo ya que es el que menos pérdidas de agua tiene además de ser el recomendado para trabajar el jitomate. En general, en riego por goteo se aplican entre 30 a 40 m<sup>3</sup> de agua/día, dependiendo del tamaño de la planta, población y época del año.

## 2.4 Parámetros de calidad

Se tuvo una calidad muy buena del producto, la cual se midió con los siguientes parámetros de calidad del jitomate: grados Brix (°Bx), consistencia y acidez titulable. Los grados °Bx representan el contenido de sólidos totales disueltos, principalmente azúcares y ácidos orgánicos. Comercialmente los tomates se encuentran entre 3°Bx y 5°Bx.

La acidez titulable cuantifica la cantidad de ácidos orgánicos que contiene una fruta, la cual es neutralizada por una base fuerte (hidróxido de sodio 0.01 normal) con ésta se mide la acidez determinada por el equilibrio entre los componentes ácidos del jitomate. El rango más común es de 3.5 (comercialmente).

La consistencia del fruto se manifiesta por medio de la persistencia en el tiempo, de la apariencia física externa e interna, la forma, la textura y la rigidez. Este parámetro se determina con el penetrómetro, el cual mide la resistencia del fruto a la penetración.

En el invernadero no se cuenta con el equipo necesario para poder medir su calidad por lo que solo podemos saber su consistencia y sabor. Se recurrió a observar el tiempo de vida en el anaquel, que son los días que dura un fruto en el cual no manifiesta cambios en su apariencia para que mantenga sus cualidades comerciales. Normalmente los tomates empiezan a presentar síntomas de deshidratación y/o descomposición a los 36 días mientras que los del invernadero duraron 2 meses. En la figura 2.7 se muestran los tomates antes de ser cosechados y se muestra la apariencia saludable que estos presentan.



Figura 2.7 Jitomates producidos en el ciclo Agosto-Noviembre de 2016

## 2.5 Sistemas de control en el invernadero

Actualmente el invernadero cuenta con un sistema de riego por tiempo, esto ocasiona que la planta esté muy húmeda o seca dependiendo la temporada y debido al simple control se tiene y un desperdicio considerable de agua.

Este invernadero cuenta con los siguientes componentes:

- Bomba centrífuga para agua, de 1 ½ HP que opera con 120 Vac. a 60 Hz, 3400 r/min. La cual es utilizada para el sistema de riego.
- Sistema de riego por goteo con 240 goteros equivalente a 55 m. de longitud.

Se propone un sistema control más seguro y eficiente que el ya utilizado, para poder tener una mejor calidad en el cultivo y proporcionar un ahorro de energía eléctrica y agua. Para esto explicaremos cada uno de los sistemas.

## CAPÍTULO 3. PROPUESTA

La rama principal del control a utilizar es la automatización. Ésta es la tecnología que trata de la aplicación de sistemas mecánicos y electrónicos y de bases computacionales para operar y controlar la producción. Esto nos trae como beneficios el incremento a la productividad, mayor seguridad para el obrero, y una mano de obra escasa. Mejora la calidad del producto y la reducción del tiempo de producción.

Un problema que tienen los invernaderos que no están automatizados es el desperdicio de energía eléctrica, al no tener una estrategia de control de los rangos superiores e inferiores de las variables. Este trabajo se encargará de establecer los rangos para el encendido y el apagado de los sistemas.

### 3.1 Variables a controlar

Para lograr un menor costo se busca un mayor ahorro de agua y energía eléctrica. Se conseguirá un mayor ahorro de agua al utilizar sensores para los sistemas de humedad y tener bien definido el tiempo para un sistema de nebulización que se encargará de bajar las altas temperaturas además de que el riego será por medio del sistema por goteo, el cual proporciona a la planta el agua requerida y la humedad del suelo constante sin llegar a desperdiciarla causando deficiencia de oxígeno y las consecuencias nocivas que con lleva.

#### 3.1.1 Riego

Uno de los sistemas más utilizados en horticultura es el riego por goteo, en el que el agua se distribuye a baja presión en zonas muy concretas del terreno (bulbo húmedo), donde se desarrolla un sistema radicular del cultivo, con una frecuencia tal que en todo momento quede garantizada una alta humedad en la zona que se riega. Resulta muy útil cuando se tienen problemas de salinidad o fitosanitarios del suelo o alto contenido de sales en el agua utilizada para el riego.

Lo que comúnmente se conoce como riego por goteo es de hecho, una combinación de varios tipos de sistemas de distribución de agua de bajo volumen y alta frecuencia. El término correcto para estos sistemas es microirrigación. Cada sistema de microirrigación se distingue por un tipo diferente de emisor (la parte que descarga el agua). Estos sistemas de microirrigación son los requeridos por los agricultores. Debido a que su necesidad de conservar el agua es cada vez mayor.

Algunos de estos sistemas literalmente distribuyen el agua gota por gota. Lejos de ser una tortura con agua, este tipo de sistema es la mejor forma de aprovechar el agua para las plantas. Manteniendo húmedas las raíces de las plantas (pero no al punto de saturación). Para el cultivo de jitomate humedad del suelo debe estar abajo de la capacidad de campo, es una planta altamente resistente a la sequía y extremadamente susceptible al exceso de humedad.

La humedad en la tierra será sensada utilizando el circuito integrado YL69, el cual es un sensor de humedad en suelo. Este le mandará una señal eléctrica al ATMEGA328P, el cual encenderá el sistema de riego por goteo cuando se necesite. En la figura 3.1 a) y b), veremos el sistema de riego por goteo con el que ya cuenta el invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón.



a) Sistema de riego por goteo

b) Gotero

Figura 3.1 Sistema con el que cuenta el invernadero de la FES Aragón.

### 3.1.2 Sistema de control de temperatura

El sistema cuenta con las etapas que son: de enfriamiento y calefacción. La calefacción depende del tipo de invernaderos, en este caso de túnel.

Para el control de temperatura se cuenta con dos etapas, la primera de calefacción la cual prende un calefactor de gas el cual funciona por medio de una bujía la cual emite una chispa para que se lleve a cabo la combustión del gas y un ventilador que se encarga de distribuir el calor cuando se tengan temperaturas bajas dentro del invernadero, la cual se puede mostrar en la figura 3.2.



Figura 3.2 Etapa de calefacción por medio de calefactor de gas.

La segunda etapa es de enfriamiento, en la cual se prendera un extractor el cual sacara el calor excesivo del invernadero cuando en éste se presenten temperaturas altas, tal como se muestra en las figuras 3.3.



Figuras 3.3 Etapa de enfriamiento por medio de extractores.

El invernadero tendrá un rango seguro de 12 °C a 32 °C, dependiendo del tipo de cultivo en este caso es el jitomate. Para esto, cuando se presenten temperaturas más bajas de 12 °C que es el límite inferior, se activará la etapa de calefacción que nos transferirá el calor por medio de convección, a través del fluido que en este caso es el aire. La etapa de enfriamiento se activará cuando la temperatura rebase el límite superior de 32 °C, sustrayendo el calor excesivo.

La temperatura será sensada utilizando el circuito integrado DHT11, el cual es un sensor de temperatura. Este le mandará una señal eléctrica equivalente a la temperatura al ATMEGA328P, el cual estará registrando la temperatura. El controlador encenderá el sistema cuando se tengan medidas cuando el rango seguro de temperatura este alterado.

### 3.1.3 Humidificación

Este sistema se implementará por medio de un sistema de nebulización para el caso de necesidad de humedad. El exceso de humedad en el aire en la Ciudad de México no se presenta, aunque en las noches frías el calefactor permite reducir. Esto será debido a que la humedad relativa es proporcional a la temperatura, entre menor sea la temperatura mayor humedad y mientras mayor temperatura habrá menor humedad. Con este sistema se busca tener la humedad en un rango seguro para el cultivo, para esto se medirá la humedad relativa con el sensor DHT11. Al igual que el sistema anterior se busca tener un rango seguro, que cuando éste se vea afectado encienda. Será igual al sistema anterior, pero con medidas de porcentaje de humedad relativa (HR). En la figura 3.4 se muestra este sistema.



Figura 3.4 Nebulización

La humedad relativa óptima oscila entre 60 y 80%. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades aéreas, el agrietamiento del fruto y dificultan la fecundación, debido a que el polen se compacta, abortando parte de las flores. El rajado del fruto igualmente puede tener su origen en un exceso de humedad edáfica o riego abundante tras un periodo de estrés hídrico. También una humedad relativa baja dificulta la fijación del polen al estigma de la flor.

En términos generales las necesidades óptimas para el desarrollo y producción del cultivo de jitomate son humedad relativa 60% máxima 70% mínima 50% y excelente ventilación para tener suficiente oxígeno y bióxido de carbono.

Es así, que lo que se busca es proporcionarle al invernadero una mejor optimización en el control de las variables, ahorro de energía y agua.

## 3.2 Hipótesis

Las hipótesis en las que se basa esta investigación son:

- Es posible controlar y mejorar el funcionamiento de un invernadero teniendo un sistema de bajo costo y poco mantenimiento, ya que los controladores que actualmente se utilizan en los invernaderos son muy costosos y foráneos, y su reparación necesita de especialistas extranjeros, además de que estos están adecuados a las condiciones de clima y de desarrollo tecnológico de los países de donde provienen y muchas veces no encajan con las exigencias de los invernaderos mexicanos.
- Con la ayuda de un controlador accesible es posible tener un control de las variables del invernadero (Temperatura, Humedad relativa y Riego), que éste con ayuda de los sensores adecuados tengan una rápida reacción y además poder controlar grandes cargas debido a su aplicación industrial.

## 3.3 Prototipo

Para hacer las pruebas de los sistemas de forma más práctica y rápida se llevó a cabo la construcción de una maqueta. Simulando todos los sistemas reales del invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón. Aunque se realizaron algunas modificaciones debido a su tamaño y por comodidad.

Se trató de asemejar lo más posible al invernadero real, se cuenta con dos extractores de aire de los cuales operan a 120 Vca. Para la etapa de calefacción se recurrió a una resistencia de alambre de tuxteno que va ser el sustituto del calefactor de gas. Se instaló el sistema de nebulización y se utiliza una bomba de agua de 120 Vca. Para los sistemas de riego se utilizaron una bomba de agua que opera a 120 Vca y el sistema por goteo. En la figura 3.5 se puede ver el prototipo.



Figura 3.5 Prototipo

## 3.4 Tipos de Controladores

Existen varios tipos de controladores, con los cuales se puede automatizar un sistema. Algunos de los controladores son: Controlador lógico programable (PLC), Procesador digital de señales (DSP), Microprocesador, Circuitos integrados programables (PIC), etc.

### 3.4.1 Controlador Lógico Programable (PLC)

EL PLC es un aparato electrónico operado digitalmente que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones, las cuales implementan funciones específicas, tales como lógicas, secuenciales, temporización, conteo y aritméticas, para controlar a través de módulos de entrada /salida digitales y analógicas, varios tipos de máquinas o procesos. Una computadora digital que es usada para ejecutar las funciones de un controlador programable, se puede considerar bajo este rubro. Se excluyen los controles secuenciales mecánicos. De una manera general podemos definir al controlador lógico programable a toda máquina electrónica, diseñada para controlar en tiempo real y en medio industrial procesos secuenciales de control. Su programación y manejo puede ser realizado por personal con conocimientos electrónicos, sin previos conocimientos sobre informática.

### 3.4.2 Procesador Digital de Señales DSP

DSP es el acrónimo de Digital Signal Processor, que significa Procesador Digital de Señal. Un DSP es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un juego de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Debido a esto es especialmente útil para el procesamiento y representación de señales analógicas en tiempo real: en un sistema que trabaje de esta forma (tiempo real) se reciben muestras (en inglés), normalmente provenientes de un conversor analógico/digital (ADC).

### 3.4.3 Microprocesadores

Un microprocesador es un circuito de alta escala de integración (chip programable), compuesto por miles de circuitos más simples como: flip flops, contadores, registros, decodificadores, comparadores, etc; todos ellos distribuidos internamente en varios bloques funcionales. También es conocido como Unidad Central de Procesamiento o CPU.

La programación de un microprocesador se refiere a la capacidad que éste tiene para que su función sea definida a través de un programa. El programa consta de una serie de instrucciones relacionadas, ejecutadas secuencialmente (una a la vez) por el microprocesador y que pueden implicar operaciones, por ejemplo: suministrar señales para los demás elementos del sistema, buscar y traer datos desde la memoria, transferir datos desde y hacia los dispositivos de entrada y salida, decodificar instrucciones, realizar operaciones lógicas o aritméticas, etc.

### 3.4.4 Microcontrolador

Es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de una computadora. Se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada y, debido a su reducido tamaño, suele ir incorporado en el propio

dispositivo que gobierna. Esta última característica es la que le confiere la denominación de consola incrustada.

El microcontrolador es un computador dedicado. En su memoria sólo reside un programa destinado a gobernar una aplicación determinada; sus líneas de entrada/salida soportan la conexión de los sensores y actuadores de dispositivo a controlar y todos los recursos complementarios disponibles tienen como única finalidad atender a sus requerimientos. Una vez programado y configurado el microcontrolador solamente sirve para gobernar la tarea asignada.

### 3.5 Controlador

El controlador utilizado para este trabajo es el ATMEGA328P trabajando con un teclado matricial y un LCD como interfaz entre el usuario y el sistema. Este microcontrolador es capaz de realizar diversas tareas, su diseño es compacto, tiene bajo costo y un amplio juego de operaciones.

Entre las principales características del ATMEGA328P sobresalen las siguientes:

- 32 x 8 registros de propósito general de Trabajo
- Hasta 20 MIPS de rendimiento a 20MHz
- 8 canales ADC de 10 bits en TQFP y QFN / FML
- USART programable
- 13 entradas digitales de las cuales 6 pueden ser PWM
- entradas analógicas

El entorno de programación a utilizar será el Arduino dado su simplicidad. Es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos. Puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada de toda una gama de sensores y puede afectar aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un ordenador, si bien tienen la posibilidad de hacerlo y comunicar con diferentes tipos de software.

La figura 3.6 se muestran los componentes básicos del sistema, incluyendo el microcontrolador ATMEGA328P, el teclado matricial y el LCD.

Al trabajar con este microcontrolador se podrán controlar todas sus variables, ya que cuenta con las entradas necesarias para su sensado y las salidas suficientes para activar los sistemas.

