



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Sistema de control difuso de  
temperatura e iluminación en un  
invernadero vertical con alarma de  
humedad ambiental**

**TESIS**

Para obtener el título de

**Ingeniero Eléctrico Electrónico**

**P R E S E N T A N**

Alfonso Barrios Díaz

Julio Cesar Silva López

Gustavo Nava Aguilar

Y para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico Electricista**

**Área Eléctrica y Electrónica**

**P R E S E N T A**

Mateo José Martínez Solares

**DIRECTOR DE TESIS**

**M.C. Edgar Baldemar Aguado Cruz**

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**



Agradecimientos.

A la primera persona que quiero agradecer por su amor y comprensión es a mi madre *Gloria María Luisa Díaz Enciso*, gracias por escucharme y ofrecerme un hombro en donde descansar.

En memoria a mi padre *Arq. Alfonso Barrios Macotelo*, a los 10 años de su fallecimiento que hubiera querido ver este momento en el que culmino un ciclo e inicio uno nuevo.

Agradezco a todos los profesores por haber dejado una huella en mi vida, esta huella es algo muy valioso y trascendental en la vida de un ser humano y la llamo conocimiento y experiencia mil gracias.

Agradecimientos a mis compañeros de tesis Mateo José Martínez Solares, Julio Cesar Silva López y Gustavo Nava Aguilar, sin ellos no se hubiera concluido este proyecto.

No puede faltar en los agradecimientos al M.C. Edgar Baldemar Aguado Cruz, gracias por brindarnos su valiosa colaboración y orientación en el desarrollo de este trabajo, sin el esto no hubiera sido posible.

Tengo que agradecer a la Facultad de Ingeniería, por haberme permitido ser parte de esta gran institución y sentirme orgulloso de ella, espero algún día regresar algo de lo mucho que me dieron.

Agradezco a mi país México y a su gente, sin ellos no existiría la Universidad Nacional Autónoma de México cuna del conocimiento.

**Alfonso Barrios Díaz**

Quiero agradecer a mis papás por toda su paciencia que me han tenido a lo largo de estos años, en los cuales me aconsejaron sabiamente y guiaron por el buen camino, también les agradezco por brindarme las herramientas necesarias para cumplir mis objetivos y sobre todo por ser todo el amor que me tiene.

A mis profesores que gracias a sus conocimientos ampliaron mis posibilidades de desarrollarme como profesionista.

A todos mis amigos y familiares que me apoyan día con día, en especial a mi novia que siempre me motiva a mejorar para dar mi mejor versión.

Y a mis compañeros de tesis Alfonso Barrios Díaz, Mateo José Martínez Solares y Gustavo Nava Aguilar que sin sus conocimientos y colaboración fue posible la realización de esta tesis, también agradezco a nuestro asesor M.C. Edgar Baldemar Aguado Cruz por su trabajo realizado en estos meses.

**Julio Cesar Silva López.**

*Agradecimientos.*

*A mi tía Angélica, que creyó en mi cuando otros ya no quisieron hacerlo más; gracias por todas las innumerables muestras de paciencia y comprensión, los ánimos y consejos que me ayudaron tanto para cerrar este ciclo en mi vida, gracias de verdad por todo tu apoyo.*

*A mi tío Porfirio y mi tía Margarita, gracias por darme la oportunidad de continuar mi formación académica.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de formarme como profesionista dentro de sus aulas.*

*Al profesor M. C. Edgar Baldemar Aguado Cruz y a mis compañeros de la Facultad de ingeniería que participaron en la elaboración de este trabajo:*

*Alfonso Barros Díaz*

*Julio César Silva López*

*Mateo José Martínez Solares*

**GUSTAVO NAVA AGUILAR**

Agradecimientos:

A los que ya no están entre nosotros, mis padres; Agustina Solares Peña y Macario Martínez Martínez, que me dieron la vida y me inculcaron los primeros valores. Siempre los llevo en mi corazón.

A mi familia:

A mi esposa, Georgina Peralta Becerril por su paciencia.

A mis hijos, Agustín Benoni, Concepción y Alejandra, para que este trabajo sea de ejemplo a seguir.

A mis nietos, Ángel y Andrea Sofía que con sus bromas alegran mi existir.

A mis compañeros que conformamos el equipo de trabajo que a pesar de la diferencia generacional se adaptaron a mi forma de trabajar.

Gustavo, Alfonso y Julio Cesar, a todos ellos, gracias, por el esfuerzo realizado para la finalización de este trabajo.

Mateo José Martínez Solares

## Objetivo

Diseñar e implementar un sistema de control que le permita ajustar el rango de temperaturas y de iluminación dentro de un invernadero vertical, con el fin de optimizar el proceso de cultivo de hortalizas según los parámetros que el usuario crea conveniente para sus cultivos.

## Índice temático

|  |     |
|--|-----|
| Capítulo I Antecedentes .....  | 1   |
| 1.1 Introducción.....  | 1   |
| 1.2 Métodos de cultivo .....   | 3   |
| 1.3 Tipos de iluminación en un invernadero.....  | 15  |
| 1.4 Monitoreo de parámetros en un invernadero .....  | 22  |
| 1.5 Alcance y acotamiento del Problema.....  | 28  |
| Capítulo II Marco teórico .....  | 39  |
| 2.1 Características de los métodos de control difuso .....   | 40  |
| 2.2. Características, ventajas y desventajas de sensores para detección de temperatura.....                          | 46  |
| 2.3 Características, ventajas y desventajas de sensores para detección de iluminación. ....                          | 55  |
| 2.4 Características de microcontroladores, tipos de entradas y salidas, tiempos de respuesta y beneficio costo. .... | 60  |
| Capítulo III Estado del arte de invernaderos .....   | 72  |
| 3.1 Antecedentes.....  | 72  |
| 3.2. Tipos de invernaderos.....  | 80  |
| 3.3 Métodos de cultivo hidropónico dentro de un invernadero.....   | 94  |
| 3.4 Análisis de fortalezas y debilidades de invernaderos. ....   | 99  |
| 3.5 Tipos de hortalizas cultivadas dentro de invernaderos.....   | 104 |
| Capítulo IV Análisis y planteamiento del problema.....   | 112 |
| 4.1 Tipo de cultivo.....   | 112 |
| 4.2 Requerimientos generales del microprocesador. ....   | 114 |
| 4.3 Elección de la iluminación óptima para el sistema. ....  | 123 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.4. Elección de sensor de temperatura .....                              | 129 |
| 4.5 Elección de sensor de iluminación.....                                | 138 |
| Capítulo V Diseño del sistema .....                                       | 148 |
| 5.1 Desarrollo conceptual de un invernadero vertical.....                 | 148 |
| 5.2 Desarrollo de la programación necesaria para el microprocesador ..... | 155 |
| 5.3 Desarrollo del hardware necesario para la aplicación. ....            | 166 |
| 5.4 Integración de los elementos del sistema.....                         | 173 |
| 5.5 Desarrollo del sistema de seguridad.....                              | 182 |
| 5.6 Pruebas y resultados.....   | 188 |
| 5.7. Manual de mantenimiento. ....  | 195 |
| 5.8. Costo y evaluación del proyecto.....                                 | 197 |
| Conclusiones:.....  | 200 |
| BIBLIOGRAFIA .....  | 202 |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.3.1 Espectro electromagnético.....                         | 17 |
| Figura 1.3.2 Lámpara incandescente.....                             | 19 |
| Figura 1.3.3 Lámpara fluorescente .....                             | 20 |
| Figura 1.3.4 Lámpara de mercurio.....                               | 21 |
| Figura 1.3.5. Lámparas de sodio de alta presión .....               | 22 |
| Figura 1.5.1. Estructura convencional .....                         | 28 |
| Figura 1.5.2 Absorción de clorofila vs longitud de onda de luz..... | 36 |
| Figura 1.5.3 Idea básica de la solución a implementar .....         | 37 |
| Figura 1.5.4 Esquema básico del control a diseñar .....             | 39 |
| Figura 2.1.1. Clasificación de la teoría difusa .....               | 44 |
| Figura 2.1.2. Un posible sistema de control de lógica difusa .....  | 45 |
| Figura 2.2.1 Componentes básicos de un sensor.....                  | 48 |
| Figura 2.2.2. Curvas resistencia/temperatura PTC.....               | 50 |
| Figura 2.2.3. Curva del comportamiento del sensor .....             | 53 |
| Figura 2.3.1. Fotorresistencia.....                                 | 56 |
| Figura 2.3.2 Diversos tipos de fotodiodo. ....                      | 57 |
| Figura 2.3.3. Diversos tipos de fototransistores .....              | 59 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 2.4.1. Arquitectura Von Neumann .....  | 62  |
| Figura 2.4.2. Estructura Von Neumann con memoria externa.....   | 64  |
| Figura 3.1.1. “Orangerie” inglesa, resguardaba árboles cítricos y otras plantas de climas cálidos.<br>..... | 74  |
| Figura 3.1.2. Palacio de Cristal, Inglaterra.....   | 75  |
| Figura 3.1.3. La casa de las palmeras .....   | 76  |
| Figura 3.1.4. Torre de Ruthner.....   | 78  |
| Figura 3.2.1. Invernadero tipo parral.....  | 83  |
| Figura 3.2.2. Invernadero en raspa y amagado.....   | 84  |
| Figura 3.2.3. Invernadero asimétrico.....   | 86  |
| Figura 3.2.4. Invernadero de capilla simple a dos aguas.....  | 88  |
| Figura 3.2.5. Invernadero en dientes de sierra.....   | 89  |
| Figura 3.2.6. Invernadero multicapilla.....   | 90  |
| Figura 3.2.7. Invernaderos Góticos.....   | 91  |
| Figura 3.2.8. Invernadero túnel.....  | 93  |
| Figura 3.3.1 New Growing System (NGS).....  | 96  |
| Figura 3.3.2 Invernadero Vertical.....  | 97  |
| Figura 4.1.1. Iluminación artificial en un invernadero .....  | 113 |
| Figura 4.1.2. Tutorío en plantas de tomate .....  | 114 |
| Figura 4.2.1 Diagrama de entradas y salidas del microcontrolador .....                                      | 119 |
| Figura 4.3.1. Luz led de 10 Watts.....  | 128 |
| Figura 4.3.2 Espectro de emisión de luz led elegida .....   | 129 |
| Figura 4.4.1. Esquema básico interno del sensor de temperatura.....   | 135 |
| Figura 4.4.2 Vista frontal y vista trasera.....   | 137 |
| Figura 4.5.1 Diagrama de bloque del sensor .....  | 145 |
| Figura 4.5.2 Módulo del sensor TSL2561.....   | 147 |
| Figura 4.5.3 Respuesta espectral .....  | 147 |
| Figura 5.1.1. Medidas propuestas para el invernadero vertical cotas en (mm).....                            | 150 |
| Figura 5.1.2. LED Amplio Espectro 10 [W].....   | 151 |
| Figura 5.1.3. Vista lateral del invernadero.....  | 153 |
| Figura 5.1.4. Vista isométrica del invernadero.....   | 154 |
| Figura 5.1.5 Prototipo final del invernadero.....   | 155 |
| Figura 5.2.1. Entradas y salidas del control difuso.....  | 156 |
| Figura 5.2.2 Conjuntos difusos de entrada de iluminación.....   | 156 |
| Figura 5.2.3. Conjuntos difusos de entrada de temperatura .....   | 157 |
| Figura 5.2.4. Conjuntos difusos de salida del resistor .....  | 158 |
| Figura 5.2.5. Conjuntos difusos de la salida de los ventiladores .....                                      | 158 |
| Figura 5.2.6 Conjuntos difusos de la salida del led.....  | 159 |
| Figura 5.2.7 Curva de control del resistor.....   | 160 |
| Figura 5.2.8 Curva de control de los ventiladores.....  | 161 |



|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.2.9 Curva de control del Led.....   | 161 |
| Figura 5.2.10. Definición de funciones difusas .....   | 162 |
| Figura 5.2.11. Reglas del control y límites de las entradas y salidas.....   | 163 |
| Figura 5.2.12. Evaluación de reglas con salida difusa .....  | 164 |
| Figura 5.2.13. Obtención del centríde .....  | 165 |
| Figura 5.2.14. Defusificación de la salida.....  | 165 |
| Figura 5.3.1. Diagrama básico de un fototriac.....   | 166 |
| Figura 5.3.2. Configuración básica que proporciona el fabricante .....   | 167 |
| Figura. 5.3.3. Diagrama de la etapa de control de AC con carga resistiva .....   | 168 |
| Figura 5.3.4. Diagrama de la etapa de control de AC con carga inductiva .....  | 168 |
| Figura. 5.3.5. Optoacoplador H11AA1 .....  | 169 |
| Figura 5.3.6. Diagrama del Detector de cruce por cero.....   | 170 |
| Figura 5.3.7. (a). Señal sinusoidal que alimenta al sistema. (b). Señal proporcionada por la etapa de detección de cruce por cero..... | 170 |
| Figura 5.3.8. Optoacoplador 4N25.....  | 171 |
| Figura 5.3.9. Etapa de potencia de DC.....   | 172 |
| Figura 5.3.10. Diagrama del circuito para el LED.....  | 173 |
| Figura. 5.4.1. Funcionamiento básico de la comunicación I2C.....   | 175 |
| Figura. 5.4.2. Inicialización del bus I2C en Arduino.....  | 176 |
| Figura. 5.4.3. Utilización del sensor de temperatura y humedad SHT31 .....   | 177 |
| Figura. 5.4.4. Utilización del sensor de iluminación TSL2561.....  | 179 |
| Figura. 5.4.5. Utilización del display LCD con interfaz I2C .....  | 180 |
| Figura 5.4.6. Implementación de la función de cruce por cero.....  | 181 |
| Figura 5.4.7. Implementación del mecanismo de control para etapa de AC.....  | 182 |
| Figura 5.5.1. Declaración de variables para la detección de persistencia de error.....   | 183 |
| Figura 5.5.2. Implementación de mecanismo de seguridad .....   | 184 |
| Figura 5.5.3. Mensaje de error.....  | 185 |
| Figura 5.5.4. Mecanismo de alarma para HR mayor a 60%.....   | 185 |
| Figura 5.5.5. Implementación del mecanismo de apagado y encendido de la luz LED.....   | 187 |
| Figura 5.6.1. Evaluación de reglas en Matlab.....  | 190 |
| Figura 5.6.2. Resultados obtenidos por el sistema.....   | 191 |
| Figura 5.6.3. Comparación de la respuesta del ventilador.....  | 191 |
| Figura 5.6.4. Curva de salida del sistema en simulación con Matlab para ventiladores.....  | 192 |
| Figura 5.6.5. Comparación de la respuesta del resistor.....  | 192 |
| Figura 5.6.6. Curva de salida del sistema en simulación con Matlab para resistor.....  | 193 |
| Figura 5.6.7. Rango de errores.....  | 193 |
| Figura 5.6.8. Gráfica del control de iluminación.....  | 194 |

## Índice de tablas

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1.2.1 Elementos nutritivos.....   | 14  |
| Tabla 1.4.1 Exigencias de temperatura para distintas especies.....  | 24  |
| Tabla 1.5.1. Características físicas de algunos tipos de materiales usados para el recubrimiento de los invernaderos..... | 34  |
| Tabla 2.2.1. Resistencia/temperatura NTC.....   | 51  |
| Tabla 2.3.1. Sensibilidad al espectro de un fotodiodo.....  | 58  |
| Tabla 4.3.1 Principales características de las lámparas.....  | 125 |
| Tabla 4.3.2. Eficacia del Led vs otras lámparas.....  | 126 |
| Tabla 4.3.3. Características eléctricas y ópticas en $I_F = 600$ [mA] y $T_a=25^\circ\text{C}$ .....                      | 128 |
| Tabla 4.3.4 Sensores para medir la temperatura.....   | 130 |
| Tabla 4.3.5 Ventajas y desventajas de sensores de temperatura.....  | 131 |
| Tabla 5.3.3. Valores de corriente y voltaje para la sección de entrada del MOC3011. ....                                  | 167 |
| Tabla. 5.4.1. Pines de salida para comunicación I2C en tarjetas de Arduino.....   | 175 |
| Tabla 5.6.1. Valores del sistema vs valores simulados.....  | 188 |
| Tabla 5.6.2. Rango del sensor y salida del PWM.....   | 194 |
| Tabla 5.8.1. Costos del proyecto.....   | 198 |

# **Sistema de control difuso de temperatura e iluminación en un invernadero vertical con alarma de humedad ambiental.**

## **Capítulo I Antecedentes**

### **1.1 Introducción**

El avance tecnológico, los problemas de la sociedad, el deterioro ambiental, aunado a los problemas de salud, hace indispensable la aplicación de nuevas técnicas que nos permitan el aprovechamiento práctico del conocimiento científico para satisfacer nuestras necesidades. Todo este cúmulo de conocimientos ha permitido que por un lado nuestra esperanza de vida sea mayor y por el otro lado explorar nuevos horizontes sea dentro de nuestro mundo o fuera de él.