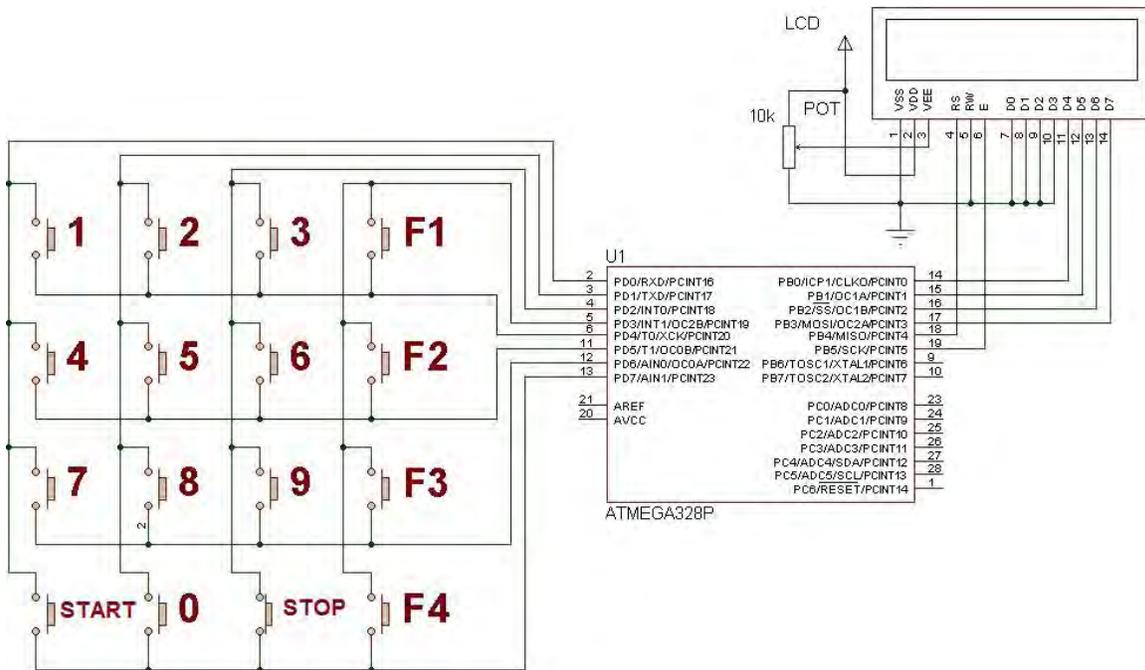


Figura 3.6 Componentes básicos del sistema

### 3.6 Sensores

Existen una gran variedad de sensores tanto de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, muchos de estos ya vienen integrados con su propio programador y solo necesita ser instalado por el usuario, por lo mismo suelen ser de costo elevado y son poco eficientes para los invernaderos ya que se necesitan un mínimo de tres y sacar el promedio para así saber qué es lo que se requiere activar. En esta tesis se ocuparan el sensor de temperatura y humedad relativa DHT11 ya que podemos obtener estos dos valores con un solo sensor y para la humedad del suelo se ocupara el módulo YL38 y YL69. Ambos sensores tienen el rango de fiabilidad que se necesita para usarlos en un invernadero.

#### 3.6.1 DHT11: Sensor de humedad/temperatura

El DHT11 es un sensor que proporciona una salida de datos digital. Entre sus ventajas podemos mencionar el bajo costo y el despliegue de datos digitales. Esto supone una gran ventaja frente a los sensores del tipo análogo, como el LM335 por ejemplo, en los cuales las fluctuaciones en el voltaje alteran la lectura de datos.

Entre las desventajas pues, el DHT11 solo lee enteros, no podemos leer temperaturas con decimales por lo que tenemos que pensarlo muy bien a la hora de utilizar este sensor para trabajos en los que se requieran lecturas precisas de temperatura y/o humedad. Para poder leer datos desde este sensor en el entorno de Arduino de una forma sencilla necesitamos descargar una librería que ha sido escrita para este propósito. La figura 3.7 se muestra el módulo de DHT11.

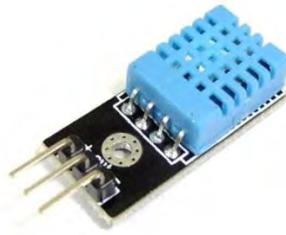


Figura 3.7 Modulo DHT11

### 3.6.2 YL38 y YL69; Sensor de humedad del suelo

Consiste en dos placas separadas entre sí por una distancia determinada. Ambas placas están recubiertas de una capa de material conductor. Si existe humedad en el suelo se creará un puente entre una punta y otra. Por lo tanto, al aumentar la humedad la corriente crece y al bajar la corriente disminuye, lo que será detectado por un circuito de control con un amplificador operacional que será el encargado de transformar la conductividad.

Habrà dos tipos de salidas, una analógica y una digital. La salida digital entregará un pulso bajo cuando haya conductividad suficiente entre cada una de las puntas. El umbral de disparo se puede establecer moviendo el potenciómetro del circuito de control.

En la salida analógica el nivel de voltaje dependerá directamente de cuanta humedad haya en el suelo. Es decir, dependiendo de cuanta conductividad (producto del agua en el suelo) haya entre las puntas del módulo.

Este módulo es muy útil en proyectos de control donde se requiera monitorear las condiciones del suelo, especialmente si se está trabajando con plantas que necesitan cuidados especiales. La figura 3.8 se muestra el módulo YL38 y YL69 que se utilizara.

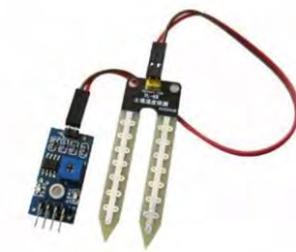


Figura 3.8 Sensor De Humedad Del Suelo YL38 Y YL69

## 3.7 Actuador

El invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón ya cuenta con bombas, ventilador, calefactor y el sistema de riego por lo que solo se necesita la electrónica de potencia adecuada para activar cada sistema. En este caso lo más conveniente es utilizar relevadores.

Un relé es un interruptor accionado por un electroimán. Un electroimán está formado por una barra de hierro dulce, llamada núcleo, rodeada por una bobina de hilo de cobre. Al pasar una corriente eléctrica por la bobina el núcleo de hierro se magnetiza por efecto del campo magnético producido por la bobina, convirtiéndose en un imán tanto más potente cuanto mayor sea la intensidad de la corriente y el número de vueltas de la bobina. Al abrir de nuevo el interruptor y dejar de pasar corriente por la bobina, desaparece el campo magnético y el núcleo deja de ser un imán. El relé es un dispositivo electromecánico que nos permite la conmutación de una línea eléctrica de media o alta potencia a través de un circuito electrónico de baja potencia. La principal ventaja y el motivo por el que se usa bastante en electrónica es que la línea eléctrica está completamente aislada de la parte electrónica que controla el relé. Es decir, podemos construir un circuito electrónico (un temporizador, una fotocélula, etc.) y, a través de un relé, controlar cualquier tipo de aparato conectado a la red eléctrica. En la figura 3.9 se muestra un ejemplo del relé.

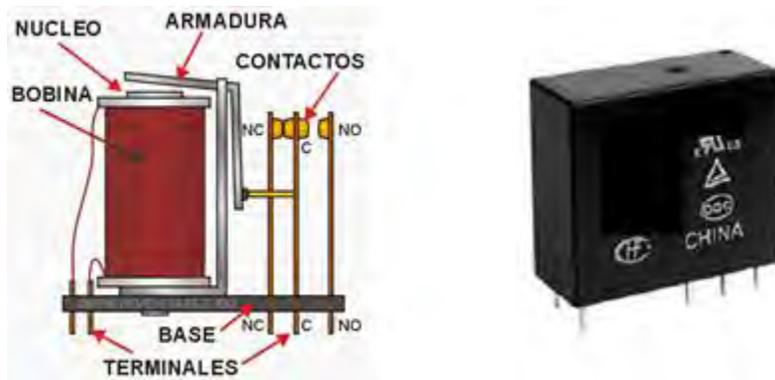


Figura 3.9 Relevador

### 3.8 Componentes extra

El sistema estará precargado con los datos necesarios para el cultivo del jitomate, pero el usuario podrá cambiar estos valores si así lo requiere, para ello se necesita una interfaz entre el usuario y el sistema por lo que es necesario utilizar una pantalla y un teclado.

#### 3.8.1 Pantalla LCD (Liquid Crystal Display)

Es un módulo de visualización electrónica y se puede encontrar en una amplia gama de aplicaciones. Un módulo de pantalla LCD de 20x4 es muy básico y es muy utilizado en diversos dispositivos y circuitos. Estos módulos se prefieren más de siete segmentos y otro segmento de múltiples LEDs. Las razones son: las pantallas LCD son económicas; fácilmente programables; no tienen limitación de visualizaciones especiales y aun caracteres personalizados (a diferencia de en siete segmentos), animaciones y demás. Un LCD 20x4 significa que puede mostrar 20 caracteres por línea y hay 4 líneas. En este LCD cada carácter se muestra en la matriz de píxeles 5x7. Este LCD tiene dos registros: Comando y Datos. En la figura 3.10 se muestra una pantalla.

El registro de comando almacena las instrucciones dadas a la pantalla LCD para hacer una tarea predefinida como inicializarlo, despejando su pantalla, ajustar la posición del cursor, el control de pantalla, etc. Las tiendas de registro de datos los datos que se muestran en la pantalla LCD. Los datos son el valor ASCII del carácter que se mostrará en la pantalla LCD.

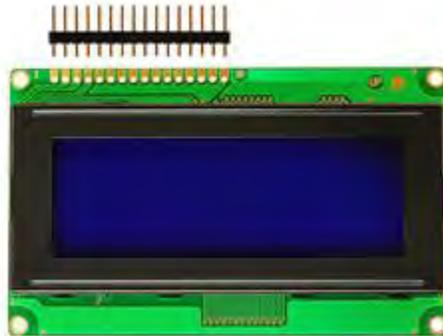


Figura 3.10 LCD

### 3.8.2 Teclado Matricial 4x4.

El teclado matricial 4x4 está constituido por una matriz de pulsadores dispuestos en filas (A, B, C, D) y columnas (1, 2, 3, 4), con la intención de reducir el número de pines necesarios para su conexión. Las 16 teclas necesitan sólo 8 pines del microcontrolador, en lugar de los 16 pines que se requerirían para la conexión de 16 teclas independientes.

Su funcionamiento es muy sencillo, cuando se presiona una tecla, se conectan internamente la fila y columna correspondientes. Si no hay ninguna tecla presionada, las filas están desconectadas de las columnas. En la figura 3.11 se muestra el teclado matricial.



Figura 3.11 Teclado Matricial

## CAPITULO 4. CIRCUITERIA DEL SISTEMA

Una etapa importante en la automatización de los sistemas, es la circuitería, ya que ésta es el vínculo entre el microcontrolador y las diferentes herramientas para el control del clima. La aplicación de los diferentes circuitos como etapas de potencia, etapas de acoplamiento para los sensores, y las etapas de control, nos dará una mayor optimización de los sistemas teniendo como resultado un mejor sensado y llegar a los valores deseados.

Se pretendió dar una aproximación real al prototipo (maqueta), tomando en cuenta las necesidades del invernadero real, utilizando las herramientas como ventilador, extractores de aire, calefactores y bombas de agua. La función de los circuitos es activar estas cargas cuando el controlador lo mande según las necesidades del sistema. A continuación, se dará una explicación de cada uno de los circuitos utilizados.

### 4.1 Activación del sistema de temperatura

Para el sistema de temperatura se necesita activar un ventilador o un calefactor dependiendo de las mediciones del sensor de temperatura DHT11, teniendo en cuenta no elevar o enfriar drásticamente la temperatura porque afectaría el cultivo ya que el jitomate es altamente sensible a estos cambios.

#### 4.1.1 Sensor de temperatura

Para este sistema se utilizó un sensor de temperatura DHT11 con su módulo. Las principales características de este se describen a continuación:

- Funciona con 3,3 y 5V de alimentación
- Rango de temperatura: de 0° a 50° con 5% de precisión (pero solo mide por grados, no fracciones)
- Rango de humedad: de 20% al 80% con 5% de precisión
- Muestra por segundo
- Bajo consumo
- Devuelva la medida en °C

Para el sistema de temperatura se cuentan con dos etapas de salida, una para el enfriamiento y otro para el calentamiento.

#### 4.1.2 Etapa de enfriamiento

La etapa de enfriamiento se basa en la activación de un extractor, el cual sacara el aire caliente o húmedo dentro del invernadero regulando la temperatura a valores deseados. En este caso el microcontrolador nos entregará una señal digital el relevador permitirá el paso de corriente a la carga. El circuito se compone de un transistor NPN, un diodo, y juego de resistencias para la amplificación adecuada, este circuito se muestra en la figura 4.1.

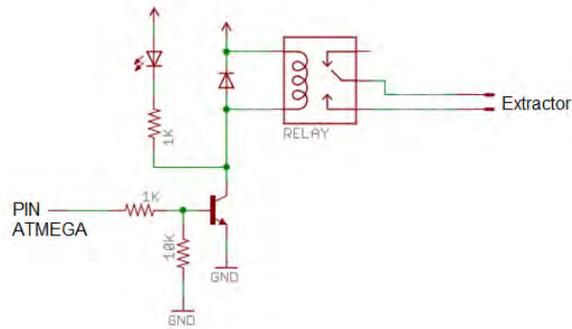


Figura 4.1 Etapa de potencia para el extractor.

### 4.1.3 Etapa de calefacción

En esta etapa se reemplazó el calefactor de gas por un calefactor eléctrico, en este caso es una resistencia térmica de tuxtено que trabajan a 120 VCA. Con esto se pretende que cuando el calefactor esta encendido signifique que la etapa de calefacción está encendida. Esta resistencia trabaja con alto voltaje y alterno, su etapa de potencia se realiza con un relevador. El circuito se muestra en la figura 4.2.

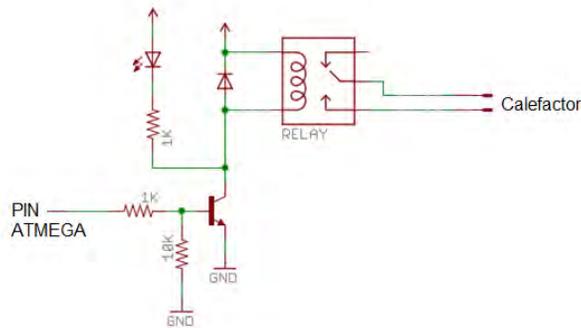


Figura 4.2 Etapa de potencia para el calefactor

## 4.2 Sistema de humedad relativa

Para este sistema se necesita activar una bomba de agua para poder realizar la nebulización. Este sistema es más complejo ya que al elevar la humedad relativa estaríamos bajando la temperatura con lo cual se activaría el calefactor lo que bajaría de nuevo la humedad relativa en el ambiente por lo que hay que analizar bien si es muy necesario incrementar la humedad o si el cultivo puede tolerar estos cambios.

### 4.2.1 Sensor de humedad relativa

En este sistema se utilizará el sensor DHT11 el cual además de medir temperatura mide la humedad relativa. Las principales características de este se describen a continuación:

- Funciona con 3,3 y 5V de alimentación
- Rango de temperatura: de 0° a 50° con 5% de precisión (pero solo mide por grados, no fracciones)
- Rango de humedad: de 20% al 80% con 5% de precisión
- Muestra por segundo
- Bajo consumo
- Devuelva la medida en °C

Para el sistema de humedad relativa se cuentan con una etapa de salida, la cual es la etapa de humidificación.

#### 4.2.2 Etapa de humidificación

Esta etapa consiste en activar una bomba que tendrá la función de dispersar el agua a través de emisores colocados en la parte superior de los cultivos, originalmente en el invernadero no se cuenta con esta instalación. La circuitería no varía mucho de los otros circuitos. Para el encendido de la bomba se usó un relevador. El circuito se muestra en la figura 4.3.

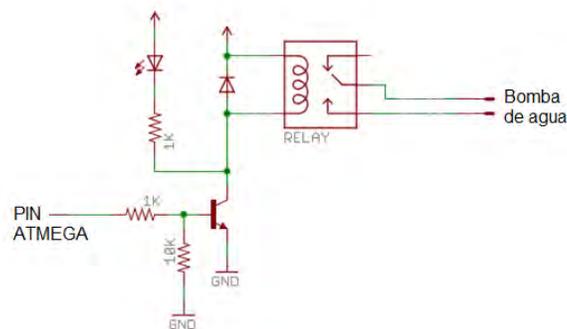


Figura 4.3 Circuito para la bomba de agua.