En el sector alimenticio cada día se vuelve más relevante en la economía de un país, no solo para el consumo interno sino para la exportación, sin olvidar que la base de una economía sólida ha sido y será la producción de alimentos; *la agricultura*, por lo que es de suma importancia buscar nuevas formas en la producción de alimentos y los invernaderos son una opción viable.

En México, de las casi 200 millones de hectáreas que comprende el Territorio Nacional, en el año 2016 apenas se sembraron poco más de 5 millones de hectáreas de riego y 11 millones de hectáreas de temporal (SIAP, 2017); lo que indica que la fuente productiva es bastante limitada y los sistemas tradicionales de producción no son suficientes para abastecer las necesidades alimenticias de la población.

Como ejemplos de producción controlada se tienen los alimentos hidropónicos y orgánicos. Ambos medios de producción han tenido buena aceptación en la sociedad sobre todo de la clase media que ahora se preocupa más por la calidad de aquellos productos que consume, en donde los productores aseguran que no se utilizan

productos químicos, como pesticidas y el riego no se hace con aguas tratadas, como es el caso en algunos productos cultivados a cielo abierto.

En la actualidad con la utilización de las nuevas tecnologías es posible desarrollar ambientes controlados para la producción de alimentos, en áreas rurales y metropolitanas (Invernaderos).

Los invernaderos son estructuras cerradas que permiten controlar temperatura, humedad, nutrientes, fotoperiodos e intensidad luminosa. Existen muchas variantes en el uso de los sistemas de producción controlados, la mayoría se pueden adaptar a las diferentes zonas y condiciones que presenten. La estructura cerrada protege al cultivo de las inclemencias del ambiente.

Todos los sistemas de producción en invernaderos requieren de controles ambientales similares, las principales diferencias están en el riego, los métodos de entrega de nutrientes y el sistema de control. La tecnología actual nos permite una independencia del ambiente natural cada vez mayor, donde se puede manipular y automatizar los factores medulares que hacen posible un cultivo óptimo.

Una característica importante de los invernaderos es que permite sembrar plantas fuera de temporada y reduce drásticamente el número de plagas que puedan afectar el cultivo.

El costo de construcción utilizando un sistema de control que optimice la producción es mayor comparado con los cultivos a cielo abierto o de temporal, ahora bien, un sistema controlado permite; ahorro de agua, fertilizantes y la posibilidad de ampliar el repertorio de especies a cultivar. El sistema cerrado también permite tener una densidad mayor de cultivos en diferentes etapas de crecimiento que se refleja en un sistema de cultivo altamente eficiente.

La independencia climática que ofrece un sistema cerrado se refleja en una mayor cantidad de ciclos productivos y una mayor densidad de siembra.

La capacidad y adaptabilidad de los cultivos en sistemas cerrados y controlados permite su implementación incluso en ciudades donde se carece de espacios para la práctica de la agricultura a cielo abierto.

## **1.2 Métodos de cultivo**

Cuando hablamos de un método de cultivo, resulta necesario hablar sobre agricultura, la cual podemos definir como el conjunto de técnicas y conocimientos relativos al cultivo de la tierra.

Actualmente, se tienen los conocimientos suficientes como para asegurar que la tierra o suelo, es un almacén de agua, oxígeno y nutrientes que la planta necesita para completar su ciclo biológico. Así mismo puede asegurarse que el suelo, como almacén, es generoso en sus aportaciones o contribuciones, pero es muy complejo en cuanto sus mecanismos de almacenamiento y liberación de sus contenidos.

Recordemos que todo terreno mantiene su vegetación naturalmente, esto es, sin intervención del ser humano y conserva por sí mismo su fertilidad. La causa principal de que esta fertilidad permanente se sostenga, es el gran número de plantas que crecen unas a lado de otras, que en conjunto cubre siempre el suelo protegiéndolo de la radiación solar directa y del impacto de la lluvia. Existe también una contribución derivada de la descomposición constante de materia orgánica por agentes atmosféricos. Cuando una planta muere, permite que los minerales del suelo no se agoten y estén siempre disponibles en el lugar, además del intercambio exterior de elementos como el hidrógeno, carbono, oxígeno y nitrógeno, que mantiene su equilibrio por la asimilación y procesamiento de la vegetación existente en el terreno con ayuda de la radiación solar (luz).

Es sabido que la capacidad productiva de una planta está en función de factores, como:

- Genéticos
- Climatológicos

- Hidrológicos
- Disponibilidad de nutrientes

La correcta gestión de estos factores en la producción dará como resultado final la productividad de la planta, entendiendo como productividad el máximo rendimiento al menor costo posible, teniendo en cuenta aspectos cualitativos y cuantitativos de producción.

Es importante mencionar que la agricultura convencional desde sus inicios, contó con la fertilidad natural del suelo y que el laboreo del terreno o labranza de la tierra, fue uno de sus pilares fundamentales, desde que el hombre se hizo sedentario y obligó al suelo que lo rodeaba a producir una determinada clase de plantas que necesitaba para su supervivencia. De este modo el hombre incorpora la labranza para desarrollar los cultivos de su interés.

Los objetivos de la labranza son:

*Control de malezas.* El propósito consiste en eliminar especies que compitan con el cultivo por el agua, luz y nutrientes. El control puede ser mecánico (con arados, rastras, cultivadores, rastras rotativas, escardillos, etc.) o químico, previo al cultivo o al post-cultivo.

*Preparación de la cama de siembra.* El propósito de la labranza consiste en lograr que las semillas germinen y las plántulas tengan condiciones satisfactorias para desarrollar su sistema radicular rápidamente. Una buena cama de siembra debe poseer las siguientes características:

- Permitir la filtración del agua de lluvia y retener solo la útil.
- Adecuada aireación.
- Baja resistencia a la penetración de raíces.
- Mantener residuos en superficie.

*Acondicionamiento de las propiedades físicas del suelo.* Tiene el propósito de favorecer el cumplimiento de procesos físico-químicos y biológicos, que permitan incrementar el contenido de materia orgánica, mejorando; aireación, filtración, exploración radicular y resistencia a la erosión.

Como objetivos secundarios de la labranza, podemos mencionar su incidencia en el control de plagas e insectos, además de enfermedades, que en determinados cultivos es de vital importancia.

De acuerdo a la intensidad de laboreo los métodos de labranza se pueden clasificar en:

- Métodos de labranza convencional
- Métodos de labranza de conservación
- Métodos de no labranza o siembra directa.

El empleo combinado de cualquiera de estos métodos puede ser una herramienta poderosa para reducir la compactación del suelo, mejorar la filtración de humedad, prevenir la formación del sellado del suelo superficial, mejorar el drenaje y corregir regímenes de humedad y temperatura desfavorable. Ya que el objetivo general de la labranza es modificar por medios mecánicos las condiciones físicas originales del suelo para mejorarlas, de acuerdo a los fines perseguidos.

La labranza tiene efectos directos sobre los procesos y propiedades físicas del suelo, e indirectos sobre el crecimiento de los cultivos.

El sistema de labranza a seleccionar debe además de incrementar los rendimientos del cultivo, reducir los riesgos de producción, mantener niveles adecuados de materia orgánica, facilitar la conservación de los suelos y agua. Mejorar el desarrollo del sistema radicular, mantener niveles adecuados de materia orgánica, y controlar o revertir procesos de degradación. Para ello es necesario conocer los efectos de cada sistema, los cuales dependerán de factores climáticos, de suelos y de cultivos.

Entre los factores biofísicos a considerar en la selección y aplicación de un sistema de labranza destacan:

- Clima
- Cultivo
- Propiedades del suelo
- Topografía
- Drenaje

*Método de labranza convencional.* Se define como el conjunto de operaciones primarias y secundarias realizadas para preparar una cama de siembra, para un cultivo dado en una región geográfica determinada.

En términos generales la labranza convencional se clasifica en: Labranza primaria y labranza secundaria.

Se entiende como labranza primaria a aquella destinada a abrir por primera vez el suelo, ya sea que se realicen con posterioridad a la cosecha del cultivo anterior o en la habilitación de tierras para la agricultura. Estas operaciones son realizadas por los diferentes tipos de arado.

La labranza secundaria incluye todas las operaciones de refinamiento y nivelación en la preparación de la cama de siembra.

Los métodos de labranza convencionales ya sea labranza primaria o labranza secundaria, producen modificaciones generalmente desfavorables desde el punto de vista de la conservación de algunas propiedades en los suelos que se traducen en:

- Degradación integral del recurso suelo (Propiedades físicas, químicas y biológicas)
- Incremento de las superficies agrícolas con problemas de erosión hídrica y eólica.
- Paulatina pérdida de productividad de los suelos.



*Métodos labranza de conservación.* Se pueden definir como cualquier método de labranza y siembra que reduce la pérdida de suelo y agua, en comparación con labranza convencional, y que además retiene cantidades protectoras de residuos de cosecha en la superficie. Después de la siembra debe haber por lo menos 30 por ciento de la superficie del suelo cubierta por residuos aportando así una reducción en la erosión por agua.

*Métodos de no labranza o siembra directa.* Es un método que puede entenderse como la introducción de la semilla en el suelo intacto, en grietas angostas, hendiduras o bandas de anchura y profundidad suficientes para que aquella resulte cubierta y en contacto con la tierra. De este modo surge un nuevo método que elimina las tradicionales labores de preparación del suelo para la producción de cultivos. Muchos son los términos aplicados a este método: agricultura sin laboreo, de labranza nula, en rastrojera, bajo paja y fiemo.

Dentro de las ventajas que obtenemos por este método de labranza las siguientes son relevantes:

- Control de erosión.
- Ahorro de energía.
- Flexibilidad en la plantación y recolección
- Aumento del uso de la tierra.
- Reducción de mano de obra.
- Mejora de la retención de agua, disminución de la evaporación y otras relaciones cultivo suelo.
- Las técnicas sin laboreo son aplicables a la mayoría de los cultivos.

Como con la mayoría de los métodos, el usuario debe sopesar sus desventajas. La agricultura sin laboreo no es la excepción. Aunque parezca más bien simple a primera vista, no es así; impone al agricultor un alto nivel de gestión. El empleo de abonos y el momento de su dispensa varían con respecto al laboreo convencional. Los productores deben aprender, técnicas de plantación basadas en sólidos principios en cuanto a

profundidad, contacto semilla/suelo y cobertura de la primera en ausencia de la pulverizada capa del segundo que suministra el propio laboreo. Los rangos de temperatura, especialmente en las capas superficiales son muy diferentes y pueden crear problemas en las zonas templadas. El control de malas hierbas representa un mayor problema sin laboreo y el control de insectos, roedores y enfermedades se complican.

A pesar de que los métodos de agricultura convencional se han enfocado a la tarea de ser sustentables no podemos dejar de lado que las malas prácticas agrícolas han repercutido con fuertes problemas de deforestación, erosión de los suelos y pérdida de biodiversidad.

Debido a esta problemática salen a relucir opciones que han sido planeadas para mitigar los efectos negativos de la agricultura convencional, tales como; cultivos bajo cubierta en los que podemos encontrarnos a los invernaderos y viveros, y de aquellos métodos que optan por soluciones nutritivas para sustituir el suelo agrícola, como lo es el cultivo hidropónico.

Un vivero es un conjunto de instalaciones que tiene como propósito fundamental la producción de plantas. En estos lugares se ayuda a crecer a las plantas desde que se multiplican o sus semillas germinan, hasta que salen de él para ser plantadas en un lugar definitivo. La producción de material vegetativo en estos sitios constituye una buena opción para seleccionar, producir y propagar masivamente especies útiles al hombre, además de prevenir y controlar los efectos de depredadores y de enfermedades que puedan dañar al cultivo.

Dado que no todos los viveros son iguales, ni producen los mismos tipos de plantas, podemos catalogarlos según las especies producidas:

- Forestales: Orientados exclusivamente a la producción de planta para reforestación.

- Ornamentales: Producen especies decorativas tanto para exteriores (parques, jardines, etc.) como para interiores.
- Agrícolas: Producen plántones de frutales a partir de plantas seleccionadas, o planta hortícola, para su cultivo posterior.
- Para flor cortada: Producen los plántones que se utilizarán para la producción de flor en otros viveros, o directamente para su venta.

Los materiales básicos para la construcción de un vivero son postes para el armazón, malla sombra para cubrir la estructura, bolsas de plástico y por supuesto, materiales consumibles como semillas y tierra.

A pesar de que un invernadero cumple con funciones similares a las de un vivero, un invernadero cuenta con características que lo hacen más sofisticado en comparación con un vivero, ya que en un vivero, es común que se cultiven plantas propias del clima en donde éste se encuentre, sin embargo en un invernadero, con los sistemas adecuados es posible obtener producción de plantas que no necesariamente son endémicas de la zona e inclusive producir cultivos fuera de temporada, que en circunstancias climáticas al aire libre no es posible llevar a cabo.

Respecto al invernadero podemos definirlo como un recinto delimitado por una estructura de madera o metal, recubierta por vidrio o cualquier material plástico transparente, según el cultivo y la época los invernaderos deben ser dotados de sistemas de calefacción que permita la adición de calor que como se hizo mención, en su interior suelen cultivarse hortalizas y plantas ornamentales, en épocas durante las cuales las condiciones climáticas externas no permiten obtener estas. En determinadas circunstancias también pueden ser dotados de sistemas que permitan una iluminación artificial complementaria o suplementaria, así como otros elementos que sirvan para regular determinados componentes del medio (temperatura, humedad, pH, etc.).

Sin embargo, pese a que un invernadero pasa a brindar ciertas ventajas frente al cultivo al aire libre, éste sigue dependiendo en muchos casos, del suelo agrícola, y no es hasta

que el agricultor recurre a los métodos de cultivo sin suelo en donde comienza el verdadero cambio en las prácticas agrícolas convencionales explotando la eficiencia y funcionalidad de estos métodos de cultivo.

El cultivo sin suelo o hidroponía es un método utilizado para cultivar plantas usando soluciones minerales en vez de suelo agrícola. La hidroponía permite diseñar estructuras simples y/o complejas favoreciendo las condiciones ambientales idóneas para producir cualquier tipo herbáceo aprovechando en su totalidad cualquier área (azoteas, jardines, suelos infértiles, terrenos escabrosos, etc.). Lo que hace que éste método de cultivo juegue un papel importante en la agricultura del futuro y que tenga un gran valor para los sistemas ecológicos, al maximizar el aprovechamiento tanto energético como de espacio, además del ahorro de agua entre otras cosas. Aunque basándonos en la definición inicial, el hecho de cultivar una planta sin colaboración de la tierra o el suelo, no se le podría considerar como una actividad agraria.

Como ya se ha mencionado, el suelo es un almacén de agua, oxígeno y nutrientes y hace más de un siglo estos razonamientos se hicieron y los investigadores trataron de encontrar sustitutos al suelo. La idea global es encontrar un material, medio o sistema que sea capaz de almacenar el agua, oxígeno y nutrientes que la planta necesita y a la vez los tenga disponibles para ella, en tiempo y forma.

El cultivo sin suelo presta atención en la disponibilidad del agua y nutrición, pero aunque se cubran estos aspectos no es posible darle solución a todos los problemas que implica la producción.

Al igual que en cualquier método de cultivo, el cultivo sin suelo tiene como fin obtener una mayor rentabilidad. Esto se puede lograr reduciendo costos, solucionando algún problema determinado o bien, aumentando la calidad y/o cantidad.

La técnica de cultivo sin suelo intenta conseguir una mayor rentabilidad en base a tres ventajas fundamentales:

- Óptima relación aire/agua
- Ausencia de enfermedades
- Control perfecto de nutrición

La práctica ha demostrado que estas afirmaciones, no son totales ni se puede aplicar a los todos los sustratos usados en este método de cultivo. Así, la relación aire/agua, dependerá, no solamente de las propiedades físicas del sustrato que se utilice, sino también del volumen empleado y del diseño que se presente.

En cuanto a la ausencia de enfermedades, no significa que no se puedan presentar durante el cultivo. Siendo más precisos, hay que decir que los sustratos se presentan libre de patógenos, y esto es cierto para aquellos sustratos que incluyen en su fabricación algún proceso de calor o los que son sometidos a una desinfección. No se puede ser tajante en este asunto con aquellos sustratos que se utilizan tal y como se encuentran en la naturaleza.

La tercera ventaja, se refiere al control perfecto de la nutrición, esta sólo se dará en aquellos sustratos que son químicamente inertes y aun así, las respuestas estarán muy influenciadas por factores climáticos como; humedad, temperatura, etc.

Es por eso que a pesar de que estas ventajas no pasan a ser absolutas en el cultivo sin suelo, este método y en particular con determinados sustratos, presentan una notable mejora si lo comparamos con el suelo.

El cultivo sin suelo es una técnica que lleva funcionando décadas en varias partes del mundo, en lo referente al manejo se puede decir que generalmente, tanto a los técnicos como a los agricultores que han vivido la experiencia, afirman que es una técnica sencilla. Los métodos que se aplican para su control simplifican bastante el manejo y puede afirmarse que resulta más fácil que un cultivo tradicional. Si bien es cierto que hay que ser más constantes en el trabajo presentándole más atención e inclusive más cuidados, de lo contrario los riesgos que se corren son mayores que en suelo.

En lo que se refiere a los costos hay que tener en cuenta al sustrato que se trate, además del costo del mismo, habrá que considerar los distintos costos de cultivo que originan diferentes sustratos. Una vez clarificado este punto se puede demostrar que la diferencia de gastos entre el cultivo sin suelo y el cultivo tradicional no resulta tan grande y en algunos casos hasta puede resultar más barato.

*Sustratos.* Un sustrato de cultivo es un medio material en donde se desarrollan las raíces de las plantas, limitado físicamente a su volumen, aislado del suelo para impedir el desarrollo de sus raíces, capaz de proporcionar a la planta el agua, los elementos nutritivos que demande y a las raíces el oxígeno necesario para su respiración.

Atendiendo a los diferentes tipos de materiales utilizados como sustratos estos se pueden clasificar, según su origen y proceso de manufactura, de la siguiente forma:

- Orgánicos
- Inorgánicos:
  - De origen natural: sin manufacturación; con manufacturación.
  - Sintéticos.

Los sustratos se pueden utilizar solos o mezclados. Para el cultivo en macetas, de plantas ornamentales. Para semilleros y enraizamiento de esquejes. Para mezclarlos con el suelo y modificar las propiedades del mismo. Las posibilidades para su uso son numerosas, pero habrá que acotar a los sustratos en función de su uso para el cultivo de hortalizas.

Los sustratos orgánicos más conocidos y de uso más común son las turbas, acícula de pino, cascarilla de arroz, aserrín, etc.

Dentro de los sustratos inorgánicos de origen natural, y que no sufren proceso alguno previo a su uso, se incluye a las gravas, las arenas de distinta granulometrías y las tierras de origen volcánico.

En los sustratos inorgánicos de origen natural, pero con procesos de manufacturación incorporados antes de su uso (normalmente tratados con calor), se incluyen la lana de roca, la vermiculita, la perlita y la arlita.

Los sustratos sintéticos incluyen el poliestireno y el poliuretano.

Dentro del cultivo hidropónico, existe una variante en la que no se requiere sustrato ya que el crecimiento de la planta es directamente sobre el agua, con la solución nutritiva disuelta en ella.

Existe además la aeroponía, que tampoco requiere de un sustrato y en el cual la raíz permanece al aire libre, en un contenedor que la mantiene en la obscuridad, donde se aplica la solución nutritiva en forma de aerosol o en forma de niebla.

*Soluciones nutritivas.* Las plantas necesitan, para el desarrollo de su ciclo vital, una serie de elementos químicos que se denominan elementos nutritivos. Todos estos elementos son importantes y los necesita la planta en grandes cantidades, se les denomina microelementos u oligoelementos.

Todos los elementos nutritivos esenciales para la planta son tomados o asimilados en forma de iones. Estos iones pueden ser positivos (cationes) o negativos (aniones). En la Tabla 1.2.1, se muestran los elementos nutritivos considerados esenciales para la planta, además se incluye lista de iones que aunque no son vitales para la planta, se encuentran en las aguas de riego, por lo que deben tenerse en cuenta en la elaboración de estas soluciones nutritivas.

**Tabla 1.2.1 Elementos nutritivos**

| Elemento químico | Símbolo químico | Peso atómico | Forma iónica          | Peso del ión |
|------------------|-----------------|--------------|-----------------------|--------------|
| Nitrógeno        | N               | 14           | $NH_4^+$<br>$NO_3^-$  | 18<br>62     |
| Fósforo          | P               | 31           | $H_2PO_4^-$           | 97           |
| Potasio          | K               | 39           | $K^+$                 | 39           |
| Calcio           | Ca              | 40           | $Ca^{++}$             | 40           |
| Magnesio         | Mg              | 24           | $Mg^{++}$             | 24           |
| Azufre           | S               | 32           | $SO_4^{=}$            | 96           |
| Hierro           | Fe              | 56           | $Fe^{++}$             | 56           |
| Manganeso        | Mn              | 55           | $Mn^{++}$             | 55           |
| Zinc             | Zn              | 65.5         | $Zn^{++}$             | 65.5         |
| Boro             | B               | 11           | $B_4O_7^{=}$          | 155          |
| Cobre            | Cu              | 64           | $Cu^{++}$             | 64           |
| Molibdeno        | Mo              | 96           | $MoO_4^{=}$           | 160          |
| Carbono          | C               | 12           | $HCO_3$<br>$CO_3^{=}$ | 61<br>60     |
| Cloro            | Cl              | 35.5         | $Cl^-$                | 35.5         |
| Sodio            | <u>Na</u>       | 23           | $Na^+$                | 23           |
| Oxígeno          | O               | 16           | Está en otros iones   |              |
| Hidrógeno        | H               | 1            | Está en otros iones   |              |

*Sistemas de riego.* La forma en que se aportan las soluciones nutritivas varía sustancialmente de acuerdo al sistema de cultivo sin suelo empleado. Dentro de los métodos hidropónicos en medio totalmente líquido, sin sustrato, podemos encontrar distintos sistemas como:



- Hidroponía de flujo profundo: NGS
- Sistemas flotantes: Bandejas flotantes.
- Sistemas por lámina de agua: NFT.

Dentro de los sistemas hidropónicos en sustrato podemos encontrar los siguientes sistemas de riego:

- Riego por goteo
- Subirrigación
- Exudación.

En cuanto a los sistemas aeropónicos, el modo de riego puede ser por sistemas de baja presión, en donde utilizando una bomba de agua normal se pulverizan o salpican las raíces de las plantas utilizando pequeños aspersores, y los sistemas de alta presión, en donde se utilizan bombas especializadas, que tienen como objetivo que el agua salga por los aspersores en forma de gotas microscópicas (niebla).

Este conjunto de técnicas ha cambiado y evolucionado a lo largo del tiempo con el objeto de poder satisfacer la demanda de alimentos que día a día crece en todas partes del mundo. En la actualidad los agricultores hacen uso de métodos cada vez más eficientes para producir alimentos y a su vez mitigar los daños que conlleva el uso del suelo en la agricultura convencional, tal como la erosión y la deforestación resultado de expandir zonas de cultivo.

### **1.3 Tipos de iluminación en un invernadero**

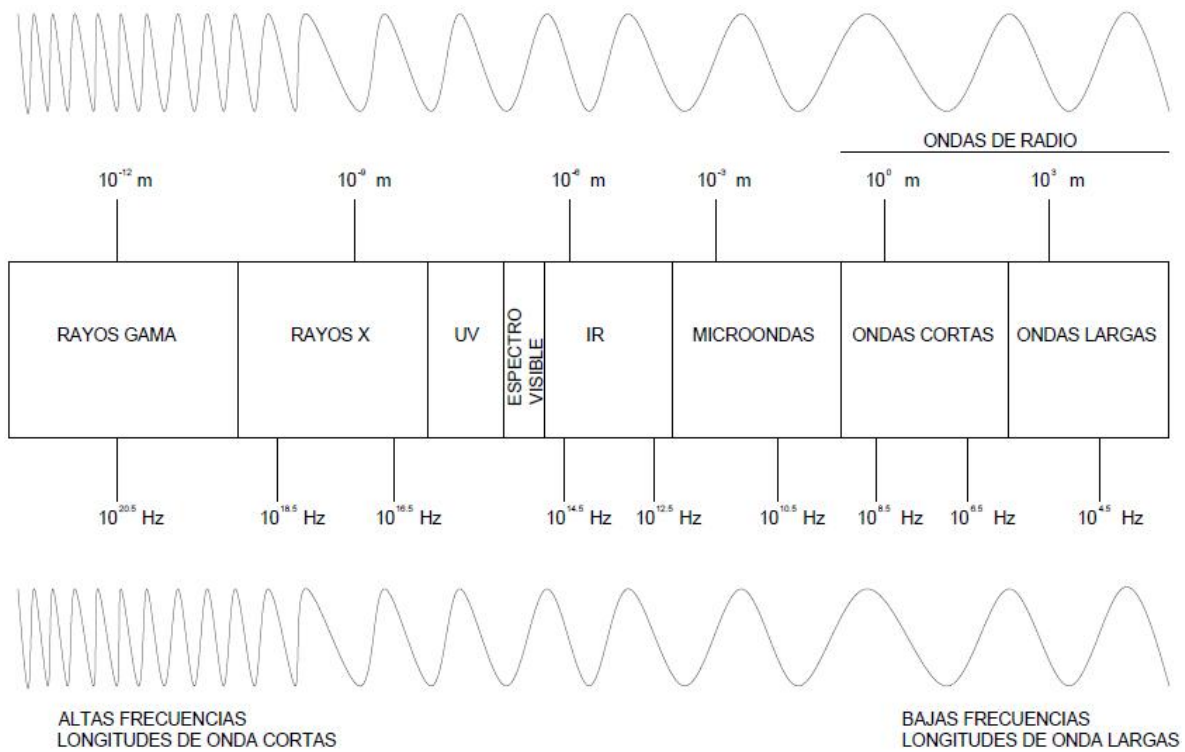
La luz es vital para todos los aspectos de la vida, para la agricultura es indispensable. La influencia de ésta en el desarrollo de las plantas depende de la cantidad que reciban. Tiene un rol importante en la rapidez y calidad del crecimiento, además por supuesto del fertilizante utilizado, la humedad del suelo y del ambiente, y la temperatura ambiental.

El crecimiento de las plantas depende del constante abastecimiento de compuestos orgánicos. Estos los obtiene al realizar el la fotosíntesis (asimilación del bióxido de carbono), proceso biológico que tiene lugar solamente en presencia de la *luz* y esta la podemos obtener mediante fuentes naturales o artificiales o en combinación de ambas.

Es este nuestro caso optamos por el uso de la luz artificial, en sustitución total o parcial de la luz natural (diurna), con lo que podemos lograr: acelerar el crecimiento, aumentar la cosecha y mejorar la calidad de las plantas.

Las longitudes de onda del espectro electromagnético cubren una amplia gama de ondas largas, por ejemplo, la radiación de la línea de energía eléctrica de 50 Hz a 60 Hz es muy corta en comparación a los rayos Gamma. Estos rangos constituyen el espectro electromagnético, el cual es clasificado según sus aplicaciones en rangos de frecuencia. La luz blanca es una mezcla de sus siete componentes de luz y estas tienen diferentes longitudes de onda entre si al pasar por un prisma se descomponen y se ven los diferentes colores de luz visible. Dos tipos de espectros son importantes el espectro de emisión y el espectro de absorción.

El espectro de emisión es obtenida de la luz que emite la fuente y el espectro de absorción es adquirido de la luz que atraviesa un medio absorbente. Las temperaturas alrededor del cero absoluto en los materiales producen una emisión electromagnética. Los cuerpos a diferentes temperaturas emiten energía en forma de calor o radiación a diferentes longitudes de onda o color, por ejemplo los cables en un calentador eléctrico comienzan a brillar al rojo vivo cuando una corriente eléctrica atraviesa por ellos. La radiación de un cuerpo negro tiene el significado teórico como la máxima auto radiación esperada en función de la temperatura de los cuerpos. La distribución máxima de energía de esta radiación puede estar en cualquiera de las tres regiones, la región infrarroja, visible y ultravioleta del espectro electromagnético. La radiación máxima para un objeto a temperatura ambiente se encuentra en la región infrarroja mientras que el sol tiene su pico en la región visible del espectro electromagnético.



**Figura 1.3.1 Espectro electromagnético.**

Para nuestro estudio los fragmentos de interés para las plantas son: el azul, rojo, incluyendo el llamado rojo lejano. Las longitudes de onda de estos colores y sus principales características en las plantas, son:

- Azul, con una longitud de onda comprendida entre 400 y 500 [nm]

Es responsable principalmente del crecimiento vegetativo, esto es, desde su germinación hasta la floración, pero si a una planta únicamente le proporcionamos luz azul, crecerá con una estatura baja y con un color más oscuro.

- Rojo y rojo lejano, su longitud de onda va de 600 a 700 [nm]

Esta relación de colores es responsable del alargamiento del tallo de las plantas, especialmente con luz directa, además, de determinar la floración en plantas sensibles a

la duración de los días. Esto es plantas que crecen mejor en luz directa, son más sensibles y las que prefieren la sombra, son menos sensibles.

- Azul y rojo.

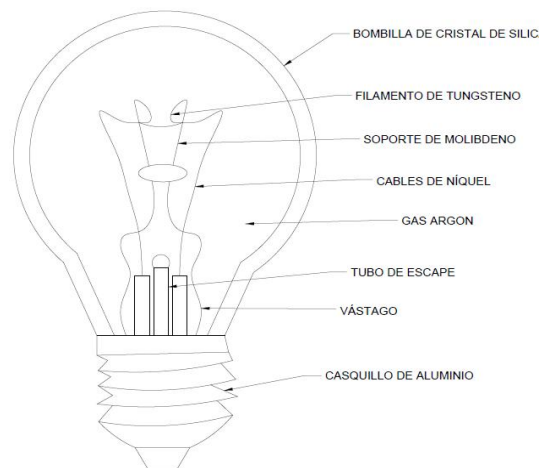
Por otro lado la combinación de estos colores favorece la floración.