### 4.3 Activación del sistema de riego

Para este caso se utilizará tierra para maceta, éste está compuesto por materiales orgánicos y minerales de diversas composiciones químicas. Esto permite aireación y retención de la humedad, permitiendo tener un sensado óptimo.

#### 4.3.1 Sensor de humedad del suelo

El sensor que se utilizará para medir la humedad de la tierra es el sensor de humedad del suelo YL38 y YL69 el cual mediante la aplicación de una pequeña tensión entre los terminales del módulo YL-69, que trae consigo la circulación de una corriente que depende básicamente de la resistencia que se genera en el suelo y que, a su vez, está directamente relacionada con humedad. Por lo tanto, al aumentar la humedad la corriente crece, y al bajar, la corriente disminuye.

Este producto está compuesto por una sonda YL-69 con dos terminales separados adecuadamente, y un módulo YL-38 que contiene un circuito integrado

comparador LM393 SMD (de soldado superficial) muy estable, un led de encendido y otro de activación de salida digital. Entre sus características principales tenemos:

- Tensión de alimentación Vcc: 3.3v / 5v.
- Doble salida: Análoga de rango 0v a Vcc
- Digital de salida binaria 0/1 On/Off ajustable por potenciómetro
- Basado en el Circuito Integrado LM393.
- Incluye LED de encendido y LED en salida digital
- Dimensión del Módulo YL-38: 30mm x 16mm
- Dimensión del Módulo YL-69: 60mm x 30mm

Se instalaran dos sensores en una misma maseta a distintas profundidades para controlar la humedad en toda la zona de desarrollo de raíces, un nos indicara cuando de debe encender la bomba y el segundo cuanto tiempo estará encendida como se muestra en la figura 4.4.

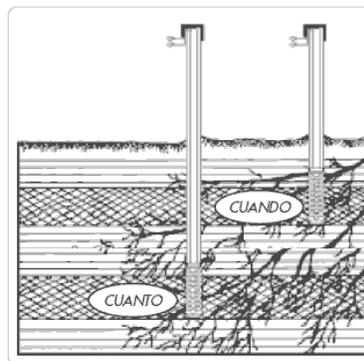


Figura 4.4 Sensores de Humedad del suelo

### 4.3.2 Etapa de riego

Una vez instalado los sensores, lo que resta es activar la bomba que se encargara de humedecer la tierra. Para activar esta carga se requiere de una etapa de potencia como se hizo anteriormente se utilizará un relevador. En la figura 4.5 se muestra la circuitería respectiva para esta etapa:

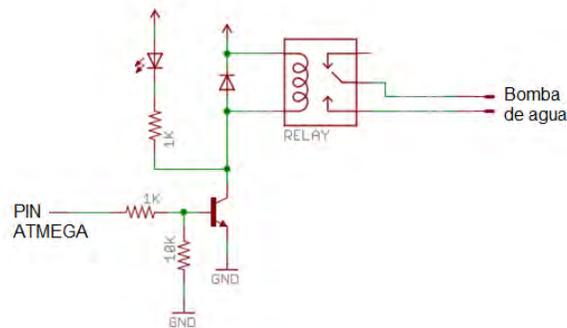


Figura 4.5 Etapa de potencia para la bomba de riego.

## CAPÍTULO 5. PROGRAMACIÓN

Este capítulo abarca lo que es la parte de la programación del ATMEGA328P, así como un análisis de la estructura de la activación de los sistemas. La programación se realizará en el entorno de Arduino, el cual nos ofrece una programación más sencilla y la comodidad de trabajar en una PC.

Para la estructura de la activación de los sistemas se tomó como objetivo principal las necesidades del cultivo y después las del invernadero teniendo en cuenta las herramientas que se tiene para el control de los sistemas. Cabe destacar que los sistemas simulados aún no se aproximan tanto a la realidad, pero la parte fundamental es la programación con el ATMEGA328P, y permite ser más objetivo en el control del clima. Para la programación se tomó como referencia la información de la siguiente tabla.

	<b>Temperatura °C</b>	<b>Humedad Relativa</b>	<b>Humedad en Suelo</b>
Máxima	32°	72%	-----
Optima	23°	56%	12%
Mínima	12°	40%	36%

### 5.1 Control del clima

Durante las últimas dos décadas, una gran cantidad de conocimiento científico ha sido acumulado y expresado en modelos matemáticos para invernaderos.

Estos modelos que describen el proceso de producción se pueden usar para diseñar herramientas de ingeniería en invernaderos (análisis y diseño de invernaderos, análisis y diseño de nuevos algoritmos y métodos de control, etc.).

#### 5.1.1 Modelado climático y su historia

Lo que se refiere en materia de investigación del modelado climático, es muy escasa en México. Investigadores han propuesto modelos climáticos de un invernadero en las condiciones climáticas de la región Centro de México. Esos modelos simulan la dinámica del clima de un invernadero con cultivo de jitomate. Así, se propusieron obtener herramientas de apoyo para el análisis de las condiciones necesarias para la producción de hortalizas en la región Centro de México, que permiten entender de una manera cuantitativa cómo se produce el clima del invernadero en función de las condiciones meteorológicas exteriores, para generar conocimiento como base para el diseño y desarrollo de herramientas de ingeniería en el área de invernaderos en el país. Para la obtención de estos modelos fueron examinados los procesos responsables de la transferencia de energía y masa.

En la literatura varios modelos del clima han sido presentados. Este tipo de modelos entregan una descripción detallada del clima en un invernadero con relación a las condiciones externas, las propiedades físicas de sus materiales y su

equipamiento, por consiguiente, son de un alto orden, como por ejemplo los de Bot (1983) y de Zwart (1996).

Bot (1983) estudió el clima en un invernadero como el conjunto de condiciones ambientales y la manera en que afectan el crecimiento y desarrollo del cultivo. Tal conjunto fue definido en términos de temperaturas y presiones de vapor. Además, indicó los procesos físicos que contribuían en el invernadero: la ventilación natural a través de las aperturas de las ventanas (la ventilación debida al efecto de la temperatura y el viento), la interacción de la cubierta de un invernadero multicapa con la radiación de onda corta directa y difusa, la interacción con la radiación de onda larga del cielo, así como la mayoría de los procesos de intercambios por convección que afectan el clima en su interior.

De Zwart (1996) propuso un nuevo modelo apoyándose en una base de tiempo de un minuto que describe la dinámica del clima en un invernadero, los componentes del sistema de calefacción y los controles. También incluye la actividad sintética del follaje. La información se tomó con mediciones de un cultivo de rosas. Con tal modelo se evaluaron nueve opciones posibles de ahorro de energía. El consumo de energía las producciones de biomasa fueron comparados contra mediciones realizadas en un invernadero con producción de jitomate.

Los modelos climáticos se pueden caracterizar como un conjunto de ecuaciones basadas en leyes físicas que explican el proceso de transferencia de energía y masa (propiedades termodinámicas). Debido a la complicitad de éstos, algunos modelados se basan solo en comportamientos dirigidos por objetivos y se formulan en términos de metas, sacando conclusiones a partir de los hechos observados, forzando a que las variables de un sistema se comporten como trayectorias definidas a las necesidades requeridas. Con este tipo de modelados es posible involucrar más de dos variables en un sólo control, modelando funciones no lineales convirtiendo las entradas en salidas acordes con los planteamientos lógicos.

Para un desempeño óptimo de los conjuntos que conforman el sistema del invernadero (Figura 5.1) y para tener una mejor interacción entre las dos principales variables del sistema se propuso desarrollar control basado en la lógica difusa, está nos permite tomar decisiones dependiendo de las necesidades que se requiera al momento el mismo control del clima, para poder tener ésta en condiciones óptimas.

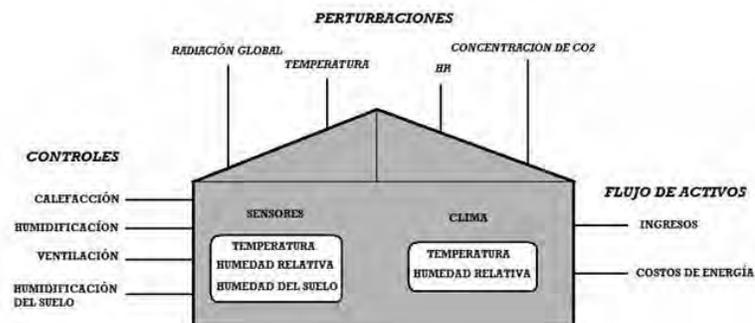


Figura 5.1 Sistema de invernadero.

### 5.1.2 Control difuso

Un sistema difuso es una clase de objetos con una serie de grados de pertenencia o membresía. Tal rango es caracterizado por una función de pertenencia (Característica) la cual asigna a cada objeto un grado de pertenencia que se encuentra entre 0 y 1. Las nociones de inclusión, unión, intersección, complemento, relación, convección, etc., se amplían a cada nivel, y varias propiedades de estas nociones son establecidas en el contexto del sistema difuso. En particular, un teorema de separación para los sistemas difusos convexos es probado sin requerir que los sistemas difusos sean independientes.

### 5.1.3 Lógica difusa

Normalmente en la lógica convencional tenemos un conjunto de enunciados que pueden ser verdaderos o falsos, sí o no, 0 o 1. En el contexto de la lógica difusa, el enunciado de “la temperatura es 25 grados centígrados” puede ser verdadero o falso. Sin embargo, en muchas situaciones la respuesta puede ser más de un simple “...este, no estoy seguro”, “quizás”, “bueno, depende...” y algunas otras. Por ejemplo, en un día veraniego la frase “la temperatura está muy alta” no es ni verdadero ni falso, ya que es una idea cualitativa que representa una opinión más que un hecho objetivo. Otro ejemplo es la frase “yo requiero un día totalmente soleado en la playa para poder sentir calor”, pero existen otras personas que pueden sentir calor en medio de una tormenta de nieve o en el clima de una montaña. No existe certeza en estas situaciones, depende del contexto.

Un bloque tradicional produce una salida basada en la lógica binaria. Una afirmación positiva o negativa resulta como salida de un bloque típico de decisión. Sin embargo, el inventor de la lógica difusa, el Dr. Lofti Zadeh encontró que en la manera como los humanos toman decisiones existen algunas sombras de significado para las cuales el SI/NO clásico puede ser remplazado por ejemplo con:

Definitivamente SI,  
Probablemente SI,  
Quizás,  
Probablemente NO,  
Definitivamente NO.

### 5.1.4 Control difuso en sistemas con retroalimentación.

Las aplicaciones de control difuso más adecuadas son aquellas donde existen requerimientos cualitativos para una acción de control satisfactoria y dichos requerimientos pueden ser enunciados fácilmente como reglas difusas. Por esta razón, los controladores con lógica difusa son usados para operar funciones automáticas en lavadoras, sistemas de aire acondicionado, cámaras y productos similares. También es posible encontrar lógica difusa en controladores de retroalimentación industriales que han sido implementados normalmente por

operadores humanos expertos que tiene el control manual de procesos complejos. El procedimiento que se sigue es sintetizar las habilidades humanas del operador en una base de reglas difusas y desarrollar así un sistema de control difuso. El diseñador del sistema difuso copia las acciones heurísticas del operador humano mientras controla el proceso y escribe las correspondientes reglas difusas. Mediante observaciones detalladas de un operador habilidoso, es posible obtener un conjunto completo de reglas difusas que puede reproducir el mejor rendimiento del operador humano. Por esta razón hubo un gran entusiasmo en las décadas de 1970 y 1980 por esta técnica, pero se ha encontrado que el operador humano no puede ser fácilmente reemplazado y ahora esos sistemas difusos son usados como “consejeros” del operador. La idea es mejorar la seguridad en lugar de reemplazar al operador.

### 5.1.5 Lógica difusa en el invernadero

En esta investigación se usará la llamada teoría del Razonamiento aproximado, la cual es una parte básica de la introducción al control difuso. Esta teoría fue introducida por Zadeh, la cual provee un potente mecanismo para razonar con información imprecisa o incierta.

Para las variables del invernadero, que en este caso son la temperatura y la humedad relativa y sabiendo que una está en función de la otra, la lógica difusa nos facilita el modo en que estas deben de interactuar, no se requiere un control exacto de estas, ya que como se sabe la temperatura es muy difícil de controlar debido a muchos factores. Un ejemplo más concreto nos facilitará el comprender como ayuda la lógica difusa en este tipo de situaciones:

Supongamos que tenemos una temperatura de 5°C, y una HR de 98%, si tuviéramos independientes las dos variables con un controlador PI o PID, lo que sucedería es que, encenderían al máximo los extractores para poder disminuir la HR y los calefactores encenderían al máximo para poder elevar la temperatura, lo cual es totalmente erróneo, porque nunca se estabilizaría ninguna variable, es ilógico que tengan que estar encendidos calefactores y extractores al mismo tiempo, el sistema entra en un tipo de círculo vicioso tratando de estabilizar las dos variables, mas sin embargo con la lógica difusa se puede jugar con las variables involucradas, para este caso sólo se tendría que encender el calefactor al máximo para elevar la temperatura a un rango más seguro, teniendo está en un rango óptimo solo restaría estabilizar la HR que prácticamente ya estaría en rangos óptimos. En este sistema se dan muchos casos similares y no sólo con estas variables, sino con muchas otras que afectan el mismo clima del invernadero, y sería aún mejor buscar como involucrar más variables en este controlador.

### 5.1.6 Clasificación difusa o fuzzificación

Este es el primer paso que consiste en convertir la señal “x” en un conjunto de variables difusas. Se asignan valores a partir de un conjunto de funciones de pertenencia o membresía. Los valores de cada función de pertenencia se etiquetan como Temp para el caso de la temperatura y HR para el de la humedad

relativa y son determinados por el valor de cada señal. Un clasificador difuso divide los rangos posibles en los cuales puede clasificarse el valor de la señal:

Para la temperatura

- Temp Mínima
- Temp Óptima
- Temp Máxima

Para la humedad relativa

- HR Mínima
- HR óptima
- HR Máxima

El elemento “fuzzificador” tendrá una señal medida por medio de un sensor como entrada y provee como salida los valores de pertenencia de las variables difusas. En este caso el Sensor DHT11 con ayuda de la librería para el entorno de programación Arduino nos entrega los valores enteros de la temperatura y humedad relativa por lo que el valor de pertenencia de las variables difusas será las que indique el usuario. Como nuestro cultivo es el jitomate el programa tendrá unos valores por default.

Función de pertenencia para la temperatura:

- Mínima: 12
- Óptima: 23
- Máxima: 32

Función de pertenencia para la humedad relativa:

- Mínima: 40
- Óptima: 56
- Máxima: 72

### 5.1.7 Diseñando reglas de control difuso (Defuzzificación).

Muchos artículos de investigación acerca de cómo crear un conjunto de reglas difusas han sido escritos. La mayoría de estos métodos son matemáticos y requieren conocimiento analítico para entenderlos. Para muchos especialistas, este hecho derrota el propósito de la lógica difusa. La principal motivación para utilizar lógica difusa es la facilidad para escribir reglas del sentido común de tal manera que sea posible construir una estrategia de control razonable, sin olvidar un conocimiento teórico profundo sobre control. Esto quiere decir que no se tendrá conocimiento de las propiedades de estabilidad del controlador. También el alcance de las aplicaciones no se restringe a aplicaciones de control simple lo cual es bueno porque existen problemas de control sencillos que solamente requieren una solución sencilla.