Para finalizar podemos afirmar que aun cuando las plantas carecen de receptores luminosos específicos, responden a la luz con movimientos de crecimiento y exhiben cambios periódicos relacionados con el número de horas de luz en ciclos de veinticuatro horas y que con la alteración del número de horas de luz, es decir al cambiar las estaciones, determina el tiempo de floración y fructificación.

#### *Características de las fuentes de iluminación artificial.*

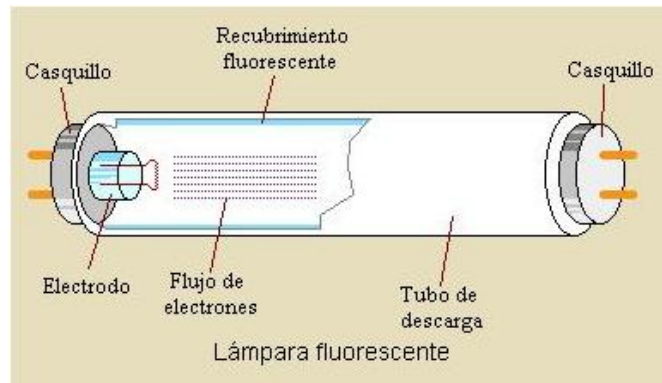
*Lámparas incandescentes:* El fundamento de estas lámparas se basa en la emisión de la luz producida por un filamento llevado a la incandescencia por el paso de una corriente eléctrica. Para conseguir una mayor emisión posible, la temperatura del filamento también deberá ser la mayor posible.

Su construcción es muy simple: consiste en una ampolla rellena de gas argón, que para evitar su ionización incorpora una mezcla de nitrógeno en proporciones que varían del 8 al 15%. El material con el que está hecho el filamento es de Tungsteno por sus propiedades de brillo al paso de una corriente eléctrica, además que este no se funde, este a su vez esta soportado por unos filamentos de material Molibdeno. Los cables o hilos conductores están hechos de Níquel. El casquillo esta hecho de aluminio. El vástago da soporte a las partes conductoras.



**Figura 1.3.2 Lámpara incandescente.**

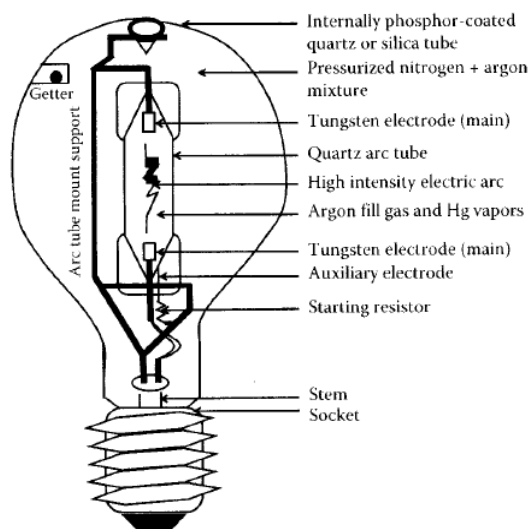
*Lámparas fluorescentes:* es una lámpara de descarga de vapor de mercurio de baja presión con cualidades que a bajas presiones, los electrones tienen una temperatura de 11,000-13,000 K, mientras que los iones se encuentran en equilibrio térmico con el ambiente a una temperatura de 310 K, el vapor de mercurio a bajas presiones no emite luz visible pero la radiación UV con otros elementos como el fósforo, o el halofosfato de calcio con ion de antimonio y manganeso, provocan que haya luz visible. El ion de antimonio actúa como un sensibilizador y activador convirtiendo los rayos ultravioleta absorbidos en una banda ancha con un pico a 480 [nm] Esta radiación se transmite parcialmente al ion de manganeso que emite a 580 [nm] Desde el punto de vista constructivo, una lámpara fluorescente aparece como un tubo largo hecho de vidrio bajo en sodio. En cada extremo del tubo, se escala una montura de electrodo. Su tapa contiene conectores para fijar el tubo en el accesorio de pared y debido a su distribución luminosa uniforme, baja temperatura de operación, reducido consumo de energía y larga duración son lámparas preferidas en el mercado.



**Figura 1.3.3 Lámpara fluorescente**

*Lámparas de vapor de mercurio a alta presión:* Funciona según el principio de descarga eléctrica luminosa en un gas. En un tubo de descarga, se aplica un campo eléctrico entre dos electrodos, el ánodo y el cátodo, instalados en un tubo transparente que contiene un gas como el argón, a baja o alta presión. Debido al campo eléctrico aplicado, el gas se descompone y se ioniza parcialmente produciendo iones positivos, electrones, etc. Es una mezcla de átomos y moléculas ionizadas y neutras algunas de los cuales han alcanzado sus estados de excitación. Los iones positivos y los electrones en el gas se aceleran hacia los electrodos opuestos. En el camino tienen colisiones con átomos de gas que liberan electrones y producen más iones. Los iones y electrones así generados también comienzan a moverse hacia los electrodos respectivos e inician nuevas colisiones en tránsito. De esta manera, se mantiene un flujo continuo de portadores de carga en el plasma que consiste en iones, electrones, partículas neutras, etc. Dentro de la corriente de gas. Al disminuir el campo eléctrico, la descarga continua hasta que se alcanza un campo eléctrico mínimo necesario para mantener. En esta etapa se evita la descomposición de la avalancha debido a la ionización por impacto y se produce la estabilización de la descarga. Al disminuir aún más el campo eléctrico por debajo de este valor crítico requerido para sostener la descarga finalmente se apaga y el campo debe aumentarse nuevamente para reiniciarlo. La descarga se asocia con la emisión de luz en algunas de las partes del tubo porque los iones y átomos excitados a veces pierden energía en forma de luz y disminuyen a estados de energía más bajos. Por lo tanto la descarga de gas se convierte en fuente de luz. La diferencia entre una descarga de gas

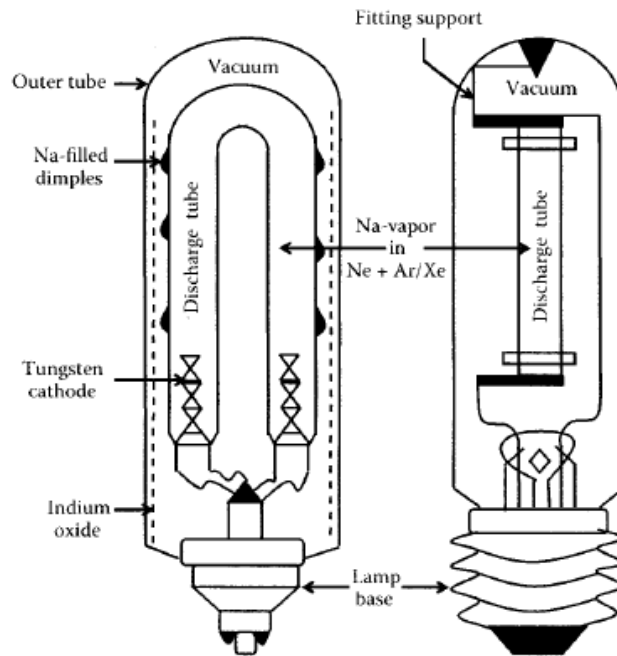
de alta presión y una descarga de baja presión es que en el primero, los iones pesados se calientan a la misma temperatura que los electrones mediante colisiones elásticas.



**Figura 1.3.4 Lámpara de mercurio**

*Lámparas de vapor de sodio:* En una lámpara de vapor de sodio la descarga eléctrica tiene lugar en vapor de sodio, que puede llenarse a baja o alta presión. La lámpara de baja presión emite una luz amarilla monocromática característica que consta de longitudes de onda de 589.0 y 589.6 [nm] Mientras que la lámpara de alta presión produce luces anaranjadas y verdes. El punto de fusión del sodio es más alto que el de mercurio y la temperatura óptima de operación es de 530 K. Además, el sodio caliente es químicamente reactivo y se deben tomar más precauciones con respecto a la construcción.

El principal inconveniente de esta lámpara es su pobre rendimiento de color. Sin embargo es ampliamente utilizado en el alumbrado público porque la luz amarilla de la lámpara de baja presión es menos absorbida que la luz blanca y por tanto, menos obstaculizada por la niebla.



**Figura 1.3.5. Lámparas de sodio de alta presión**

*Lámparas LED.* Con el desarrollo tecnológico, este tipo de iluminación ha evolucionado hasta convertirse en la fuente de luz preferida para la industria en general, así como su uso residencial y su utilización va en aumento debido a su alto rendimiento y eficiencia.

El costo aún es elevado, sin embargo, si comparamos a largo plazo el número de lámparas que necesitamos cambiar respecto a las de LED significa un ahorro.

#### **1.4 Monitoreo de parámetros en un invernadero**

El desarrollo de los cultivos, en sus diferentes fases de crecimiento, está condicionado por cuatro factores ambientales o climáticos: temperatura, humedad relativa, luz y CO<sub>2</sub>. Para que las plantas puedan realizar sus funciones es necesaria la conjunción de estos factores dentro de unos límites mínimos y máximos, fuera de los cuales las plantas cesan su metabolismo, pudiendo llegar a la muerte.

*Temperatura.* Este es el parámetro más importante a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es el que más influye en el crecimiento y



desarrollo de las plantas. Normalmente la temperatura óptima para las plantas se encuentra entre los 10 y 20° C.

Para el manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada. Así mismo se deben aclarar los siguientes conceptos de temperaturas. En la Tabla 1.4.1, se indican los valores objetivos a tener en cuenta para el buen funcionamiento del cultivo y sus limitaciones:

- Temperatura mínima letal. Aquella por debajo de la cual se producen daños en la planta.
- Temperaturas máximas y mínimas biológicas. Indican valores, por encima o por debajo respectivamente del cual, no es posible que la planta alcance una determinada fase vegetativa, como floración, fructificación, etc.
- Temperaturas nocturnas y diurnas. Indican los valores aconsejados para un correcto desarrollo de la planta.

**Tabla 1.4.1 Exigencias de temperatura para distintas especies**

| <b>Temperatura</b>      | <b>Tomate</b> | <b>Pimiento</b> | <b>Berenjena</b> | <b>Pepino</b> | <b>Melón</b> | <b>Sandía</b> |
|-------------------------|---------------|-----------------|------------------|---------------|--------------|---------------|
| <b>Mínima letal</b>     | 0-2           | (-1)            | 0                | (-1)          | 0-1          | 0             |
| <b>Mínima biológica</b> | 10-12         | 10-12           | 10-12            | 10-12         | 13-15        | 11-13         |
| <b>Óptima</b>           | 13-16         | 16-18           | 17-22            | 18-18         | 18-21        | 17-20         |
| <b>Máxima biológica</b> | 21-27         | 23-27           | 22-27            | 20-25         | 25-30        | 23-28         |
| <b>Máxima letal</b>     | 33-38         | 33-35           | 43-53            | 31-35         | 33-37        | 33-37         |

La temperatura en el interior del invernadero, va a estar en función de la radiación solar, comprendida en una banda entre 200 y 4000 [nm] la misión principal del invernadero será la de acumular calor durante las épocas invernales.

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

El calor se transmite en el interior del invernadero por irradiación, conducción, infiltración y por convección, tanto calentando como enfriando. La conducción es producida por el

movimiento de calor a través de los materiales de cubierta del invernadero. La convección tiene lugar por el movimiento del calor por las plantas, el suelo y la estructura del invernadero. La infiltración se debe al intercambio de calor del interior del invernadero y el aire frío del exterior a través de las juntas de la estructura. La radiación, por el movimiento del calor a través del espacio transparente.

*Humedad relativa (HR)*. La humedad es la masa de agua en unidad de volumen, o en unidad de masa de aire. La humedad relativa es la cantidad de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura.

Existe una relación inversa de la temperatura con la humedad por lo que a elevadas temperaturas, aumenta la capacidad de contener vapor de agua y por tanto disminuye la HR. Con temperaturas bajas, el contenido en HR aumenta.

Cada especie tiene una humedad ambiental idónea para vegetar en perfectas condiciones: tomate, pimiento y berenjena gustan de una HR sobre el 50-60%; al melón, entre el 60-70%; al calabacín, entre el 65-80% y al pepino entre el 70-90%.

La HR del aire es un factor climático que puede modificar el rendimiento final de los cultivos. Cuando la HR es excesiva las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades criptogámicas. Por el contrario, si es muy baja, las plantas transpiran en exceso, pudiendo deshidratarse, además de los comunes problemas de mal cuaje.

Para que la HR se encuentre lo más cerca posible del óptimo el agricultor debe ayudarse del higrómetro. El exceso puede reducirse mediante ventilado, aumento de la temperatura y evitando el exceso de humedad en el suelo. La falta puede corregirse con riegos, llenando canalillas o balsetas de agua, pulverizando agua en el ambiente, ventilado y sombreado. La ventilación cenital en invernaderos con anchura superior a 40 [m] es muy recomendable, tanto para el control de la temperatura como de la HR.

*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 el mínimo las sombras interiores.
- Aumento del ángulo de incidencia de las radiaciones sobre las cubiertas.
- Acolchados del suelo con plástico blanco.

En verano para reducir la luminosidad se emplean:

- Blanqueo de cubiertas.
- Mallas de sombreo.
- Acolchados de plástico negro.

Es interesante destacar el uso del blanqueo 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.

*CO<sub>2</sub> (Opcional).* 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, tanto en hortalizas como en flores.

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 que no se aplique 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  $\text{CO}_2$  puede llegar a límites mínimos de 0,005-0,01%, que los vegetales no pueden tomarlo y la fotosíntesis es nula. En el caso 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  $\text{CO}_2$  para poder realizar la fotosíntesis.

Los niveles aconsejados de  $\text{CO}_2$  dependen de la especie o variedad cultivada, de la radiación solar, de la ventilación, de la temperatura y de la humedad. El óptimo de asimilación está entre los 18 y 23° C de temperatura, descendiendo por encima de 23-24° C. Respecto a la luminosidad y humedad, cada especie vegetal tiene un óptimo distinto.

El efecto que produce la fertilización con  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  es proporcional a la cantidad de luz recibida, además de depender también de la propia concentración de  $\text{CO}_2$  disponible en la atmósfera. 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.

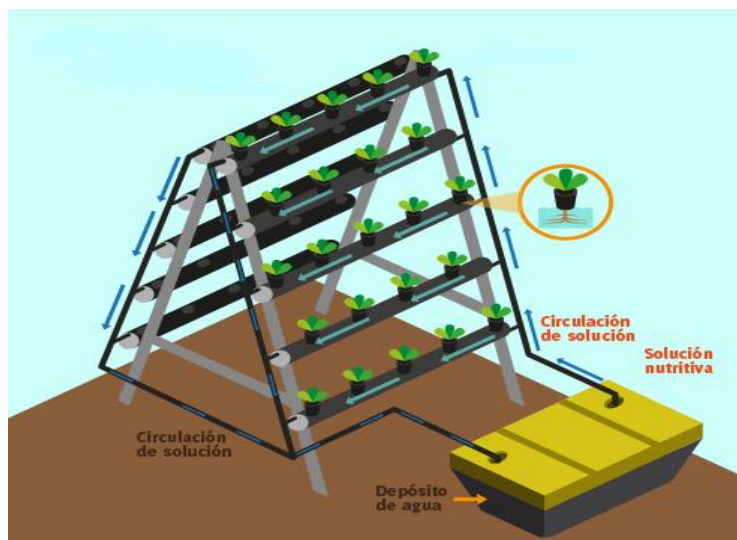
*Control ambiental.* El control ambiental está basado en manejar de forma adecuada todos aquellos sistemas instalados en el invernadero: sistema de calefacción, la ventilación y el suministro de fertilización carbónica, para mantener los niveles adecuados de la radiación, temperatura, humedad relativa y nivel de  $\text{CO}_2$ , y así

conseguir la mejor respuesta del cultivo y por tanto, mejoras en el rendimiento, precocidad, calidad del producto y calidad del cultivo.