Un sistema de control difuso se construye a través de una base de reglas de la forma:

SI {situación} ENTONCES {acción}

El procedimiento empieza por escribir las reglas básicas y luego refinarlas basadas en la experiencia. En la mayoría de los sistemas de control difuso, el conjunto de acciones difusas es una lista simple de reglas en una secuencia simple de lazo abierto o lazo cerrado.

El último paso en la construcción de un sistema de lógica difusa es convertir de nuevo las variables difusas generadas por la base de reglas en valores con interpretación real. El proceso se denomina “defuzzificación” porque combina las variables difusas para generar el valor real de la señal, el cual puede ser usado posteriormente para generar acciones de control.

Para construir las reglas del control difuso, éste utiliza equivalentes difusos de los operadores lógicos AND, OR, y NOT. Esto ayuda a determinar las reglas del control dependiendo de las funciones de pertenencia de las dos variables. A continuación se muestra cómo se conjugan las dos variables por medio de operaciones AND y OR, determinando la salida según las operaciones y los valores de membresía de cada variable.

- [Ópt. T] AND [(Ópt. HR) OR (Mín. HR) OR (Máx. HR)] = Sistema OFF
- [Mín. T] AND [(Ópt. HR) OR (Mín. HR) OR (Máx. HR)] = Calefactor ON
- [Máx. T] AND [Mín. HR] = Nebulización y extractor ON
- [Máx. T] AND [(Ópt. HR) OR (Máx. HR)] = Extractor ON

Para una mejor visualización de las sentencias se diseñó un diagrama de estas operaciones que se muestra en la figura 5.2.

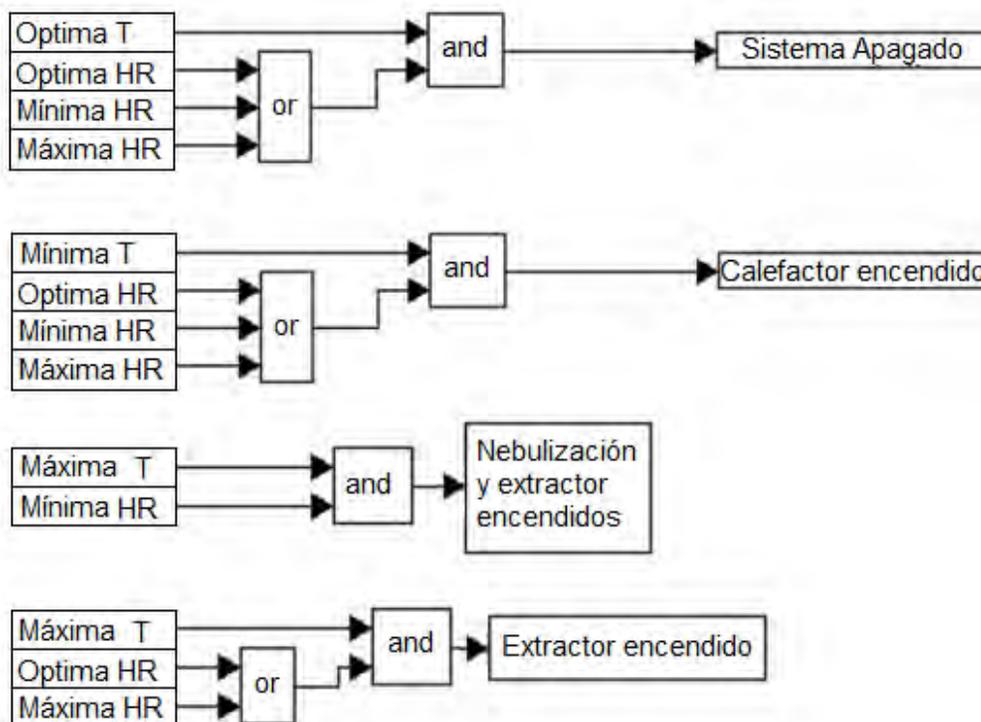


Figura 5.2 Diagrama de sistema.

## 5.2 Control del Riego

Para este sistema se utilizaran 6 sensores YL69 tres de ellos estarán colocados en la parte superior de macetas diferentes los cuales nos indicaran cuando se debe de activar el sistema de riego, los otros tres sensores se encontraran en la parte inferior de las mismas macetas para indicarnos cuando se debe apagar el sistema.

Agregando el sistema de riego tenemos cuatro reglas más:

[Ópt.T]AND[(Ópt.HR)OR(Mín.HR)OR(Máx.HR)AND[Mín.R]=Riego ON.

[Mín.T]AND[(Ópt.HR)OR(Mín.HR)OR(Máx.HR)]AND[Mín.R]=Calefactor/Riego ON

[Máx.T]AND[Mín.HR]AND[Mín.R]=Nebulización, extractor y riego ON

[Máx.T]AND[(Ópt.HR)OR(Máx.HR)]AND[Mín.R]=Extractor y riego ON.

En la figura 5.3 se muestra el diseño de un diagrama de estas operaciones.

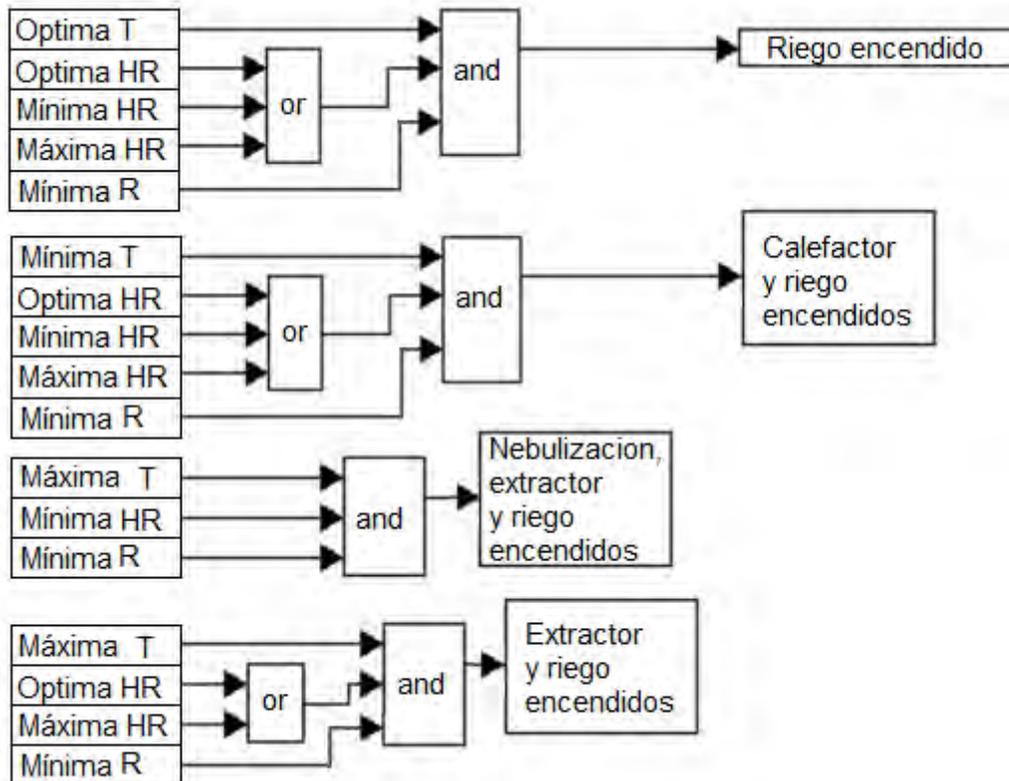


Figura 5.3 Diagrama de sistema.

A continuación, se describirá el análisis previo de la programación por medio de diagramas de flujo y esquemático.

### 5.3 Diagramas de flujo

En este caso, como anteriormente se había mencionado se utilizó la parte básica del control difuso, fuzzificación y defuzzificación. El diagrama de flujo correspondiente a este control se muestra en la figura 5.4 en el cual se muestra de manera simplificada la estructura y orden.

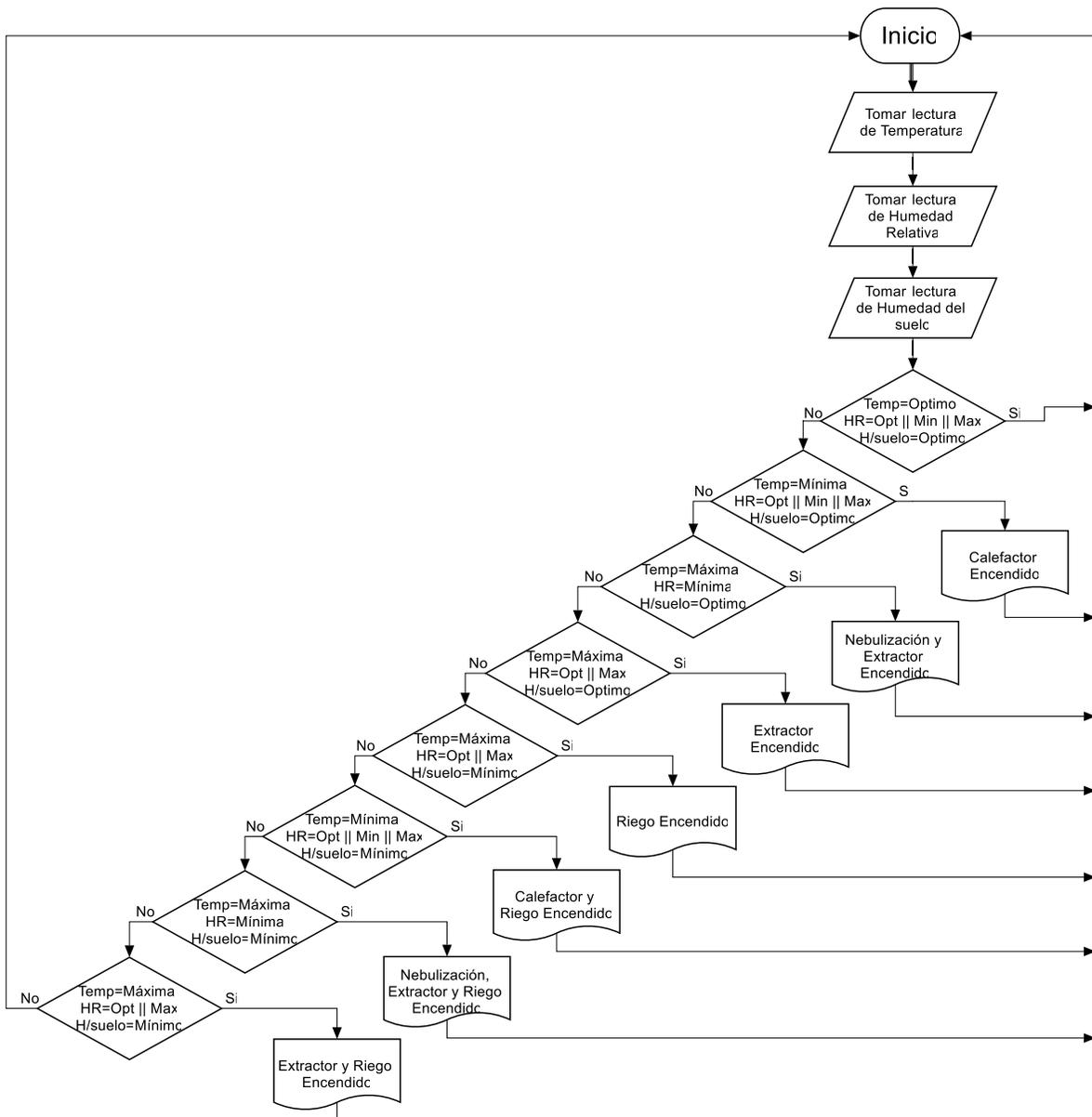


Figura 5.4 Diagrama de flujo del primer microcontrolador.

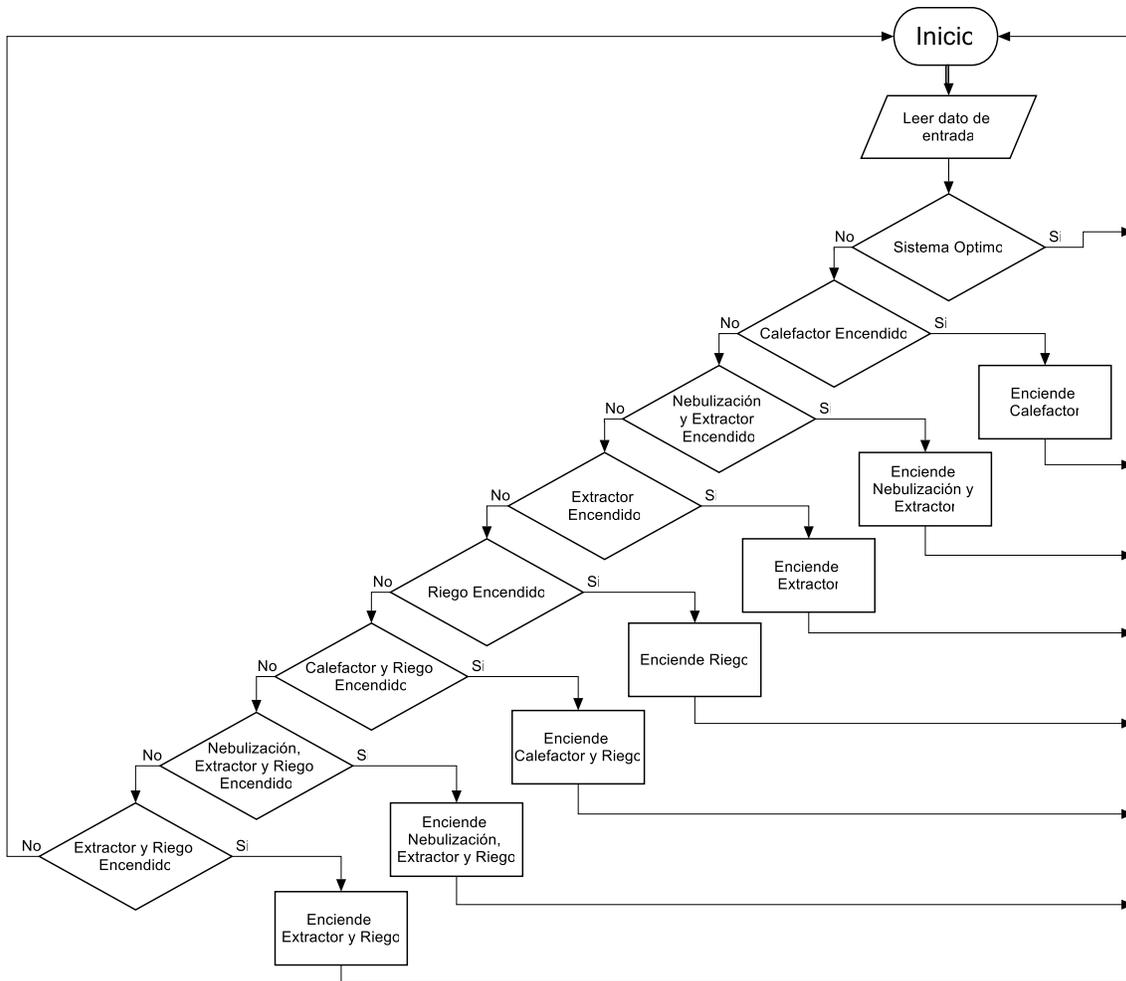


Figura 5.5 Diagrama de flujo del segundo microcontrolador.