### 1.5 Alcance y acotamiento del Problema

*Alcance.* El objetivo principal, es normalizar una hidroponía en cualquier superficie vertical, sin tener grandes superficies de cultivo, por lo cual empezaremos con cosas muy sencillas como son:

*Tipo de estructura.* El objetivo, producir algún cultivo fuera de temporada, es primordial que nuestra estructura sea firme, y bien construida ya que al utilizar armazones tubulares solamente se producirán cultivos estacionales.



**Figura 1.5.1. Estructura convencional**

#### *Recubrimiento*

Todos los parámetros ambientales en el interior del invernadero adquieren valores distintos a los que existen al aire libre, esto ocurre por el simple efecto de la cubierta pero el cultivador modifica aún más el ambiente con sus acciones de climatización porque quiere lograr las condiciones óptimas para las plantas que está cultivando. La propia luz, es decir, las radiaciones solares que el ojo humano percibe sufre una alteración más o menos sensible según el grado de transparencia del material de

recubrimiento. Esta alteración de factor de luz realiza en dos categorías: Cuantitativa, cuando se altera la intensidad luminosa, y cualitativa cuando concierne el espectro reduciendo o impidiendo el paso de las radiaciones de ciertas longitudes de onda. Las operaciones de acondicionamiento del clima en el interior del invernadero, es decir, la intervención del agricultor, habían consistido hasta ahora en modificar la luz en sentido cuantitativo es decir, se había limitado en reducir la intensidad de luz con materiales de sombreadamiento, o aumentarla usando la luz artificial. Se puede, alterando la duración de la iluminación del día cuando sea necesario, actuar sobre el fotoperiodismo. Hasta ahora no se había tenido en cuenta la posibilidad de modificar la luz también en sentido cualitativo, cosa pueda resultar de mucho interés para algunos cultivos y que ha sido objeto de estudios profundos.

La conveniencia económica la eficiencia de que cualquier medio de protección depende en cierta medida de las características de recubrimiento. Este en particular, influye e modo importante en el balance energético de la instalación, ya que a través de su superficie en general muy amplia se produce de los intercambios energéticos entre el ambiente exterior y el confinado. El material de recubrimiento tiene que, en la mayoría de los casos favorecer la entrada de la radiación solar incidente (máxima transparencia a las radiaciones que van de UV largo al IR). Al mismo tiempo limitar especialmente las horas nocturnas la dispersión de la energía térmica acumula (mínima transparencia que emergen IR légano). En relación con el primer punto conviene recordar que la intensidad de luz que nuestras regiones llega al suelo durante los meses de invierno es inferior que resulta necesaria para la fotosíntesis por ello es suma importancia establecer que cada material de recubrimiento el porcentaje de radiación fotosintéticamente activa comprendida entre 400 y 700 [nm] de longitud de onda que pueden transmitir.

Una indicación del material de recubrimiento a la radiación infrarroja, y en consecuencia de su termicidad se obtiene por el contrario determinando la transparencia en las bandas de IR, comprendidas en 7.5 y 12.5 [ $\mu\text{m}$ ] de longitud de ondas y que corresponden al espectro de emisión de cuerpo negro al que se asimila el terreno.

Además de las propiedades ópticas ya nombradas en el material de recubrimiento son asimismo importantes las propiedades físico mecánicas. Sobre la base de estos requisitos se puede tener una idea al respecto a la conveniencia, con fines técnicos de aplicación y económicos, de un recubrimiento que tendrá que llevarse a cabo y permanecer sobre las estructuras de la instalación durante el tiempo previsto por la disposición del cultivo.

*Cristal:* Desde el punto de vista óptico sus ventajas son elevadas como la transmisión del espectro visible y no modificar sensiblemente el espectro de emisión solar, además tiene características muy interesantes relativas a la energía calorífica. El cristal resulta ser un excelente aislante en este sentido ya que posee un efecto invernadero además de ser un aislante térmico y conservar por mucho tiempo sus propiedades puesto que es insensible a la radiación natural, no se altera por efecto de los ácidos y de la humedad y es incombustible.

A veces se sigue utilizando cristal translucido de 2-3 [mm] de espesor, sin embargo esto provoca un efecto de lupa que resulta perjudicial para las plantas por lo que se ha sustituido con cristal tosco de unos 4-6 [mm] de espesor que permite una mayor difusión de luz y que además puede ser utilizado en planchas de un tamaño mayor que las de cristal translucido. Cuando haya que escoger un cristal para el recubrimiento de los invernaderos, hay que tener en cuenta no solamente el factor económico, sino que hay que pensar también en las consecuencias de carácter fisiológico que provocan estos tipos de cristales.

*Materiales plásticos:* Para la preparación de materiales de recubrimiento se utilizan diferentes polímeros. Con algunos de estos se preparan laminados flexibles (filmes), con otros por lo contrario planchas rígidas (solo con el PVC se fabrican los filmes como las planchas). De acuerdo con la naturaleza química del polímero, como el proceso de la elaboración de artículos manufacturados que se preparan presentan propiedades específicas que hacen que resulten idóneos a las diferentes aplicaciones específicas

*Con el polietileno (LDPE)* a diferencias de los demás polímeros es posible, la extrusión en el proceso de fabricación de artículos manufacturados cuyas dimensiones (hasta 18



m de anchura) se prestan bien al recubrimiento de grandes instalaciones aunque varíen en la conformación y estructura. Las propiedades físico-mecánicas específicas del polietileno son de hecho tantas que hay que considerar en el estado actual, insustituible para la realización de materiales de recubrimiento adaptados unos determinados tipo de instalaciones protegidas. El polietileno asegura una resistencia y una indeformabilidad mayor al artículo manufacturado en relación con las obtenidas con otros polímeros, y permite un recubrimiento eficiente de invernaderos.

Con la estabilización del polímero ha sido posible obtener un film cuya duración, en determinadas condiciones ambientales de exposición, resulta variable, dependiendo del porcentaje y la formulación de los adictivos presentes en el polímero pero a pesar es siempre superior (incluso hasta 45 meses) a la duración estación de los films no adictivos. La degradación del polímero (producidas por la acción conjunta de luz, temperatura y oxígeno) se obstaculiza en este caso al añadir el polietileno diferentes compuestos químicos, distintos en antioxidantes. En realidad son las radiaciones UV quienes dan origen al proceso de degradación del polímero, provocando rotura en sus lazos químicos haciendo que sea más susceptible a la acción del oxígeno (proceso termo-oxidativo).

*Poli metacrilato de metilo* (PMMA) Es el polímero más importante para la preparación de láminas rígidas de alta calidad y larga duración. Algunas características ópticas y físico mecánicas como la elevada transparencia al radiación solar incidente (superior a la del cristal, tanto como en las bandas e luz visible como en las del UV) incluso después de números años de exposición, la reducidísima conductibilidad térmica, la fuerte inercia hacia la acción de los agentes atmosféricos, la importante ligereza todo esto hace que aparezca idóneo para emplearlo como material de recubrimiento. De todos modos presenta una dureza inferior a la del cristal (que por tanto lo hace bastante susceptible a las abrasiones superficiales) y un coeficiente dilatación lineal más bien elevado de tal modo que presupone una habilidad especial para la fijación de las láminas a la estructura al invernadero (incluso onduladas).

Las diferentes clases de láminas de PMMA hasta hace poco tiempo se utilizaban de manera conveniente en los cultivos de alto rendimiento (florales) en la actualidad, el precio más estable ha permitido que se difundiera de modo importante incluso para la horticultura protegida.

*Resina de poliéster:* representa uno de los polímeros más tradicionales para la preparación de láminas para el revestimiento rígido de los invernaderos. Las láminas se preparan, englobando en la resina de base, bien con materiales de refuerzo (fibras de cristal, poliamidas, etc.) bien materiales acrílicos. Sobre algunos artículos manufacturados se aplican además, soldándolos en superficie, filmes o barniz de diferente naturaleza polímera. Las características físico mecánicas y ópticas varían, por tanto, según el tipo de artículo manufacturado, en relación con la cantidad y la calidad de las resinas empleadas, la naturaleza de los materiales de refuerzo, las modalidades de polimerización y la presencia del revestimiento superficial (barnices o films). Con todas las características relevantes de estas láminas, por lo general planas u onduladas, tienen una elevada resistencia mecánica, una notable elasticidad y ligereza, una baja conductibilidad térmica (por lo tanto una buena retención del calor) y una considerable duración.

Las láminas en poliéster de tipo tradicional son muy sensibles a los denominados fenómenos de envejecimiento, sobre todo en relación con la facilidad con que se erosionan en superficie, y consecuentemente con la degradación de la fibra de refuerzo. De aquí se deriva una disminución extremadamente rápida de la transparencia a la radiación incidente. Para limitar semejantes inconvenientes actualmente se están preparando láminas de tipo especial, caracterizadas por una protección de la superficie aplicando barnices especiales.

*Cloruro de polivinilo (PVC):* Es uno de los polímeros que se utiliza desde hace mucho tiempo para la preparación de materiales de recubrimiento. Con el PVC se preparan tanto firmes (mediante la adición plastificante que permite la extrusión de un laminado flexible) como planchas onduladas rígidas.

Los filmes de PVC especialmente de larga duración manifiestan la tendencia a traer, fuerzas electroestáticas a través de la acción adhesiva de los plastificantes que salen en superficie, el polvo y el polvillo atmosférico. Para limitar este fenómeno que reduce la transparencia del fin a la radiación visible, se han preparado filmes antiestáticos añadiendo sustancias específicas. Estos filmes quedan despolarizados una vez en funcionamiento recogen polvo en menor medida, por lo demás al no quedar adherido a la superficie la lluvia se lo lleva consigo.

En cuanto a las características ópticas la transparencia de las planchas de PVC en las bandas de IR es más bien baja y en consecuencia buena para su rendimiento técnico.

*Polycarbonato (PC)*: Es un polímero termoplástico estabilizado a la acción de la radiación UV, que presentan unas óptimas características físicas mecánicas (ligero, resistente a los golpes, con pequeñas variaciones mecánicas en un amplio intervalo de temperatura).

En lo que respecta a las características ópticas la transparencia total a la radiación solar incidente, es en las bandas visible, bastante buena en las láminas nuevas, sin embargo esta sufre durante la exposición y como consecuencia de fenómenos de envejecimiento disminuciones sensibles incluso después de pocos años. Un aspecto particular que hay que tener en cuenta en el funcionamiento de las láminas, es el posible desarrollo de algas en el interior, en el caso no tener un perfecto aislamiento del aire.

*Etilenvinilacetato (EVA)*: Se obtiene mediante la polimerización del etileno con el comonomero acetato de vinilo. Al aumentar la tasa de acetato de vinilo efectivamente crece la impermeabilidad a la radiación IR lejana, la transparencia en el visible, la resistencia a la rotura y a la perforación. El film se vuelve mucho más elásticos sensibles a los fenómenos de dilatación por acción de la temperatura. Presentan un rendimiento térmico ligeramente inferior a los filmes de PVC. El nivel de termicidad se tiene que poner en evidencia que este varía no solo en relación con el contenido acetato de vinilo, sino también de acuerdo con el espesor del artículo manufacturado.

**Tabla 1.5.1. Características físicas de algunos tipos de materiales usados para el recubrimiento de los invernaderos**

| CARACTERÍSTICAS                                | Flexibles             |              | Rígidos               |                                  |                                  | Cristal (2.7 mm) |
|--|-----------------------|--------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------|
|  | Poliétileno (0.08 mm) | PVC (0.1 mm) | PVC ONDULADO (1-2 mm) | Polimetacrilato de metilo (4 mm) | Poliéster estratificado (1-2 mm) |                  |
| Densidad                                       | 0.92                  | 1.3          | 1.4                   | 1.18                             | 1.5                              | 2.4              |
| Índice de refracción                           | 1.512                 | 1.528        | -                     | 1.489                            | 1.549                            | 1.516            |
| Porcentaje de dilatación antes de que se rompa | 400-500               | 200-250      | 50-100                | escasa                           | escasa                           | nula             |
| Resistencia al frío y al calor                 | -40° + 70° C          | -10° + 50° C | -20° + 70° C          | -70° + 80° C                     | -70° + 100° C                    | muy elevada      |
| Duración                                       | 2 años                | 2-3 años     | elevada               | elevada                          | elevada                          | elevada          |
| Transparencia %(0.38-0.76 micrones)            | 70-75                 | 80-87        | 77                    | 85-93                            | 70-80                            | 87-90            |
| Transmisión %(0.24-2.1 micrones)               | 80                    | 82           | 82                    | 73                               | 60-70                            | 85               |
| Transmisión %(7-35 micrones)                   | 80                    | 30           | 0                     | 0                                | 0                                | 0                |

### *Canalización de agua*

La canalización del agua se compone básicamente de tuberías conectadas en sus extremos formando pendientes de 1° con respecto a la horizontal, siguiendo un patrón de zigzag entre ellas para que exista una caída por gravedad y en la tubería más baja se encuentra un tanque con la finalidad de recircular el agua excedente bombeándola al inicio con la finalidad de aprovechar el agua de riego.

### *Automatización del invernadero.*

Mediante métodos eléctricos, electrónicos y de programación controlaremos las variables: temperatura, luz y se monitoreará la humedad relativa para así poder alcanzar la sustentabilidad del ecosistema. A continuación daremos una breve descripción de cómo controlar estas variables dentro de un invernadero.

### *Temperatura*

La temperatura ambiente y sus fluctuaciones determinan el tipo de cultivo a producir en una región.

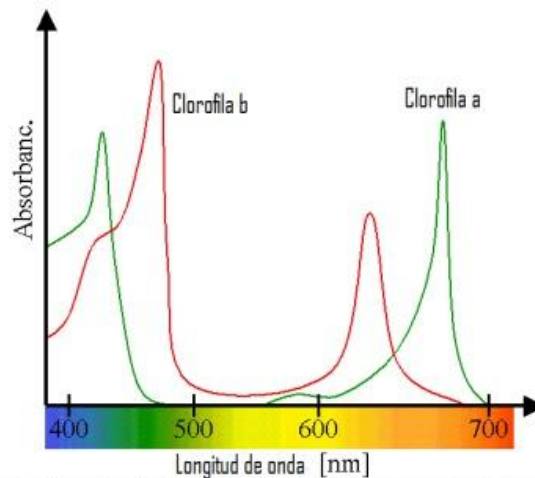
Los procesos biológicos tienen tolerancias a temperaturas extremas y un margen relativamente estrecho en la cual se desarrollan de manera óptima.

Los agricultores conocen los cambios de temperatura estacional así como la temperatura del día y la noche, con el fin de maximizar la producción u o aprovechamiento de las siembras.

Los controladores clásicos de temperatura en un invernadero son por calefacción (utilizando serpentines de agua caliente), agregando ventilación forzada o natural. La cual se beneficia con la orientación del invernadero respecto a los vientos dominantes de la región y al bloqueo de radiación solar mediante mallas.

### *Luz*

El espectro de luz visible es el más importante para el desarrollo de las plantas, ya que ayuda a los procesos de fotosíntesis y al desarrollo de nuestro ecosistema. Pero no todas las longitudes de onda del espectro son útiles al desarrollo de la fotosíntesis. En general, los fotoreceptores en la clorofila absorben más luz azul-violeta y rojo-naranja, por lo tanto la calidad de luz tiene un efecto importante en la eficiencia del proceso



Espectro de absorción de las clorofilas a y b. En general, la luz verde y amarilla es poco usada por las plantas, si bien los pigmentos accesorios ayudan a aumentar la eficiencia en la captación de fotones por parte del cloroplasto. Gráfica cortesía de Kurzon a través de Wikipedia Commons.

### Figura 1.5.2 Absorción de clorofila vs longitud de onda de luz

En las plantas los principales pigmentos son las clorofilas (a y b), así como los carotenoides, los cuales se encuentran muy organizados en el interior de los cloroplastos. La clorofila a es la principal molécula fotosintética según puede verse en la coincidencia de su espectro de absorción con la mayor actividad fotosintética por longitud de onda, a lo cual se le denomina espectro de acción. La clorofila b y los carotenoides son denominados pigmentos accesorios, ya que sirven como complemento fotosintético a la clorofila a, como puede deducirse del hecho que la curva de absorción de esta molécula no calza perfectamente con la curva del espectro de acción de la fotosíntesis, por lo que parte de ella se debe al trabajo de otros pigmentos.

Para mejorar el control de luminosidad natural se toman las siguientes consideraciones:

- Materiales que reduzcan el mínimo de sombras
- Aumento del ángulo de incidencia de las radiaciones sobre cubiertas
- Materiales con buena transparencia para la ventilación
- Mallas de sombreo (en los casos de verano para reducir luz extra).

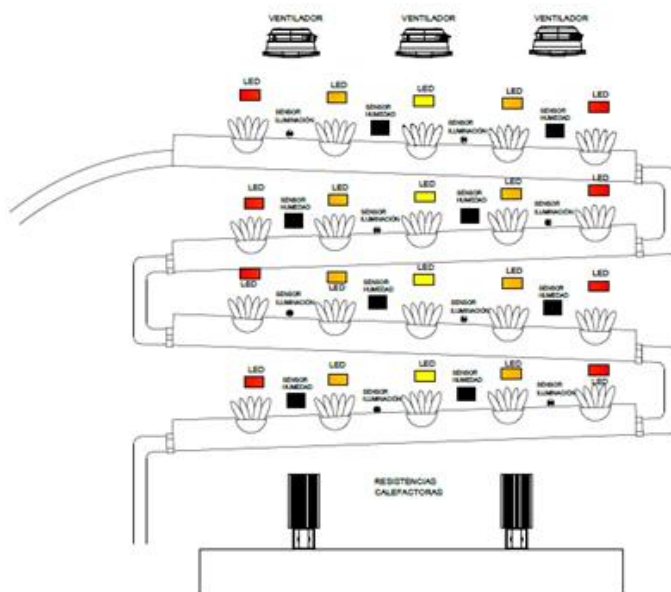
### *Humedad Relativa*

El nivel de humedad en el ambiente es primordial porque impacta en el desarrollo del ecosistema a diferencia de la temperatura, relativamente complicado es mantener el nivel de humedad óptimo dentro de un invernadero. Pero existen algunos principios que pueden utilizarse para su manipulación como ejemplo:

En climas calurosos secos, la humedad relativa generalmente es baja a fuera que dentro del invernadero, mientras que las temperaturas son altas a fuera del invernadero que dentro.

La humedad absoluta dentro del invernadero va siempre ligada a la temperatura del suelo y se incrementa cuando el suelo se calienta y como resultado aumenta la evaporación.

La humedad es afectada por el proceso de transpiración de las plantas, a cambio, la transpiración es influenciada en su mayoría por la radiación solar y por el déficit de vapor. Esta pérdida es mayor cuando la temperatura aumenta ya que el aire caliente y seco evapora el agua de las superficies de las plantas.



**Figura 1.5.3** Idea básica de la solución a implementar

- *Acotamiento del problema*

### *Control ambiental*

El sistema tiene por objetivo mantener la temperatura ambiente e iluminación dentro de los rangos óptimos de cultivo para la creación de un ecosistema, teniendo como límite la temperatura máxima de 30 °C., esta es regulada por nuestras variables de temperatura aportada por los calefactores, y humedad relativa.

Nuestro sistema de automatización ambiental tiene la finalidad de que la temperatura no se eleve a más de 30°C, o que esté por debajo de los 10°C, esto se debe a que el rango de temperatura recomendado para desarrollar un buen cultivo esta entre los 10°C y los 30°C.

Para cuando sea el caso de disminución de la temperatura, utilizaremos un calefactor la cual será regulada por un circuito dimmer.

Por el contrario si aumenta la temperatura a más de 30°C nuestro sistema de control, controlado igualmente por un circuito dimmer, arrancará un sistema de extractor-ventilador de aire que enfriará el ambiente para mantener la temperatura óptima.



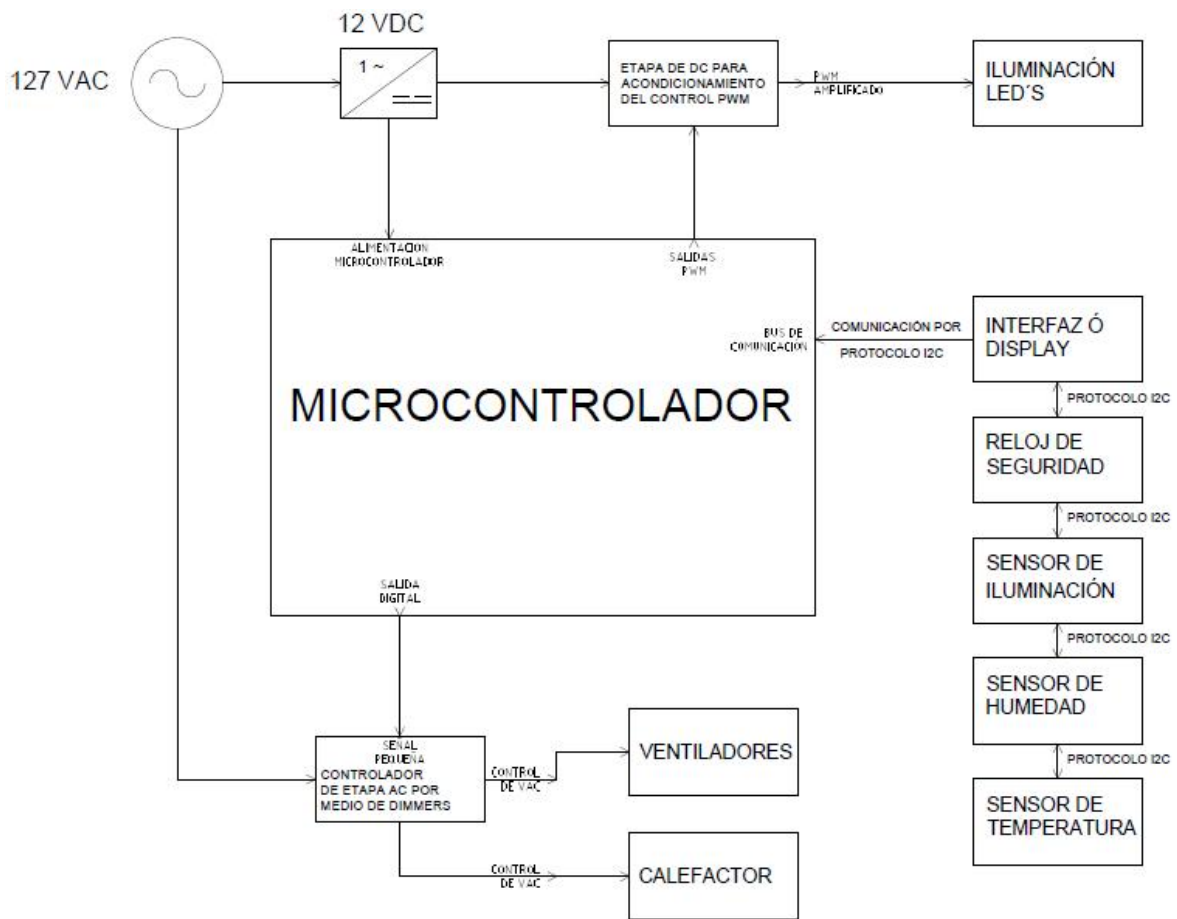


Figura 1.5.4 Esquema básico del control a diseñar

## Capítulo II Marco teórico

## 2.1 Características de los métodos de control difuso

La teoría difusa fue iniciada por Lofti A. Zadeh en el año de 1965 en su trascendental trabajo **“Fuzzy Sets” (Parámetros difusos)**. Antes de trabajar en la teoría difusa, Zadeh era ya un académico muy respetado en teoría de control. Desarrolló el concepto de “estado” el cual constituye la base de la teoría del control moderno. Para la década de 1960, pensó que la teoría clásica del control había puesto demasiado énfasis en la precisión y, por lo tanto, no era capaz de manejar sistemas complejos. En el año de 1962, en su trabajo **“From circuit theory to system theory” (Del circuito teórico al sistema teórico)** menciona la necesidad de un tipo de radicalmente diferente de matemáticas, las matemáticas de lo difuso o impreciso, cantidades que no son descriptibles en términos de distribuciones de probabilidad, para poder hacer frente al análisis de sistemas biológicos que por lo general son de órdenes de magnitud más complejos que los sistemas hechos por el hombre. Posteriormente formaliza estas ideas en su trabajo “Fuzzy Sets”. De esta forma propone una manera matemática de mirar la vaguedad intrínseca del lenguaje humano; llamó a su enfoque lógica difusa. El objetivo de la lógica difusa ha sido hacer que las computadoras "piensen" como los humanos y eliminen la barrera entre nosotros y la utilización total de las capacidades de una computadora.

Las computadoras y los humanos tienen fortalezas y debilidades que se complementan. Por ejemplo, no es una tarea difícil para nosotros identificar la cara de una persona en una fotografía o entender una afirmación como "larga distancia". Estas son tareas desafiantes para una computadora; sin embargo, una computadora no tiene dificultad para encontrar el promedio de cien números de 6 dígitos en milisegundos.

Las computadoras no "entienden" la vaguedad de los conceptos humanos; los datos deben presentarse a una computadora en lógica binaria simple. La mayoría de los datos humanos, sin embargo, no son binarios. Por ejemplo, no dividimos a las personas en dos grupos bien definidos, como "bueno" y "malo". En nuestro pensamiento, una persona puede ser buena a pesar de ser imperfecta. Dentro del grupo "bueno" se puede

encontrar, cualquiera que sea el criterio que se use, un rango donde las personas son realmente buenas y los que están al borde de ser malos, y un rango completo en el medio de buenos y malos. Extendiendo esta observación a otras cosas como temperatura, presión, tamaño, etc., uno puede concluir que todas las cosas admiten grados en su descripción; estos grados no son aleatorios sino más bien deterministas, basados en varios factores como la naturaleza de la situación, la experiencia, entre otros. Esta idea es la esencia de los llamados conjuntos difusos en contraste a los conjuntos clásicos o definidos. En la teoría de conjuntos clásica, un objeto pertenece a un conjunto o no; una persona es buena o mala; la temperatura es caliente o fría; un vaso está lleno o vacío. La teoría de conjuntos clásicos era el fondo matemático para la lógica de la computadora. En la teoría difusa, se introducen los grados de pertenencia a un conjunto; una persona puede ser, por ejemplo, el 80% en el conjunto "bueno" y el 40% en el conjunto "malo", según nuestra experiencia y criterio. La teoría de conjuntos difusos es el fondo matemático que se necesita para capturar la forma en que las personas piensan.

En la literatura, hay dos tipos de justificación para la teoría de sistemas difusos:

El mundo real es demasiado complicado para obtener descripciones precisas, por lo tanto, debe introducirse una aproximación para obtener un modelo razonable, pero rastreable.

A medida que nos adentramos en la era de la información, el conocimiento humano se vuelve cada vez más importante. Necesitamos una teoría para formular conocimiento humano de manera sistemática y ponerlo en sistemas de ingeniería, junto con otra información como modelos matemáticos y mediciones sensoriales.

La primera justificación es correcta, pero no caracteriza la naturaleza única de la teoría de sistemas difusos. De hecho, casi todas las teorías de la ingeniería caracterizan el mundo real de una manera aproximada. Por ejemplo, la mayoría de los sistemas reales no son lineales, pero ponemos un gran esfuerzo en el estudio de los sistemas lineales. Una buena teoría de la ingeniería debe ser precisa en la medida en que caracteriza las

características clave del mundo real y, al mismo tiempo, es rastreable para el análisis matemático. En este aspecto, la teoría de sistemas difusos no difiere de otras teorías de ingeniería.

La segunda justificación caracteriza a la teoría de sistemas difusos y justifica la existencia de la misma como una rama independiente de la ingeniería. Como principio general, una buena teoría de ingeniería debería ser capaz de hacer uso de toda la información disponible de manera efectiva. Para muchos sistemas prácticos, la información importante proviene de dos fuentes: una fuente son los humanos expertos en el uso de cierto sistema que describen sus conocimientos del mismo en el lenguaje natural; el otro es por medio de mediciones sensoriales y modelos matemáticos que se derivan de acuerdo con las leyes físicas. Una tarea importante, por lo tanto, es combinar estos dos tipos de información en los diseños del sistema. Para lograr esta combinación, una pregunta clave es cómo formular el conocimiento humano en un marco similar utilizado para formular mediciones sensoriales y modelos matemáticos. En otras palabras, la pregunta clave es cómo transformar una base de conocimiento humano en una fórmula matemática. Esencialmente, lo que hace un sistema difuso es realizar esta transformación. Para entender cómo se realiza esta transformación, primero debemos saber qué son los sistemas difusos.

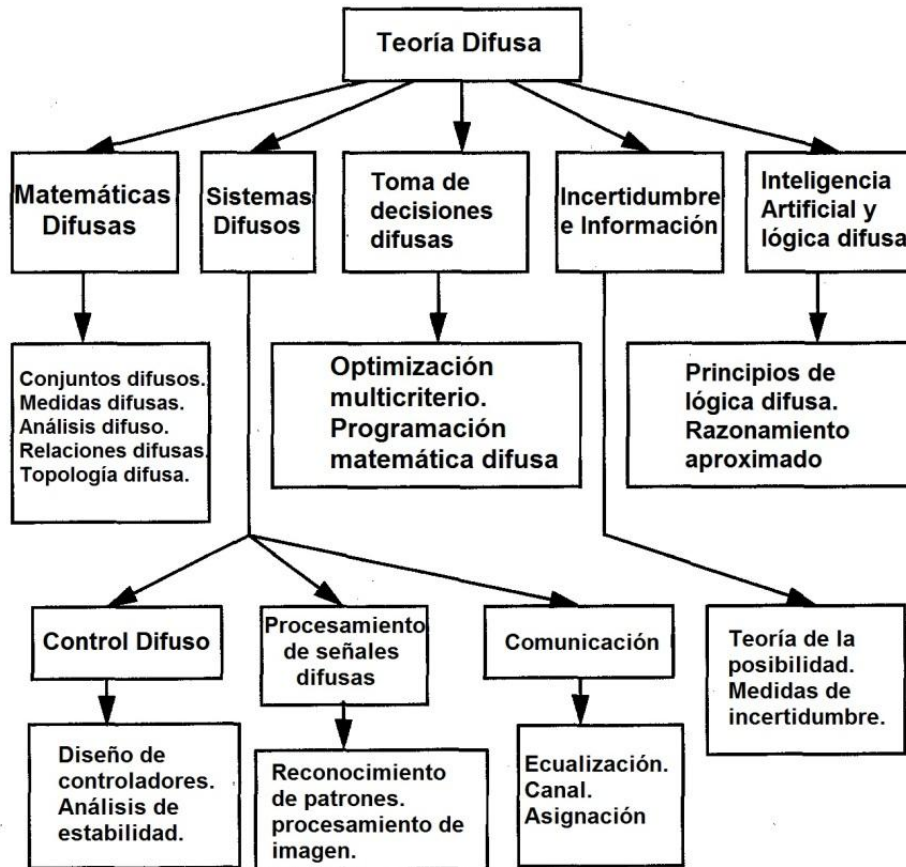
Un operador puede controlar un proceso adecuadamente sin la necesidad de ningún modelo matemático que describa el sistema. Por ejemplo, una persona controla el proceso de conducción de un automóvil sin el conocimiento de un modelo matemático de conducción, inclusive podría parecer ridículo plantear la idea de si tal modelo existe o no. Simplemente esa persona desea llegar a su destino de forma segura y sabe cómo hacerlo. El "Cómo hacerlo" se basa en la capacidad de interpretar declaraciones lingüísticas sobre el sistema y razonar cualitativamente. Por ejemplo, si esta persona ve que está demasiado cerca del automóvil que tiene delante, entonces desacelera un poco, "demasiado cerca" y "Un poco" se pueden definir en términos de conjuntos difusos. Por supuesto, la acción final de dicha persona, o sea, la presión que aplica en los frenos, es muy específica y no difusa. El valor depende del criterio de conducción de

la persona. La situación comienza a hacerse compleja si hay más condiciones que considerar antes de actuar. Por ejemplo, si se está acercando al automóvil de enfrente, desacelera un poco, pero si está lloviendo, se desacelera mucho más. El resultado final, una vez más, es la presión sobre los frenos y que viene como resultado de seleccionar el valor único del conjunto difuso que resulta de considerar las dos condiciones. En este caso se llevaron a cabo dos pasos, uno para inferir las acciones posibles y el otro para seleccionar una acción en particular. Aunque en ocasiones, durante la conducción de un automóvil se responde con una acción clara y definida a una situación de igualmente clara y definida.