### 5.4 Esquema del sistema propuesto

A continuación en la figura 5.6 se da una síntesis del vínculo entre los sistemas, los microcontroladores y etapas intermedias.

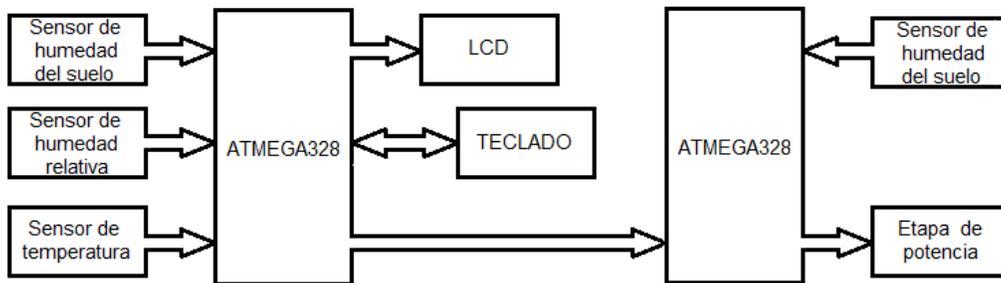


Figura 5.6 Diagrama esquemático del sistema

Para la programación del ATMEGA328 se usó el entorno de programación de Arduino, en el cual se le dan las instrucciones requeridas para el funcionamiento adecuado de cada sistema. El programa se encuentra en el Anexo G.

## CAPÍTULO 6. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, así como las conclusiones que se obtuvieron a partir de estas.

### 6.1 Resultados

A continuación se dan a conocer los resultados obtenidas por el Arduino mediante su monitor serial. Las pruebas se realizaron en el prototipo a escala del invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón. A partir de estas pruebas se obtuvieron los resultados lo que permitió obtener las conclusiones de esta tesis.

Para dar inicio al comienzo de las pruebas, se obtuvieron datos del sistema sin controlar ni automatizar. Dichos datos fueron obtenidos por medio de la tarjeta de Auduino MEGA. Lo cual permitió obtener las siguientes medidas. Cabe destacar que para dicha pruebas sólo se tomó lecturas de temperatura y de HR sin contar con el riego ya que en el invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón se cuenta con un sistema de riego por goteo por tiempo. Tales resultados se muestran en las Gráficas 6.1 y 6.2.

Gráfica 6.1 Lecturas de temperatura.

Gráfica 6.2 Lecturas de HR.

Los resultados de esta prueba indican que el comportamiento del sistema es de mal desempeño, ya que se sobrepasa los valores del rango óptimo de la temperatura. Mientras que el HR se mantiene en un rango aceptable.

Pasando a los resultados obtenidos con el sistema controlado y automatizado, obtenemos lo siguiente. Las gráficas 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7 muestran el comportamiento de la temperatura.

Gráfica 6.3 Lecturas de temperatura del.

Gráfica 6.4 Lecturas de temperatura del.

Gráfica 6.5 Lecturas de temperatura del.

Gráfica 6.6 Lecturas de temperatura del.

Gráfica 6.7 Lecturas de temperatura del.

Como se puede observar el comportamiento de la temperatura se mantuvo en los rangos establecidos, esto quiere decir que el sistema funciono adecuadamente.

También es de suma importancia mencionar que para el caso de la temperatura se utilizaron 3 sensores de temperatura ubicados en lugares distintos dentro del prototipo, de donde se saca una temperatura promedio del interior.

A continuación se mostrará las muestras obtenidas de la HR, estas muestras fueron obtenidas los mismos días que se realizaron las pruebas de temperatura. Estas muestras están en las Gráficas 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 y 6.12.

Gráfica 7.8 Lecturas de HR tomadas el.

Gráfica 7.9 Lecturas de HR tomadas el.

Gráfica 7.10 Lecturas de HR tomadas el.

Gráfica 7.11 Lecturas de HR tomadas el .

Gráfica 7.12 Lecturas de HR tomadas el.

En estas gráficas se puede mostrar que en la mayoría de las muestras la HR se mantiene en el rango óptimo, sin embargo a diferencia de la temperatura ésta se sale de este rango, debido a que depende también de la temperatura.

Por último se dan a conocer las muestras obtenidas de la humedad del suelo, las cuales dieron el comportamiento siguiente, como se muestra en las Gráficas 6.13, 6.14, 6.15, 6.16 y 6.17.

Gráfica 6.13 Lecturas de humedad del suelo obtenidas el

Gráfica 6.14 Lecturas de humedad del suelo obtenidas el

Gráfica 6.15 Lecturas de humedad del suelo obtenidas el

Gráfica 6.16 Lecturas de humedad del suelo obtenidas el

Gráfica 6.17 Lecturas de humedad del suelo obtenidas el

## CONCLUSIONES

En la actualidad el ambiente se ha visto afectado por el cambio brusco de temperaturas y del clima, por tal motivo es necesario enfocarnos a utilizar sistemas ya existentes y mejorarlos como es el caso de los invernaderos.

Durante las investigaciones que se realizaron en el presente trabajo, se observó el gran problema que tienen los invernaderos. Aunque primordialmente se enfocó en los problemas del invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, sin embargo, no se hicieron a un lado los factores que afectan a los demás invernaderos.

En este trabajo se demostró que sí es posible tener un funcionamiento adecuado del sistema del invernadero por medio del Arduino MEGA y con sensores accesibles. Además, que este sistema se puede implementar en el invernadero de la Facultad, ya que cumple con las especificaciones y rangos establecidos por éste mismo. Los principales problemas que este último presentaba fueron resueltos mediante propuestas basadas en la experiencia de los cultivos predecesores.

La automatización jugó un papel importante en el control del clima, ya que con el sistema automático se llegó a tener un mejor desempeño al actuar de manera precisa e inmediata cuando alguna de las variables se vio afectada.

Las gráficas obtenidas muestran el comportamiento de las variables y reflejan la dificultad de controlar el clima en un espacio reducido. Como se sabe el clima es fácil de controlar en espacios de mucho volumen a diferencia de los espacios pequeños, en donde el clima presenta más alteraciones y menor estabilidad.

Como se mostró en las gráficas de temperatura y HR, éstas se mantuvieron en los rangos establecidos con una forma oscilatoria dentro de éstos, por lo cual el sistema funcionó correctamente. Cabe mencionar que la temperatura y la HR están dentro de un rango óptimo por tal motivo nunca se buscó llegar a valores determinados como es en el caso del control clásico. Una de las herramientas importantes en este trabajo fue la aplicación de la Teoría del Razonamiento Aproximado, que es una breve introducción al control difuso, ya que a partir de éste se obtuvieron buenos resultados al involucrar las 2 principales variables en un sólo control, basándose en estrategias capaces de resolver las distintas alteraciones que se presentaban. Para este caso el sensor DHT11 además de ser económico y sencillo dio un buen desempeño mostrando resultados aceptables. Las gráficas del riego muestran que se mantuvo sobre el rango óptimo, por lo que se concluye que los objetivos de esta tesis se cumplieron.

## TRABAJOS A FUTURO

- Aplicar el sistema automatizado en condiciones reales (en el invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Aragón).
- Implementar energías renovables a los sistemas (calentadores solares, energía eólica, etc.).
- Llevar a cabo investigaciones más profundas sobre las variables que influyen en el crecimiento de las plantas.
- Implementar este control para otro tipo de cultivo.
- Realizar lecturas en el invernadero real para su verificación de ahorro de energía y agua.
- Diseñar un sistema que controle las cantidades de nitratos necesarios a introducir en el sistema de riego.
- Implementar un único sistema para los cuatro invernaderos

# ANEXOS

## Anexo A: Hoja de datos del ATMEGA328

### Description

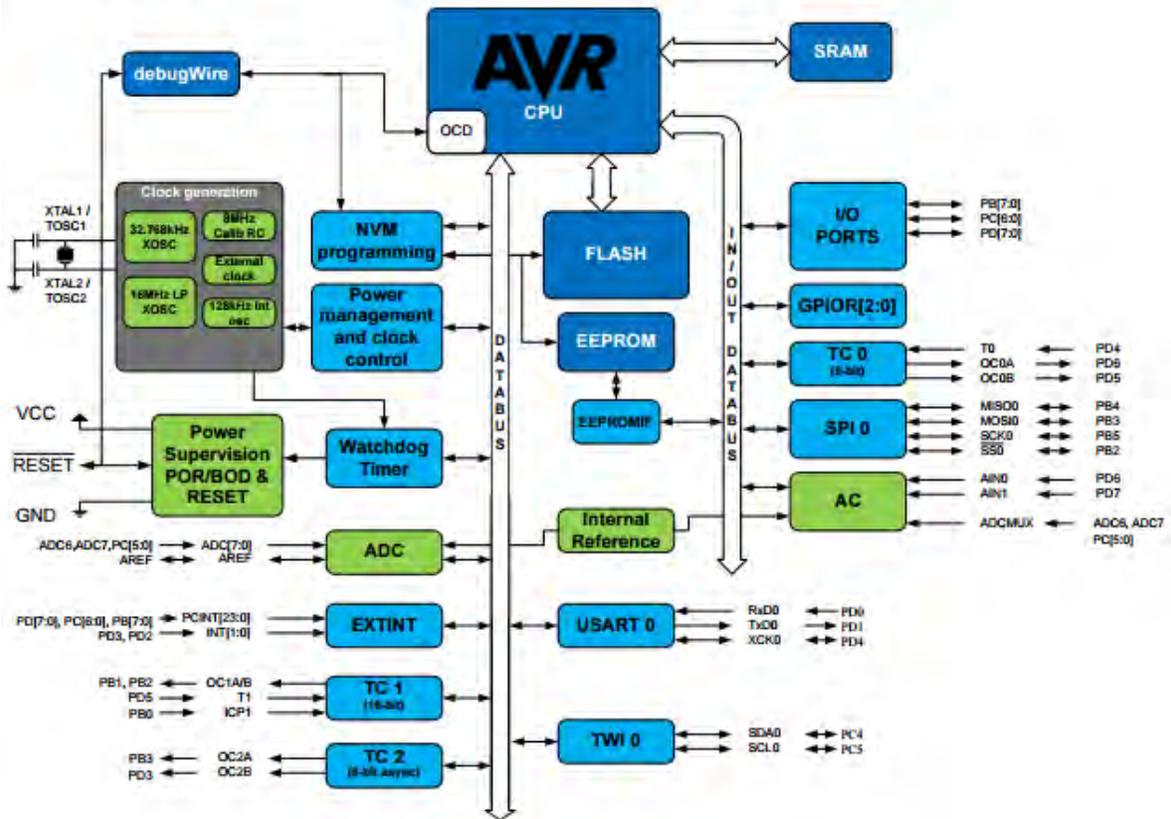
The Atmel AVR® core combines a rich instruction set with 32 general purpose working registers. All the 32 registers are directly connected to the Arithmetic Logic Unit (ALU), allowing two independent registers to be accessed in a single instruction executed in one clock cycle. The resulting architecture is more code efficient while achieving throughputs up to ten times faster than conventional CISC microcontrollers.

The ATmega328/P provides the following features: 32Kbytes of In-System Programmable Flash with Read-While-Write capabilities, 1Kbytes EEPROM, 2Kbytes SRAM, 23 general purpose I/O lines, 32 general purpose working registers, Real Time Counter (RTC), three flexible Timer/Counters with compare modes and PWM, 1 serial programmable USARTs , 1 byte-oriented 2-wire Serial Interface (I2C), a 6-channel 10-bit ADC (8 channels in TQFP and QFN/MLF packages) , a programmable Watchdog Timer with internal Oscillator, an SPI serial port, and six software selectable power saving modes. The Idle mode stops the CPU while allowing the SRAM, Timer/Counters, SPI port, and interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the register contents but freezes the Oscillator, disabling all other chip functions until the next interrupt or hardware reset. In Power-save mode, the asynchronous timer continues to run, allowing the user to maintain a timer base while the rest of the device is sleeping. The ADC Noise Reduction mode stops the CPU and all I/O modules except asynchronous timer and ADC to minimize switching noise during ADC conversions. In Standby mode, the crystal/resonator oscillator is running while the rest of the device is sleeping. This allows very fast start-up combined with low power consumption. In Extended Standby mode, both the main oscillator and the asynchronous timer continue to run.

### Configuration Summary

Features	ATmega328/P
Pin Count	28/32
Flash (Bytes)	32K
SRAM (Bytes)	2K
EEPROM (Bytes)	1K
Interrupt Vector Size (instruction word/vector)	1/1/2
General Purpose I/O Lines	23
SPI	2
TWI (I <sup>2</sup> C)	1
USART	1
ADC	10-bit 15kSPS
ADC Channels	8
8-bit Timer/Counters	2
16-bit Timer/Counters	1

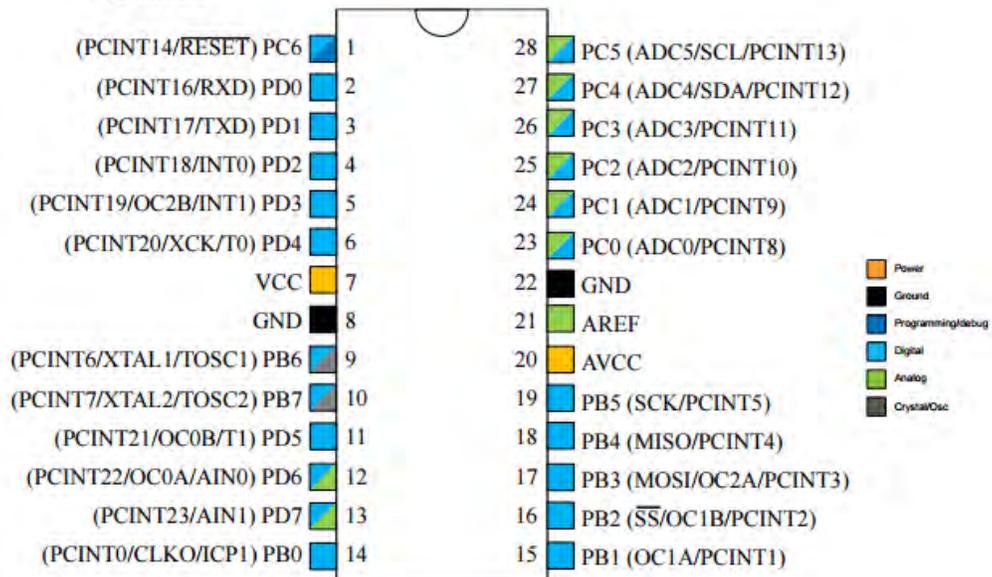
## Block Diagram



## Pin Configurations

### Pin-out

#### 28-pin PDIP



## I/O Multiplexing

### PORT Function Multiplexing

(32-pin MLF/TQFP) Pin#	(28-pin MLF) Pin#	(28-pin PIPD) Pin#	PAD	EXTINT	PCINT	ADC/AC	OSC	T/C #0	T/C #1	USART 0	I2C 0	SPI 0
1	1	5	PD[3]	INT1	PCINT19			OC2B				
2	2	6	PD[4]		PCINT20			T0		XCK0		
3	3	7	VCC									
4	4	8	GND									
5	-	-	VCC									
6	-	-	GND									
7	5	9	PB[6]		PCINT6		XTAL1/ TOSC1					
8	6	10	PB[7]		PCINT7		XTAL2/ TOSC2					
9	7	11	PD[5]		PCINT21			OC0B	T1			
10	8	12	PD[6]		PCINT22	AIN0		OC0A				
11	9	13	PD[7]		PCINT23	AIN1						
12	10	14	PB[0]		PCINT0		CLKO	ICP1				
13	11	15	PB[1]		PCINT1			OC1A				
14	12	16	PB[2]		PCINT2			OC1B				SS0
15	13	17	PB[3]		PCINT3			OC2A				MOSI0
16	14	18	PB[4]		PCINT4							MISO0
17	15	19	PB[5]		PCINT5							SCK0
18	16	20	AVCC									
19	-	-	ADC6			ADC6						
20	17	21	AREF									
21	18	22	GND									
22	-	-	ADC7			ADC7						
23	19	13	PC[0]		PCINT8	ADC0						
24	20	24	PC[1]		PCINT9	ADC1						
25	21	25	PC[2]		PCINT10	ADC2						
26	22	26	PC[3]		PCINT11	ADC3						
27	23	27	PC[4]		PCINT12	ADC4						SDA0
28	24	28	PC[5]		PCINT13	ADC5						SCL0
29	25	1	PC[6]/ RESET		PCINT14							
30	26	2	PD[0]		PCINT16					RXD0		
31	27	3	PD[1]		PCINT17					TXD0		
32	28	4	PD[2]	INT0	PCINT18							

## Anexo B: Hoja de datos del Sensor de Temperatura y Humedad relativa DHT11

### Introduction

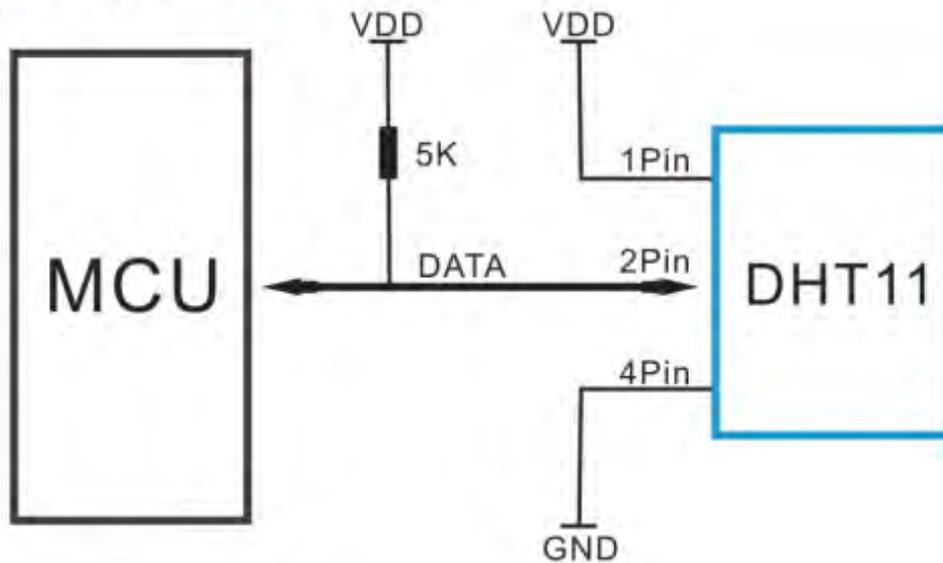
This DFRobot DHT11 Temperature & Humidity Sensor features a temperature & humidity sensor complex with a calibrated digital signal output. By using the exclusive digital-signal-acquisition technique and temperature & humidity sensing technology, it ensures high reliability and excellent long-term stability. This sensor includes a resistive-type humidity measurement component and an NTC temperature measurement component, and connects to a high-performance 8-bit microcontroller, offering excellent quality, fast response, anti-interference ability and cost-effectiveness.

Each DHT11 element is strictly calibrated in the laboratory that is extremely accurate on humidity calibration. The calibration coefficients are stored as programmes in the OTP memory, which are used by the sensor's internal signal detecting process. The single-wire serial interface makes system integration quick and easy. Its small size, low power consumption and up-to-20 meter signal transmission making it the best choice for various applications, including those most demanding ones. The component is 4-pin single row pin package. It is convenient to connect and special packages can be provided according to users' request.

### Technical Specifications:

Parameters	Conditions	Minimum	Typical	Maximum
<b>Humidity</b>				
<b>Resolution</b>		1%RH	1%RH	1%RH
			8 Bit	
<b>Repeatability</b>			±1%RH	
<b>Accuracy</b>	25°C		±4%RH	
	0-50°C			±5%RH
<b>Interchangeability</b>	Fully Interchangeable			
<b>Measurement Range</b>	0°C	30%RH		90%RH
	25°C	20%RH		90%RH
	50°C	20%RH		80%RH
<b>Response Time (Seconds)</b>	1/e(63%)25°C, 1m/s Air	6 S	10 S	15 S
<b>Hysteresis</b>			±1%RH	
<b>Long-Term Stability</b>	Typical		±1%RH/year	
<b>Temperature</b>				
<b>Resolution</b>		1°C	1°C	1°C
		8 Bit	8 Bit	8 Bit
<b>Repeatability</b>			±1°C	
<b>Accuracy</b>		±1°C		±2°C
<b>Measurement Range</b>		0°C		50°C
<b>Response Time (Seconds)</b>	1/e(63%)	6 S		30 S

## Typical Application



Note: 3Pin – Null; MCU = Micro-computer Unite or single chip Computer

When the connecting cable is shorter than 20 metres, a 5K pull-up resistor is recommended; when the connecting cable is longer than 20 metres, choose a appropriate pull-up resistor as needed.

## Electrical Characteristics

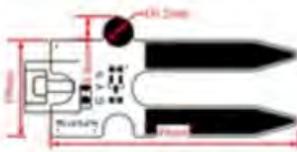
VDD=5V, T = 25°C (unless otherwise stated)

	Conditions	Minimum	Typical	Maximum
Power Supply	DC	3V	5V	5.5V
Current Supply	Measuring	0.5mA		2.5mA
	Average	0.2mA		1mA
	Standby	100uA		150uA
Sampling period	Second	1		

Note: Sampling period at intervals should be no less than 1 second.

## Anexo C: Hoja de datos del Sensor de Humedad del Suelo

### Módulo YL-69.



Este sensor tiene la capacidad de medir la humedad del suelo. Aplicando una pequeña tensión entre los terminales del módulo YL-69 hace pasar una corriente que depende básicamente de la resistencia que se genera en el suelo y ésta depende mucho de la humedad. Por lo tanto al aumentar la humedad la corriente crece y al bajar la corriente disminuye.

Consiste en una sonda YL-69 con dos terminales separados adecuadamente y un módulo YL-38 que contiene un CI comparador LM393 SMD (de soldado superficial) muy estable, un led de encendido y otro de activación de salida digital.

Este último representa 2 pines de conexión hacia el módulo YL-69, consta de 2 pines para la alimentación VCC: 3,3 a 5V y GND= 0V; y 2 pines para datos de salida D0: interfaz de salida digital (H=1 / L=0) y A0= interfaz de salida analógica.

D0 es una salida digital; este módulo permite ajustar cuándo el nivel lógico en esta salida pasa de bajo a alto mediante el potenciómetro.

Características:

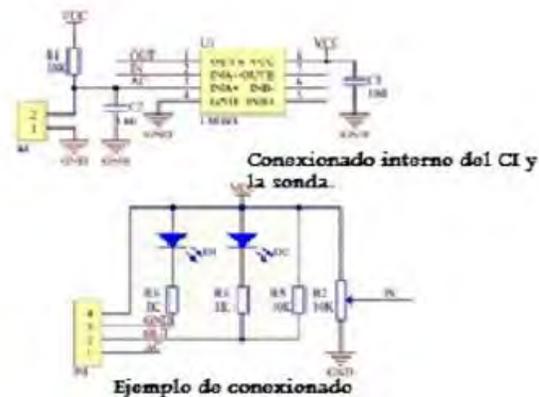
Dimensiones Módulo YL-69: 60mm x30mm

### Módulo YL-38.

Características:

Tensión de alimentación: 3.3V a 5V

Dimensiones Módulo YL-38: 30mm x 16mm



## SUGERENCIAS PARA ARRANQUE DE RIEGO

RIEGO INTENSIVO.