El control difuso fue la primera aplicación de la teoría de conjuntos difusos que llamó la atención por el potencial práctico que ésta tenía. Se ha sabido que los controladores difusos funcionan mejor que los controladores PID o DDC convencionales.

Teoría difusa, nos referimos a todas las teorías que usan el concepto básico de conjunto difuso o función de pertenencia. La teoría difusa se puede clasificar de manera aproximada de acuerdo con la Figura 2.1.1. Existen cinco ramas principales:

(i) matemáticas difusas, donde los conceptos matemáticos clásicos se extienden al reemplazar conjuntos clásicos por conjuntos difusos; (ii) lógica difusa e inteligencia artificial, donde se introducen aproximaciones a la lógica clásica y se desarrollan sistemas expertos basados en información difusa y razonamiento aproximado; (iii) sistemas difusos, que incluyen control difuso y enfoques difusos en el procesamiento de señales y las comunicaciones; (iv) incertidumbre e información, donde se analizan diferentes tipos de incertidumbres; y (v) toma de decisiones difusas, que considera problemas de optimización con restricciones leves.



**Figura 2.1.1. Clasificación de la teoría difusa**

El control de lógica difusa (FCL) describe el algoritmo para el proceso de control como una relación difusa entre la información sobre la condición del proceso a controlar y la acción de control.

Por lo tanto, se distingue de los algoritmos de control convencionales, ya que la información (lingüística o de un modelo difuso) acerca del sistema en vez de un modelo matemático es lo que el diseñador requiera.

Un posible sistema de control difuso se muestra en la Figura 2.1.2. Existe un aspecto de similitud entre el sistema mostrado y cualquier otro sistema de control, ya que se produce una acción de control basada en la medición de la salida. En los sistemas convencionales, la acción de control se alcanza como ya se mencionó anteriormente a

través de un algoritmo basado en la multiplicación por constante, tomando una derivada, integración o la combinación de los tres.

La esencia de los algoritmos de control difuso es una declaración condicional entre una variable de entrada difusa A y una variable de salida difusa B. Esto se expresa mediante una declaración de implicación lingüística como:

$A \rightarrow B$  (La condición A implica la condición B)

Que puede escribirse como:

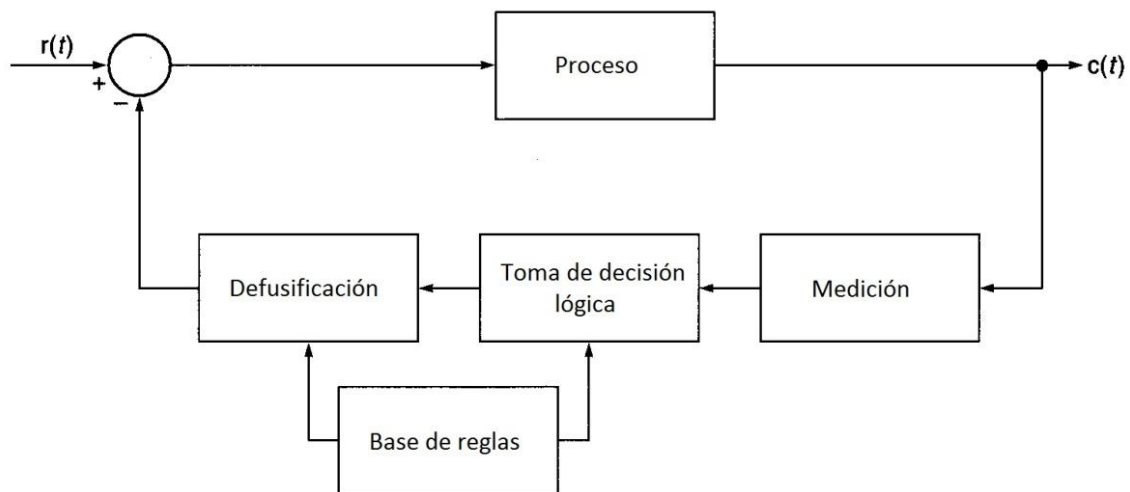
**SI A ENTONCES B**

Hay una equivalencia entre esta expresión y la relación obtenida por la multiplicación cartesiana en algebra difusa, es decir:

$R = A \times B \equiv \text{SI } A \text{ ENTONCES } B$

Donde R es un conjunto difuso.

Una variable difusa se expresa a través de un conjunto difuso, que a su vez está definido por una función de pertenencia  $\mu$ . La variable difusa puede ser continua o discreta. Una variable continua puede cuantificarse y expresarse como si fuera discreta.



**Figura 2.1.2. Un posible sistema de control de lógica difusa**

## **2.2. Características, ventajas y desventajas de sensores para detección de temperatura.**

Para que un sistema electrónico pueda controlar un proceso es necesario que reciba información de la evolución de determinadas variables físicas del mismo, que en su mayoría no son eléctricas (como son por ejemplo la temperatura). Por ello, el acoplamiento entre el sistema electrónico y el proceso productivo se debe realizar a través de dispositivos que convierten las variables no eléctricas en eléctricas. Dichos reciben diversos nombres, como captador, detector, transductor, trasmisor sonda o sensor, aunque es este último el más utilizado por los fabricantes de sistemas electrónicos de control en general y por los fabricantes de autómatas programables en particular.

No existe una única definición de sensor aceptada de manera universal. Se considera que en general, un sensor es todo dispositivo que, situado en un cierto medio, genera una señal (función de alguna característica de dicho medio) de una determinada forma física (nivel de temperatura), convertible en otra señal de forma física diferente. El elemento que realiza dicha conversión se suele denominar transductor. Cada vez es más usual denominar sensor o elemento sensor al conjunto formado por el dispositivo sensor, anteriormente descrito y el transductor acoplado a él. Por otro lado, la existencia de sistemas que memorizan, amplifican y generalmente procesan señales eléctricas, hace que la mayoría de los transductores conviertan variables no eléctricas en eléctricas. Por todo lo expuesto, cada vez se utiliza más la palabra sensor para definir al dispositivo o elemento que convierte una variable física a una señal eléctrica, que en alguno de sus parámetros (nivel de tensión, nivel de corriente, frecuencia, etc.), contiene información correspondiente a la primera. Por otra parte, el tipo de señal eléctrica portadora de información y sus parámetros varía de un dispositivo sensor a otro y por ello es necesario acoplar la salida de éste a un circuito que, de acuerdo con las características de aquélla, realice al menos una de las siguientes operaciones:

- Amplificación de la señal

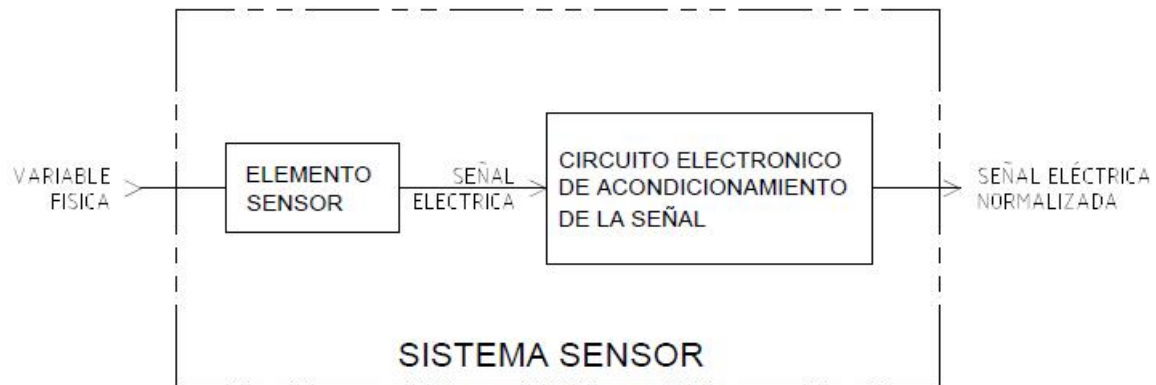


- Filtrado
- Corrección
- Conversión en otra diferente.

Dicho circuito recibe el nombre de circuito acondicionador o de acondicionamiento y su utilización conjunta con el elemento sensor da como resultado el denominado “Sistema Sensor”, aunque normalmente se le denomina simplemente sensor. Dicho sistema genera una señal normalizada, ya sea por el fabricante o siguiendo pautas establecidas por organismos de normalización como por ejemplo la IEC (acrónimo de **International Electrotechnical Commission (Comision nacional de eletectrotecnia)**) y el IEEE (acrónimo de **Institute of Electrical and Electronic Engineers (Instituto de ingenieros eléctricos y electronicos)**), etc.

De todo lo expuesto se concluye que el análisis de los sensores es una tarea compleja y la selección del más adecuado para una aplicación determinada obliga a tener en cuenta múltiples factores (tipo de magnitud a medir, sus características, principio de funcionamiento del sensor, etc.)

A los sistemas sensores adecuadamente contruidos para trabajar en las condiciones existentes en un entorno natural (temperatura cálida, humedad relativa, etc.) se le denomina sensores de control ambiental. Los sensores de control ambiental son, en la gran mayoría de los casos, sistemas sensores como el representado en la Figura 2.2.1 o sensores inteligentes adecuadamente encapsulados. Los sensores inteligentes forman parte de los dispositivos electrónicos inteligentes conocidos como IED (acrónimo de **Intelligent Electronic Devices (Dispositivos electrónicos inteligentes)**)



**Figura 2.2.1 Componentes básicos de un sensor**

La existencia de numerosas variables o magnitudes físicas susceptibles de ser convertidas en señales eléctricas da lugar a que también sea muy variadas las tecnologías o principios de conversión (inductivo, piezoeléctrico, extensiométrico, capacitivo, etc.) que se emplean actualmente.

La naturaleza del principio de funcionamiento del elemento sensor empleado determina la clasificación de los sensores en:

#### *Sensores activos*

Se consideran activos o generadores a los sensores en los que la magnitud física a medir proporciona la energía necesaria para la generación de la señal eléctrica de salida. Son un ejemplo de sensores activos los basados en los efectos piezoeléctrico y termoeléctrico.

#### *Sensores pasivos.*

Son pasivos o moduladores los sensores en los que la magnitud física a medir se limita a modificar alguno de sus parámetros eléctricos característicos como por ejemplo la resistencia. Los sensores de este tipo se caracterizan por necesitar una tensión de alimentación externa. Son ejemplo de sensores pasivos los basados en las resistencias cuyo valor depende de la temperatura (termorresistivos) o de la luz (fotorresistivos).

Es conveniente resaltar que la mayoría de las variables físicas se pueden convertir mediante varios sensores que utilizan principios de funcionamiento distintos.

Los sensores de temperatura son dispositivos que transforman los cambios de temperatura en cambios en señales eléctricas que son procesados por equipo eléctrico o electrónico.

Hay tres tipos de sensores de temperatura, los termistores, los RTD y los termopares.

El sensor de temperatura, típicamente suele estar formado por el elemento sensor, de cualquiera de los tipos anteriores, la vaina que lo envuelve y que está rellena de un material muy conductor de la temperatura, para que los cambios se transmitan rápidamente al elemento sensor y del cable al que se conectarán el equipo electrónico.

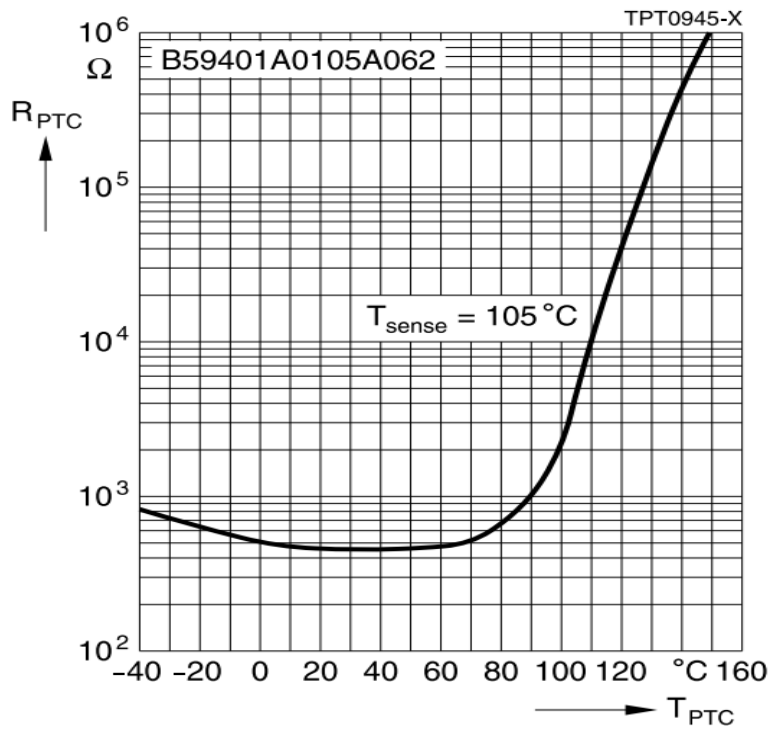
Termistor, el término termistor proviene de **Thermally Sensitive Resistor (Resistencia térmicamente sensible)**. El termistor está basado en que el comportamiento de la resistencia de los semiconductores es variable en función de la temperatura.

Existen los termistores tipo NTC. (**Negative Temperature Coefficient (Coeficiente de temperatura negativa)**) y los termistores tipo PTC. (**Positive Temperature Coefficient (Coeficiente de temperatura positiva)**) En los primeros, al aumentar la temperatura, disminuye la resistencia. En los PTC, al aumentar la temperatura, aumenta la resistencia.

El material base con que están fabricados los termistores es un semiconductor (igual que los transistores) que deja pasar parcialmente la corriente.

Las ventajas de los termistores frente a otros sensores de temperatura es el bajo precio de estos, su amplio rango de medida y lo extendidos que se encuentran, lo que permite encontrar dispositivos a los que se pueden conectar sin mayores problemas.

La desventaja principal es que no son lineales, lo que dificulta la adquisición de datos y son complicados de calibrar.



**Figura 2.2.2. Curvas resistencia/temperatura PTC**

De igual forma que otros sensores resistivos, los termistores acusan el efecto del autocalentamiento por el paso de corriente, por lo que hay que ser cuidadosos en la tensión y corriente que hacemos circular por el sensor para evitar falsos aumentos de temperatura.