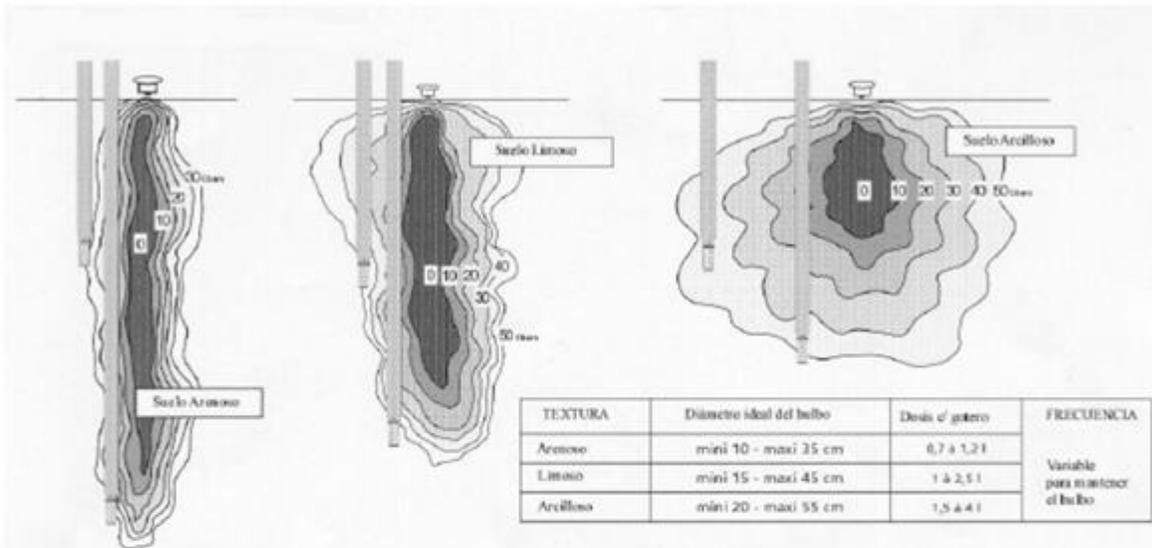
RIEGO EXTENSIVO

ARENOSO  
LIMOSO  
ARCILLOSO

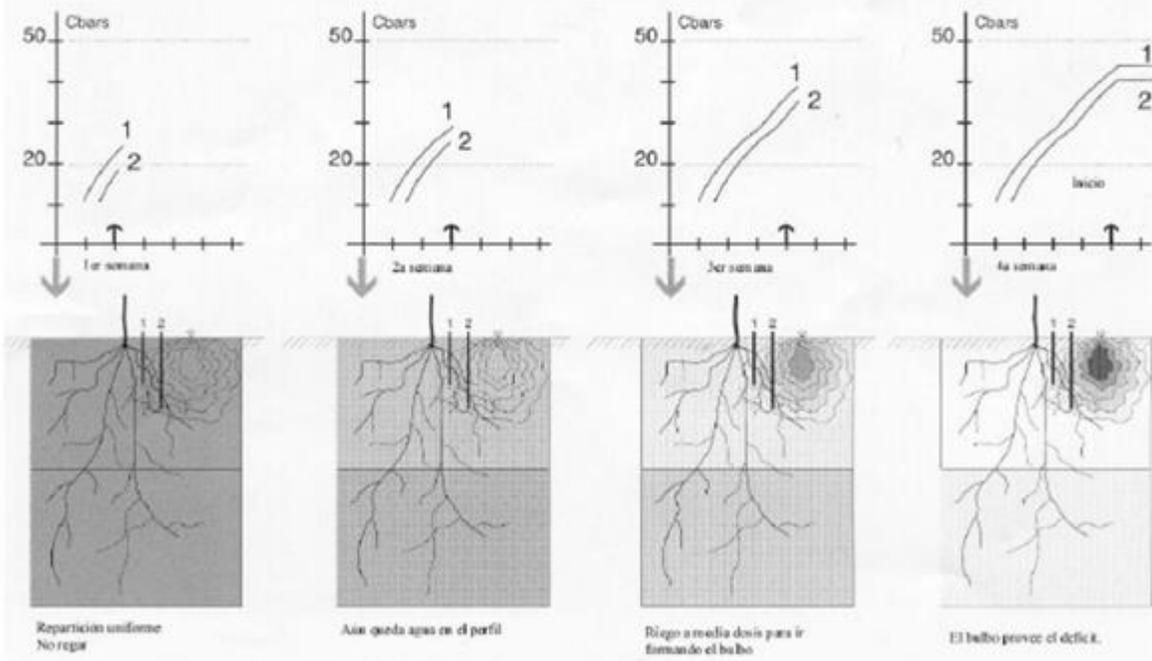
30-40 cb  
40-50 cb  
50-70 cb

50 cb  
70 cb  
100 cb

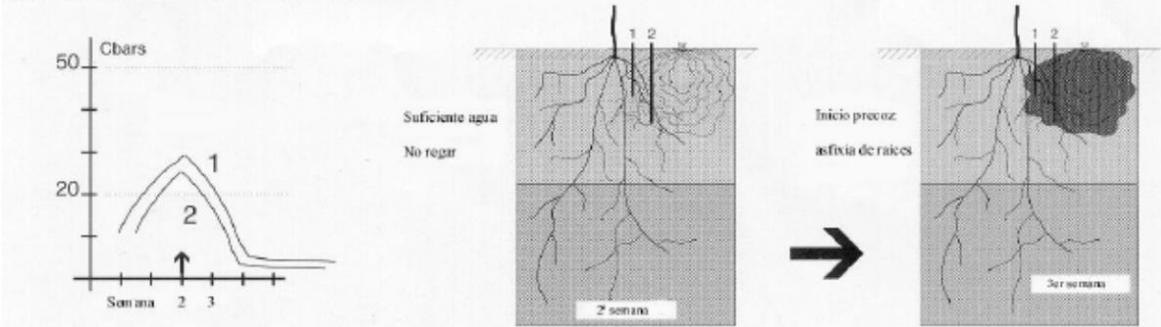
## RIEGO POR GOTEO



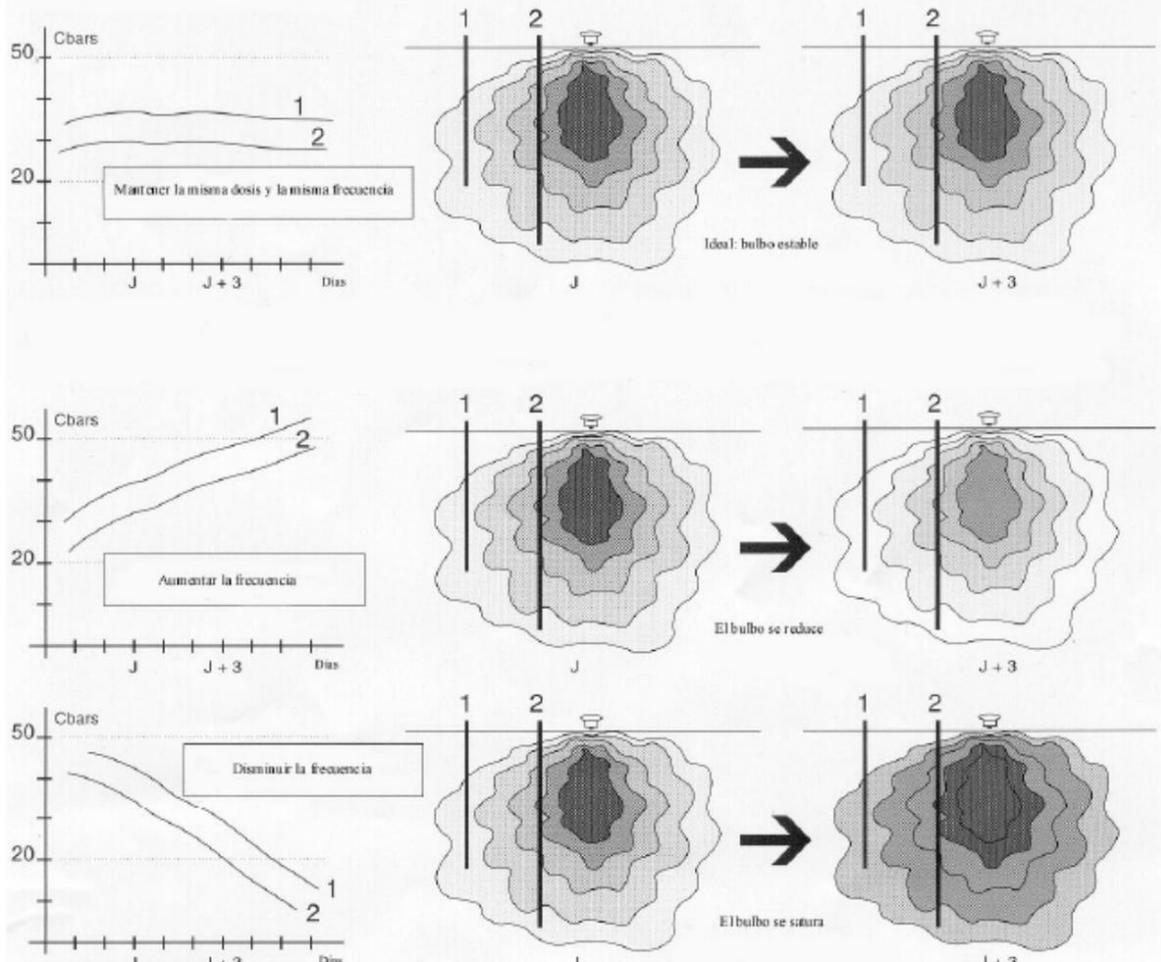
## INICIO RIEGO POR GOTEO



**PROBLEMAS DE RIEGO MUY TEMPRANO**



**MANTENIMIENTO DEL BULBO**



## Anexo D: Arduino MEGA

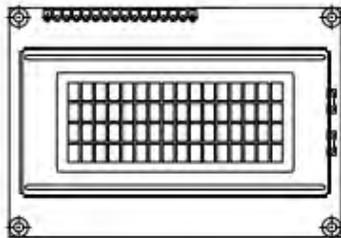
El Mega 2560 es una placa electrónica basada en el Atmega2560. Cuenta con 54 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de hardware), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador; basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o la corriente con un adaptador de CA a CC o una batería para empezar. El tablero de 2560 mega es compatible con la mayoría de los shield para el Uno y los anteriores juntas de Duemilanove o Diecimila.

### Especificaciones Técnicas

microcontrolador	Atmega2560
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límite)	6-20V
E / S digitales prendedores	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	dieciséis
Corriente continua para Pin I / O	20 mA
Corriente CC para Pin 3.3V	50 mA
Memoria flash	256 KB, 8 KB utilizado por el gestor de arranque
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Longitud	101.52 mm
Anchura	53,3 mm
Peso	37 g

## Anexo E: LCD

### 16 x 4 Character LCD



#### FEATURES

- 5 x 8 dots includes cursor
- Built-in controller (KS 0066 or Equivalent)
- + 5V power supply (Also available for + 3V)
- 1/16 duty cycle
- B/L to be driven by pin 1, pin 2 or pin 15, pin 16 or A and K (LED)
- N.V. optional for + 3V power supply

MECHANICAL DATA		
ITEM	STANDARD VALUE	UNIT
Module Dimension	87.0 x 60.0	mm
Viewing Area	62.0 x 26.0	mm
Dot Size	0.55 x 0.55	mm
Character Size	2.95 x 4.75	mm

ABSOLUTE MAXIMUM RATING					
ITEM	SYMBOL	STANDARD VALUE			UNIT
		MIN.	TYP.	MAX.	
Power Supply	VDD-VSS	- 0.3	-	7.0	V
Input Voltage	VI	- 0.3	-	VDD	V

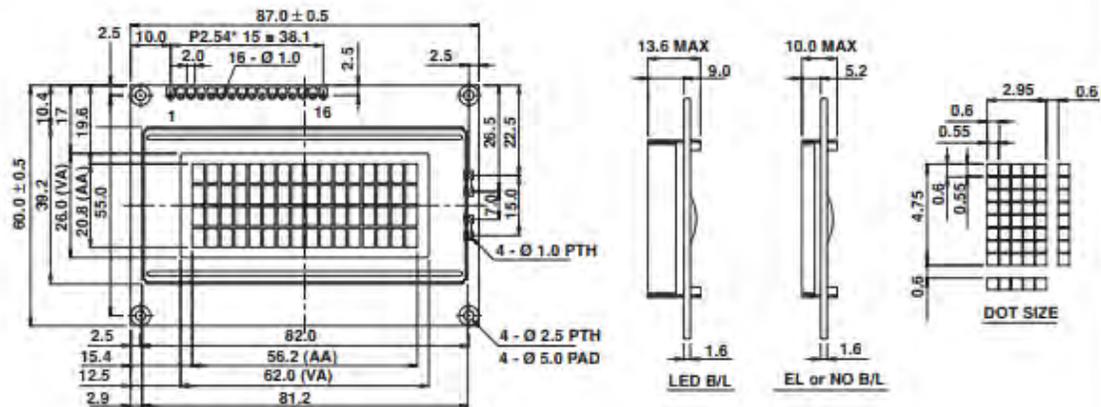
NOTE: VSS = 0 Volt, VDD = 5.0 Volt

ELECTRICAL SPECIFICATIONS						
ITEM	SYMBOL	CONDITION	STANDARD VALUE			UNIT
			MIN.	TYP.	MAX.	
Input Voltage	VDD	VDD = + 5V	4.7	5.0	5.3	V
		VDD = + 3V	2.7	3.0	5.3	V
Supply Current	IDD	VDD = + 5V	-	1.0	1.2	mA
Recommended LC Driving Voltage for Normal Temp. Version Module	VDD - V0	- 20 °C	5.0	5.1	5.7	V
		0°C	4.6	4.8	5.2	
		25°C	4.1	4.5	4.7	
		50°C	3.9	4.2	4.5	
		70°C	3.7	3.9	4.3	
LED Forward Voltage	VF	25°C	-	4.2	4.6	V
LED Forward Current	IF	25°C	-	220	440	mA
EL Power Supply Current	IEL	Vel = 110VAC:400Hz	-	-	5.0	mA

DISPLAY CHARACTER ADDRESS CODE:																
Display Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
DD RAM Address	00	01														0F
DD RAM Address	40	41														4F
DD RAM Address	10	11														1F
DD RAM Address	50	51														5F

PIN NUMBER	SYMBOL	FUNCTION
1	Vss	GND
2	Vdd	+3V or +5V
3	Vo	Contrast Adjustment
4	RS	H/L Register Select Signal
5	R/W	H/L Read/Write Signal
6	E	H → L Enable Signal
7	DB0	H/L Data Bus Line
8	DB1	H/L Data Bus Line
9	DB2	H/L Data Bus Line
10	DB3	H/L Data Bus Line
11	DB4	H/L Data Bus Line
12	DB5	H/L Data Bus Line
13	DB6	H/L Data Bus Line
14	DB7	H/L Data Bus Line
15	A/Vee	4.2V for LED/Negative Voltage Output
16	K	Power Supply for B/L (0V)

**DIMENSIONS** in millimeters



## Anexo F: Teclado matricial

### 4x4 Matrix Membrane Keypad

This 16-button keypad provides a useful human interface component for microcontroller projects. Convenient adhesive backing provides a simple way to mount the keypad in a variety of applications.

#### Features

- Ultra-thin design
- Adhesive backing
- Excellent price/performance ratio
- Easy interface to any microcontroller

#### Key Specifications

- Maximum Rating: 24 VDC, 30 mA,  
Life Expectancy: 1 million closures  
Bounce time:  $\leq 5$  ms  
Insulation Resistance: 100M Ohm, @ 100V  
Dielectric Withstand: 250VRms (@ 60Hz, 1min)
- Interface: 8-pin access to 4x4 matrix
- Operating temperature: 32 to 122 °F  
(0 to 50°C).
- Dimensions:  
Keypad, 2.7 x 3.0 in (6.9 x 7.6 cm)  
Cable: 0.78 x 3.5 in (2.0 x 8.5 cm)

#### Application Ideas

- Security systems
- Menu selection
- Data entry for embedded systems



## How it Works

Matrix keypads use a combination of four rows and four columns to provide button states to the host device, typically a microcontroller. Underneath each key is a pushbutton, with one end connected to one row, and the other end connected to one column. These connections are shown in Figure 1.

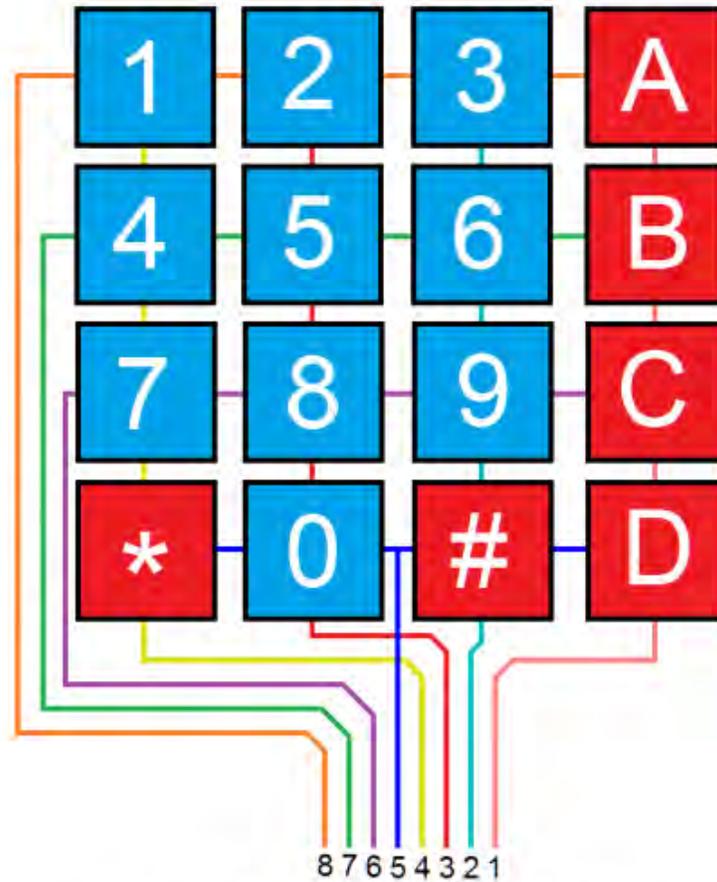


Figure 1: Matrix Keypad Connections

In order for the microcontroller to determine which button is pressed, it first needs to pull each of the four columns (pins 1-4) either low or high one at a time, and then poll the states of the four rows (pins 5-8). Depending on the states of the columns, the microcontroller can tell which button is pressed.

For example, say your program pulls all four columns low and then pulls the first row high. It then reads the input states of each column, and reads pin 1 high. This means that a contact has been made between column 4 and row 1, so button 'A' has been pressed.

## Anexo G: Programa

```
#include <Arduino.h>
#include <Keypad.h> // Controla el teclado
#include "DHT.h" // Biblioteca del sensor DHT11
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Controla el LCD

//Declaración de los sensores DHT11
DHT dht1(2,DHT11);
DHT dht2(3,DHT11);
DHT dht3(4,DHT11);

// Declaración del teclado
const byte filas = 4; // Número de filas
const byte columnas = 4; // Número de columnas
byte pinsFilas[filas] = {12, 11, 10, 9}; // Pines filas
byte pinsColumnas[columnas] = {8, 7, 6, 5}; // Pines columnas

char teclas[filas][columnas] =
{
  {'1', '2', '3', 'A'},
  {'4', '5', '6', 'B'},
  {'7', '8', '9', 'C'},
  {'*', '0', '#', 'D'},
};

// Configuración del teclado
Keypad teclado = Keypad(makeKeymap(teclas),
pinsFilas, pinsColumnas, filas, columnas);

// Configuración del LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);

// Variables
char valorN[2];
char ingreso;
int i = 0;
int a = 0;
int b = 0;
int vMinT = 12;
int vOptT = 23;
int vMaxT = 32;
int vMinH = 40;
int vOptH = 56;
int vMaxH = 72;
int vMinR = 12;
int vOptR = 36;
int s;

int ph;
int pt;
int pr;

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Inicia comunicación serial

  dht1.begin(); // Inicia sensor DHT1
  dht2.begin(); // Inicia sensor DHT2
  dht3.begin(); // Inicia sensor DHT3

  pinMode(A0, INPUT); // Pin para el higrometro 1
  pinMode(A1, INPUT); // Pin para el higrometro 2
  pinMode(A2, INPUT); // Pin para el higrometro 3

  lcd.init(); // Inicio LCD
  lcd.backlight(); // Enciende la luz del LCD
  lcd.clear (); // Limpia LCD
  lcd.setCursor(0, 0); // Posición del cursor
  lcd.print("Sistema de control"); // Muestra texto en LCD
  lcd.setCursor(2, 1); // Posición del cursor
  lcd.print("de temperatura,"); // Muestra texto en LCD
  lcd.setCursor(2, 2); // Posición del cursor
  lcd.print("humedad y riego"); // Muestra texto en LCD
  lcd.setCursor(2, 3); // Posición del cursor
  lcd.print("para invernadero"); // Muestra texto en LCD
  delay (1000);
  Temperatura();
} //fin del setup

void loop()
{
  Sensor();
  Teclado();
}

void Temperatura() // Verifica valores de temperatura
{
  lcd.clear (); // Limpia LCD
  lcd.setCursor(0, 0); // Posición del cursor
  lcd.print("Condiciones de Temp."); // Muestra texto en LCD
  lcd.setCursor(1, 1); // Posición del cursor
  lcd.print("Maxima: 26 grados C"); // Muestra texto en LCD
  lcd.setCursor(1, 2); // Posición del cursor
```

```

    lcd.print("Optima: 23 grados C"); // Muestra texto en
LCD
    lcd.setCursor(1, 3); // Posición del cursor
    lcd.print("Minima: 15 grados C"); // Muestra texto en
LCD
    delay (1000);
    lcd.clear (); // Limpia LCD
    lcd.setCursor(2, 1); // Posición del cursor
    lcd.print("Aceptar = Start"); // Muestra texto en LCD
    lcd.setCursor(2, 2); // Posición del cursor
    lcd.print("Cambiar = Stop"); // Muestra texto en LCD
    ingreso = teclado.getKey();
    if (ingreso != NO_KEY)
    switch (ingreso)
    {
    case '*':
        lcd.clear (); // Limpia LCD
        lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
        lcd.print ("Aceptar");
        delay (1000);
        Humedad();
        break;

    case '#':
        lcd.clear (); // Limpia LCD
        lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
        lcd.print ("Cambiar");
        delay (1000);
        ValorMinTemp();
    }
}

void ValorMinTemp()
{
    lcd.clear (); // Limpia LCD
    lcd.setCursor(0, 0); // Posición del cursor
    lcd.print ("Valor Min. Temp.: __");
    lcd.setCursor(2, 2); // Posición del cursor
    lcd.print("Aceptar = Start"); // Muestra texto en LCD
    lcd.setCursor(2, 3); // Posición del cursor
    lcd.print("Cambiar = Stop"); // Muestra texto en LCD
    Cambio();
    ingreso = teclado.getKey();
    if (ingreso != NO_KEY)
    switch (ingreso)
    {
    case '*':
        lcd.clear (); // Limpia LCD
        lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
        lcd.print ("Aceptar");
        delay (1000);
        a = int (valorN[0]);
        b = int (valorN[1]);
        vOptT = (a*10)+b;
        ValorMaxTemp();
        break;

    case '#':
        lcd.clear (); // Limpia LCD
        lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
        lcd.print ("Cambiar");
        delay (1000);
        ValorOptTemp();
    }
}

delay (1000);
a = int (valorN[0]);
b = int (valorN[1]);
vMinT = (a*10)+b;
ValorOptTemp();
break;

case '#':
    lcd.clear (); // Limpia LCD
    lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
    lcd.print ("Cambiar");
    delay (1000);
    ValorMinTemp();
}
}

void ValorOptTemp()
{
    lcd.clear (); // Limpia LCD
    lcd.setCursor(0, 0); // Posición del cursor
    lcd.print ("Valor Opt. Temp.: __");
    lcd.setCursor(2, 2); // Posición del cursor
    lcd.print("Aceptar = Start"); // Muestra texto en LCD
    lcd.setCursor(2, 3); // Posición del cursor
    lcd.print("Cambiar = Stop"); // Muestra texto en LCD
    Cambio();
    ingreso = teclado.getKey();
    if (ingreso != NO_KEY)
    switch (ingreso)
    {
    case '*':
        lcd.clear (); // Limpia LCD
        lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
        lcd.print ("Aceptar");
        delay (1000);
        a = int (valorN[0]);
        b = int (valorN[1]);
        vOptT = (a*10)+b;
        ValorMaxTemp();
        break;

    case '#':
        lcd.clear (); // Limpia LCD
        lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
        lcd.print ("Cambiar");
        delay (1000);
        ValorOptTemp();
    }
}
}

```

```

void ValorMaxTemp()
{
  lcd.clear (); // Limpia LCD
  lcd.setCursor(0, 0); // Posición del cursor
  lcd.print ("Valor Max. Temp.: __");
  lcd.setCursor(2, 2); // Posición del cursor
  lcd.print("Aceptar = Start"); // Muestra texto en LCD
  lcd.setCursor(2, 3); // Posición del cursor
  lcd.print("Cambiar = Stop"); // Muestra texto en LCD
  Cambio();
  ingreso = teclado.getKey();
  if (ingreso != NO_KEY)
  switch (ingreso)
  {
    case '*':
      lcd.clear (); // Limpia LCD
      lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
      lcd.print ("Aceptar");
      delay (1000);
      a = int (valorN[0]);
      b = int (valorN[1]);
      vMaxT = (a*10)+b;
      Humedad();
      break;

    case '#':
      lcd.clear (); // Limpia LCD
      lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
      lcd.print ("Cambiar");
      delay (1000);
      ValorMaxTemp();
  }
}

void Humedad()
{
  lcd.clear (); // Limpia LCD
  lcd.setCursor(0, 0); // Posición del cursor
  lcd.print("Condiciones de Hum."); // Muestra texto en LCD
  lcd.setCursor(3, 1); // Posición del cursor
  lcd.print("Maxima: 80 %"); // Muestra texto en LCD
  lcd.setCursor(3, 2); // Posición del cursor
  lcd.print("Optima: 60 %"); // Muestra texto en LCD
  lcd.setCursor(3, 3); // Posición del cursor
  lcd.print("Minima: 40 %"); // Muestra texto en LCD
  delay (1000);
  lcd.clear (); // Limpia LCD

```

```

  lcd.setCursor(2, 1); // Posición del cursor
  lcd.print("Aceptar = Start"); // Muestra texto en LCD
  lcd.setCursor(2, 2); // Posición del cursor
  lcd.print("Cambiar = Stop"); // Muestra texto en LCD
  ingreso = teclado.getKey();
  if (ingreso != NO_KEY)
  switch (ingreso)
  {
    case '*':
      lcd.clear (); // Limpia LCD
      lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
      lcd.print ("Aceptar");
      delay (1000);
      Riego();
      break;

    case '#':
      lcd.clear (); // Limpia LCD
      lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
      lcd.print ("Cambiar");
      delay (1000);
      ValorMinHum();
  }
}

void ValorMinHum()
{
  lcd.clear (); // Limpia LCD
  lcd.setCursor(0, 0); // Posición del cursor
  lcd.print ("Valor Min. Hum.: __");
  lcd.setCursor(2, 2); // Posición del cursor
  lcd.print("Aceptar = Start"); // Muestra texto en LCD
  lcd.setCursor(2, 3); // Posición del cursor
  lcd.print("Cambiar = Stop"); // Muestra texto en LCD
  Cambio();
  ingreso = teclado.getKey();
  if (ingreso != NO_KEY)
  switch (ingreso)
  {
    case '*':
      lcd.clear (); // Limpia LCD
      lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
      lcd.print ("Aceptar");
      delay (1000);
      a = int (valorN[0]);
      b = int (valorN[1]);
      vMinH = (a*10)+b;
      ValorOptHum();
      break;

```

```

case '#':
    lcd.clear (); // Limpia LCD
    lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
    lcd.print ("Cambiar");
    delay (1000);
    ValorMinHum();
}
}

void ValorOptHum()
{
    lcd.clear (); // Limpia LCD
    lcd.setCursor(0, 0); // Posición del cursor
    lcd.print ("Valor Opt. Hum.: __");
    lcd.setCursor(2, 2); // Posición del cursor
    lcd.print("Aceptar = Start"); // Muestra texto en LCD
    lcd.setCursor(2, 3); // Posición del cursor
    lcd.print("Cambiar = Stop"); // Muestra texto en LCD
    Cambio();
    ingreso = teclado.getKey();
    if (ingreso != NO_KEY)
    switch (ingreso)
    {
        case '*':
            lcd.clear (); // Limpia LCD
            lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
            lcd.print ("Aceptar");
            delay (1000);
            a = int (valorN[0]);
            b = int (valorN[1]);
            vOptH = (a*10)+b;
            ValorMaxHum();
            break;

        case '#':
            lcd.clear (); // Limpia LCD
            lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
            lcd.print ("Cambiar");
            delay (1000);
            ValorMaxHum();
    }
}

void Riego()
{
    lcd.clear (); // Limpia LCD
    lcd.setCursor(0, 0); // Posición del cursor
    lcd.print("Condiciones de Riego"); // Muestra texto en LCD
    lcd.setCursor(3, 1); // Posición del cursor
    lcd.print("Maxima: 40 %"); // Muestra texto en LCD
    lcd.setCursor(3, 2); // Posición del cursor
    lcd.print("Optima: 36 %"); // Muestra texto en LCD
    lcd.setCursor(3, 3); // Posición del cursor
    lcd.print("Minima: 12 %"); // Muestra texto en LCD
    delay (1000);
    lcd.clear (); // Limpia LCD
    lcd.setCursor(2, 1); // Posición del cursor
    lcd.print("Aceptar = Start"); // Muestra texto en LCD
    lcd.setCursor(2, 2); // Posición del cursor
    lcd.print("Cambiar = Stop"); // Muestra texto en LCD
    ingreso = teclado.getKey();
    if (ingreso != NO_KEY)
    lcd.setCursor(2, 2); // Posición del cursor
    lcd.print("Aceptar = Start"); // Muestra texto en LCD
    lcd.setCursor(2, 3); // Posición del cursor
    lcd.print("Cambiar = Stop"); // Muestra texto en LCD
    Cambio();
    ingreso = teclado.getKey();
    if (ingreso != NO_KEY)
    switch (ingreso)
    {
        case '*':
            lcd.clear (); // Limpia LCD
            lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
            lcd.print ("Aceptar");
            delay (1000);
            a = int (valorN[0]);
            b = int (valorN[1]);
            vMaxH = (a*10)+b;
            Riego();
            break;

        case '#':
            lcd.clear (); // Limpia LCD
            lcd.setCursor(6, 2); // Posición del cursor
            lcd.print ("Cambiar");
            delay (1000);
            ValorMaxHum();
    }
}

void ValorMaxHum()
{
    lcd.clear (); // Limpia LCD
    lcd.setCursor(0, 0); // Posición del cursor
    lcd.print ("Valor Max. Hum.: __");
}

```



```

int t3 = dht3.readTemperature();
pt = (t1+t2+t3)/3;

int m1 = analogRead(A0);
int r1 = map(m1,0,1023,100,0);
int m2 = analogRead(A1);
int r2 = map(m1,0,1023,100,0);
int m3 = analogRead(A2);
int r3 = map(m1,0,1023,100,0);
pr = (r1+r2+r3)/3;

if (pt==vOptT && (ph>=vMaxH || ph==vOptH ||
ph<=vMinH))
{
s=1;
Serial.print(s);
Pantalla();
}else if (pt<=vMinT && (ph>=vMaxH || ph==vOptH ||
ph<=vMinH))
{
s=2;
Serial.print(s);
Pantalla();
}else if (pt>=vMaxT && ph<=vMinH)
{
s=3;
Serial.print(s);
Pantalla();
}else if (pt>=vMaxT && (ph==vOptH || ph>=vMaxH))
{
s=4;
Serial.print(s);
Pantalla();
}else if (pt==vOptT && (ph>=vMaxH || ph==vOptH ||
ph<=vMinH) && pr<=vMinR)
{
s=5;
Serial.print(s);
Pantalla();
}else if (pt<=vMinT && (ph>=vMaxH || ph==vOptH ||
ph<=vMinH) && pr<=vMinR)
{
s=6;
Serial.print(s);
Pantalla();
}else if (pt>=vMaxT && ph<=vMinH && pr<=vMinR)
{
s=7;
Serial.print(s);
Pantalla();
}else if (pt>=vMaxT && (ph==vOptH || ph>=vMaxH) &&
pr<=vMinR)
{
s=8;
Serial.print(s);
Pantalla();
}
}

void Pantalla()
{
String m;
switch (s)
{
case 1:
m=" SISTEMA OPTIMO ";
break;
case 2:
m="CALEFACTOR ENCENDIDO";
break;
case 3:
m="NEBU-EXTRACTOR ENCEN";
break;
case 4:
m="EXTRACTOR ENCENDIDO";
break;
case 5:
m=" RIEGO ENCENDIDO ";
break;
case 6:
m="CALE-RIEGO ENCENDIDO";
break;
case 7:
m="NEBU-EXT-RIEGO ENCEN";
break;
case 8:
m="EXT-RIEGO ENCENDIDO";
break;
}
lcd.clear (); // Limpia LCD
lcd.setCursor(0, 0); // Posición del cursor
lcd.print (m);
lcd.setCursor(0, 1); // Posición del cursor
lcd.print("Temperatura:"); // Muestra texto en LCD
lcd.setCursor(14, 1); // Posición del cursor
lcd.print(pt); // Muestra texto en LCD
lcd.setCursor(0, 2); // Posición del cursor
lcd.print("Humedad Relativa:"); // Muestra texto en
LCD
lcd.setCursor(18, 2); // Posición del cursor

```

```

lcd.print(ph); // Muestra texto en LCD
lcd.setCursor(20, 2); // Posición del cursor
lcd.print("%"); // Muestra texto en LCD
lcd.setCursor(0, 2); // Posición del cursor
lcd.print("Humedad de suelo:"); // Muestra texto en
LCD
lcd.setCursor(18, 2); // Posición del cursor
lcd.print(pr); // Muestra texto en LCD
lcd.setCursor(20, 2); // Posición del cursor
lcd.print("%"); // Muestra texto en LCD
delay (1000);
}

```

```

void Teclado()

```

```

{
  ingreso = teclado.getKey();
  if (ingreso != NO_KEY)
    switch (ingreso)
    {
      case 'A':
        Temperatura();
        break;
      case 'B':
        Humedad();
        break;
      case 'C':
        Riego();
        break;
      case 'D':
        Ayuda();
        break;
      case '*':
        setup();
        break;
      case '#':
        Parar();
        break;
    }
}

```

```

void Ayuda()

```

```

{
  lcd.clear ();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("F1 Cambia Temp.");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("F2 Cambia HR");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("F3 Cambia Hum. Suelo");
}

```

```

lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("F4 Ayuda");
delay(1000);
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("STOP Detiene Sistema");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("START Reinicia Sistema");
delay(1000);
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(" Problemas con el ");
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print(" sistema ver Guia ");
delay(1000);
}

```

```

void Parar()

```

```

{
  do
  {
    s=1;
    Serial.print(s);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(4, 1);
    lcd.print("S I S T E M A");
    lcd.setCursor(4, 2);
    lcd.print("P A U S A D O");
    ingreso = teclado.getKey();
  } while(ingreso != '*');
  loop();
}

```

```

void Cambio()

```

```

{
  ingreso = teclado.getKey();
  if (ingreso != NO_KEY)
    switch (ingreso)
    {
      case 'A':
        lcd.setCursor(5, 1); // Posición del cursor
        lcd.print("No valido");
        delay (1000);
        lcd.setCursor(0, 1); // Posición del cursor
        lcd.print(" ");
        break;
      case 'B':
        lcd.setCursor(5, 1); // Posición del cursor
        lcd.print("No valido");
        delay (1000);
    }
}

```

```

lcd.setCursor(0, 1); // Posición del cursor
lcd.print("      ");
break;

case 'C':
lcd.setCursor(5, 1); // Posición del cursor
lcd.print("No valido");
delay (1000);
lcd.setCursor(0, 1); // Posición del cursor
lcd.print("      ");
break;

case 'D':
lcd.setCursor(5, 1); // Posición del cursor
lcd.print("No valido");
delay (1000);
lcd.setCursor(0, 1); // Posición del cursor
lcd.print("      ");
break;

case '*':
lcd.setCursor(5, 1); // Posición del cursor
lcd.print("No valido");
delay (1000);
lcd.setCursor(0, 1); // Posición del cursor

```

```

lcd.print("      ");
break;

case '#':
lcd.setCursor(5, 1); // Posición del cursor
lcd.print("No valido");
delay (1000);
lcd.setCursor(0, 1); // Posición del cursor
lcd.print("      ");
break;

default: // Si es un numero debe imprimirlo en el
LCD y ademas guardarlo en el arreglo passUser
for (i=0; i=1; i++)
{
valorN[i] = ingreso;
NuevoValor(valorN[i], 19 + i, 0);
}
}

void NuevoValor (char a, int columna, int fila)
{
lcd.setCursor(columna, fila);
lcd.print(a);
}

```

## REFERENCIAS

Bakker, J. *Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach*. s.f.

Daniel, Campos. *Agroclimatología: Cuantitativa de cultivos*. Primera. Trillas, 2005.