**Tabla 2.2.1. Resistencia/temperatura NTC**

**RESISTANCE V TEMPERATURE TABLE**

| Temp °C | K-Ohms | Temp °C | K-Ohms | Temp °C | K-Ohms | Temp °C | K-Ohms | Temp °C | K-Ohms |
|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| 0       | 1088.0 | 30      | 236.4  | 60      | 63.70  | 90      | 20.45  | 120     | 7.594  |
| 1       | 1030.0 | 31      | 225.6  | 61      | 61.17  | 91      | 19.75  | 121     | 7.364  |
| 2       | 975.3  | 32      | 215.3  | 62      | 58.75  | 92      | 19.07  | 122     | 7.142  |
| 3       | 923.8  | 33      | 205.5  | 63      | 56.44  | 93      | 18.41  | 123     | 6.927  |
| 4       | 875.2  | 34      | 196.2  | 64      | 54.23  | 94      | 17.78  | 124     | 6.720  |
| 5       | 829.5  | 35      | 187.4  | 65      | 52.12  | 95      | 17.18  | 125     | 6.519  |
| 6       | 786.3  | 36      | 179.0  | 66      | 50.10  | 96      | 16.60  | 126     | 6.326  |
| 7       | 745.6  | 37      | 171.0  | 67      | 48.17  | 97      | 16.04  | 127     | 6.139  |
| 8       | 707.2  | 38      | 163.5  | 68      | 46.32  | 98      | 15.50  | 128     | 5.958  |
| 9       | 671.0  | 39      | 156.3  | 69      | 44.54  | 99      | 14.98  | 129     | 5.784  |
| 10      | 636.8  | 40      | 149.4  | 70      | 42.85  | 100     | 14.48  | 130     | 5.615  |
| 11      | 604.5  | 41      | 142.9  | 71      | 41.23  | 101     | 14.00  | 131     | 5.452  |
| 12      | 574.0  | 42      | 136.7  | 72      | 39.67  | 102     | 13.54  | 132     | 5.294  |
| 13      | 545.2  | 43      | 130.8  | 73      | 38.18  | 103     | 13.09  | 133     | 5.141  |
| 14      | 518.0  | 44      | 125.1  | 74      | 36.75  | 104     | 12.66  | 134     | 4.994  |
| 15      | 492.3  | 45      | 119.8  | 75      | 35.39  | 105     | 12.25  | 135     | 4.851  |
| 16      | 468.0  | 46      | 114.7  | 76      | 34.08  | 106     | 11.86  | 136     | 4.713  |
| 17      | 444.9  | 47      | 109.8  | 77      | 32.82  | 107     | 11.47  | 137     | 4.580  |
| 18      | 423.2  | 48      | 105.2  | 78      | 31.62  | 108     | 11.11  | 138     | 4.450  |
| 19      | 402.6  | 49      | 100.8  | 79      | 30.46  | 109     | 10.75  | 139     | 4.325  |
| 20      | 383.1  | 50      | 96.54  | 80      | 29.35  | 110     | 10.41  | 140     | 4.204  |
| 21      | 364.6  | 51      | 92.52  | 81      | 28.29  | 111     | 10.08  | 141     | 4.087  |
| 22      | 347.1  | 52      | 88.69  | 82      | 27.27  | 112     | 9.763  | 142     | 3.974  |
| 23      | 330.6  | 53      | 85.04  | 83      | 26.29  | 113     | 9.456  | 143     | 3.864  |
| 24      | 314.9  | 54      | 81.55  | 84      | 25.35  | 114     | 9.161  | 144     | 3.757  |
| 25      | 300.0  | 55      | 78.22  | 85      | 24.45  | 115     | 8.876  | 145     | 3.654  |
| 26      | 285.9  | 56      | 75.04  | 86      | 23.59  | 116     | 8.601  | 146     | 3.555  |
| 27      | 272.5  | 57      | 72.01  | 87      | 22.76  | 117     | 8.336  | 147     | 3.458  |
| 28      | 259.8  | 58      | 69.11  | 88      | 21.96  | 118     | 8.080  | 148     | 3.364  |
| 29      | 247.8  | 59      | 66.34  | 89      | 21.19  | 119     | 7.832  | 149     | 3.274  |
|         |        |         |        |         |        |         |        | 150     | 3.186  |

**RTD (*Resistance Temperature Detector* (Resistencia detectora de temperatura))**

Un RTD es un sensor de temperatura basado en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura.

Los metales empleados normalmente como RTD son platino, cobre, níquel y molibdeno.

De entre los anteriores, los sensores de platino son los más comunes por tener mejor linealidad, más rapidez y mayor margen de temperatura.

Ventajas.

Entre sus ventajas, destacan por tener mejor linealidad, más rapidez y mayor margen de temperatura [-200°C, 800°C]

La nomenclatura del sensor se compone de material, resistencia en Ohmios a 0°C y clase del sensor de temperatura que expresa la precisión de la misma.

Clases.

Las 6 clases establecidas por la norma IEC 751:1995 son las siguientes:

Clase 2B  $\pm 0,60^{\circ}\text{C} \pm 0,24 \Omega$

Clase B  $\pm 0,30^{\circ}\text{C} \pm 0,12 \Omega$

Clase A  $\pm 0,15^{\circ}\text{C} \pm 0,06 \Omega$

Clase 1/3B  $\pm 0,10^{\circ}\text{C} \pm 0,04 \Omega$

Clase 1/5B  $\pm 0,06^{\circ}\text{C} \pm 0,02 \Omega$

Clase 1/10B  $\pm 0,03^{\circ}\text{C} \pm 0,01 \Omega$

Así pues, una PT100 clase B es una RTD de platino con una resistencia de 100 Ohm a 0°C con un margen de error de  $\pm 0,30^{\circ}\text{C}$  o  $\pm 0,12 \Omega$ .

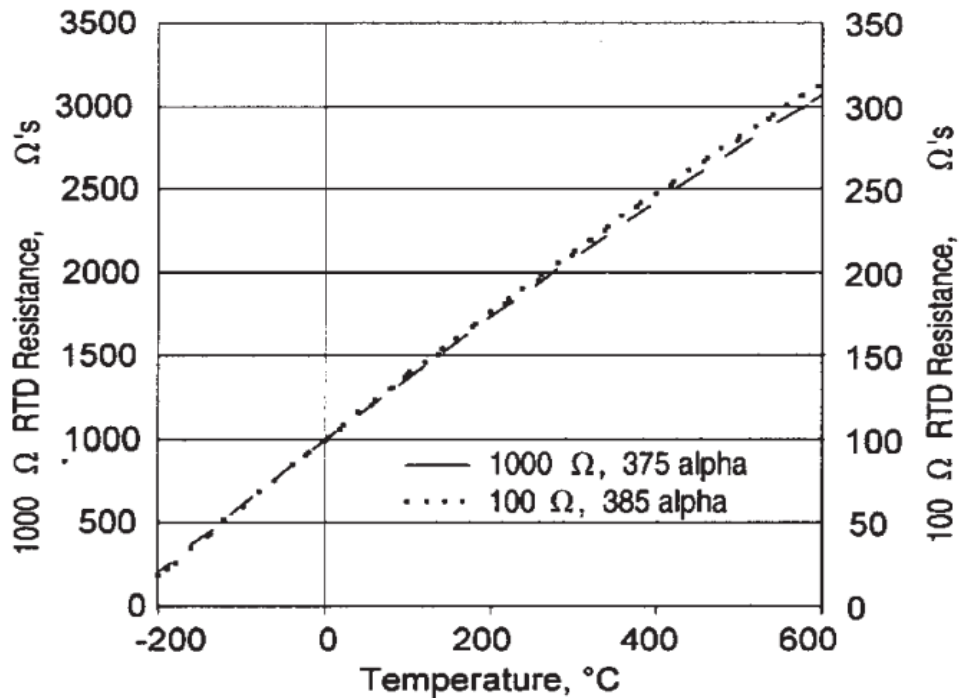
Los valores de resistencia a 0°C más habituales son los de 100 y 1000 [Ohm]

Sensibilidad.

La PT100 varía 38,5 Ohm cada 100°C y la PT1000 varía 385 [Ohm] cada 100°C.

La sensibilidad de la RTD de platino es muy constante a lo largo de todo el rango de temperaturas que son capaces de medir, presentando, por ello una gran linealidad.

El siguiente gráfico muestra una curva real de la relación resistencia - temperatura de las sondas HEL700 de Honeywell. Figura 2.2.4.



**Figura 2.2.3. Curva del comportamiento del sensor**

Desventajas.

La longitud del cable influye significativamente en la medida, por lo que es necesario tenerlo en cuenta.

Como la variación de la resistencia de las sondas PT100 y PT1000 es pequeña frente a los cambios de temperatura, la resistencia del cable que une la sonda con el equipo de medida puede afectar a la resistencia total y por tanto falsear los resultados. Cuanta más longitud tenga el cable, más afectará.

Cuando se quieren descontar los efectos del cable, se usan sondas de 3 o 4 hilos con compensación, es decir, se le añade un tercer cable que simplemente está unido a uno de los otros dos. Lo que se persigue es medir la resistencia del cable y poder descontarla, así, de la resistencia ofrecida por la sonda de temperatura.

La sensibilidad es baja, obligando a montar circuitos electrónicos para medir la temperatura (típicamente un puente de Wheatstone amplificado).

Hay que prever el efecto de auto calentamiento por efecto de la corriente que circula por el sensor.

### *Termopar*

El termopar, también llamado termocupla y que recibe este nombre por estar formado por dos metales, es un instrumento de medida cuyo principio de funcionamiento es el efecto termoeléctrico.

Un material termoeléctrico permite transformar directamente el calor en electricidad, o bien generar frío cuando se le aplica una corriente eléctrica.

El termopar genera una tensión que está en función de la temperatura que se está aplicando al sensor. Midiendo con un voltímetro la tensión generada, conoceremos la temperatura.

Los termopares tienen un amplio rango de medida, son económicos y están muy extendidos en la industria. El principal inconveniente estriba en su precisión, que es pequeña en comparación con sensores de temperatura RTD o termistores.



### **2.3 Características, ventajas y desventajas de sensores para detección de iluminación.**

Los sensores son dispositivos formados por células sensibles que detectan variaciones en una magnitud física y las convierten en señales útiles para un sistema de medida o control. Son los elementos físicos que transmiten una señal al sistema cuando hay una variación de algún parámetro.

En la rama de iluminación contamos con tres familias las cuales tienen sus características y aplicaciones en el área del control de iluminación, a continuación, se mencionan sus principales cualidades.

#### **LDR (Light-Dependent Resistor, (resistor dependiente de la luz)).**

Un LDR es un resistor que varía su valor de resistencia eléctrica dependiendo de la cantidad de luz que incide sobre él. Se le llama, también, fotorresistor o fotorresistencia. El valor de resistencia eléctrica de un LDR es bajo cuando hay luz incidiendo en él (en algunos casos puede descender a 50 ohms) y muy alto en ausencia de luz incidente (puede ser de varios megaohms). Véase en Figura 2.3.1.

Los LDR se fabrican con un cristal semiconductor fotosensible como el sulfuro de cadmio (CdS). Estas celdas son sensibles a un rango amplio de frecuencias lumínicas, desde la luz infrarroja, pasando por la luz visible, y hasta la ultravioleta.

La variación de valor resistivo de un LDR tiene cierto retardo, que es diferente si se pasa de oscuro a iluminado o de iluminado a oscuro.

Por esta razón un LDR no se puede utilizar algunas aplicaciones, en especial en aquellas en que la señal luminosa varía con rapidez. El tiempo de respuesta típico de un LDR está en el orden de una décima de segundo.

La lentitud relativa del cambio es una ventaja en algunos casos, porque así se filtran variaciones rápidas de iluminación que podrían hacer inestable un sensor (por ejemplo, cuando está iluminado por un tubo fluorescente alimentado por corriente alterna), En

otras aplicaciones (como la detección de luminosidad para saber si es de día o es de noche) la lentitud de la detección no es importante.



**Figura 2.3.1. Fotorresistencia.**

Fotodiodos; el fotodiodo es un diodo semiconductor, construido con una unión PN, como muchos otros diodos que se utilizan en diversas aplicaciones, pero en este caso el semiconductor está expuesto a la luz a través de una cobertura cristalina y a veces en forma de lente, y por su diseño y construcción será especialmente sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Todos los semiconductores tienen esta sensibilidad a la luz, aunque en el caso de los fotodiodos, diseñados específicamente para esto, la construcción está orientada a lograr que esta sensibilidad sea máxima. Véase en Figura 2.3.2.



**Figura 2.3.2** Diversos tipos de fotodiodo.

Los diodos tienen un sentido normal de circulación de corriente, que se llama polarización directa. En ese sentido el diodo deja pasar la corriente eléctrica y prácticamente no lo permite en el sentido inverso; esto es la base del funcionamiento de un diodo. Pero en el fotodiodo la corriente que está circulando (y que varía con los cambios de la luz) es la que circula en sentido inverso al permitido por la juntura del diodo. Es decir, para su funcionamiento el fotodiodo es polarizado de manera inversa. Se producirá un aumento de la circulación de corriente cuando el diodo es excitado por la luz.

Lo que define las propiedades de sensibilidad al espectro de un fotodiodo es el material semiconductor que se emplea en la construcción. Los fotodiodos están contruidos de silicio, sensible a la luz visible (longitud de onda de hasta  $1,1 \text{ } [\mu\text{m}]$ ), de germanio para luz infrarroja (longitud de onda hasta aproximadamente  $1,8 \text{ } [\mu\text{m}]$ ), y los hay de otros materiales semiconductores. El rango de espectro es:

**Tabla 2.3.1. Sensibilidad al espectro de un fotodiodo**

|                               |                 |
|-------------------------------|-----------------|
| Silicio                       | 190 – 1100 [nm] |
| Germanio                      | 800 – 1700 [nm] |
| Indio Galio Arsénico (InGaAs) | 800 – 2600 [nm] |
| Sulfuro de plomo              | 1000- 3500 [nm] |

### Fototransistores

Los fototransistores no son muy diferentes de un transistor normal, es decir, están compuestos por el mismo material semiconductor, tienen dos junturas y las mismas tres conexiones externas: colector, base y emisor. Por supuesto, siendo un elemento sensible a la luz, la primera diferencia evidente es en su cápsula, que posee una ventana o es totalmente transparente, para dejar que la luz ingrese hasta las junturas de la pastilla semiconductor y produzca el efecto fotoeléctrico.

Teniendo las mismas características de un transistor normal, es posible regular su corriente de colector por medio de la corriente de base. Y también, dentro de sus características de elemento optoelectrónico, el fototransistor conduce más o menos corriente de colector cuando incide más o menos luz sobre sus junturas.



**Figura 2.3.3. Diversos tipos de fototransistores**

Los dos modos de regulación de la corriente de colector se pueden utilizar en forma simultánea. Si bien es común que la conexión de base de los fototransistores no se utilice, e incluso que no se la conecte o ni siquiera venga de fábrica, a veces se aplica a ella una corriente que estabiliza el funcionamiento del transistor dentro de cierta gama deseada, o lo hace un poco más sensible cuando se debe detectar una luz muy débil. Esta corriente de estabilización cumple con las mismas reglas de cualquier transistor, es decir, tendrá una relación de amplificación determinada por la ganancia típica de corriente. A esta corriente prefijada se le suman las variaciones producidas por los cambios en la luz que incide sobre el fototransistor.

Los fototransistores, al igual que los fotodiodos, tienen un tiempo de respuesta muy corto, es decir que pueden responder a variaciones muy rápidas en la luz. Debido a que existe un factor de amplificación de por medio, el fototransistor entrega variaciones mucho mayores de corriente eléctrica en respuesta a las variaciones en la intensidad de la luz.

## **2.4 Características de microcontroladores, tipos de entradas y salidas, tiempos de respuesta y beneficio costo.**

El microcontrolador fue inventado por Texas Instruments en la década de 1970, casi al mismo tiempo que el primer microprocesador que estaba siendo inventado en Intel. Los primeros microcontroladores eran simplemente microprocesadores con una función de memoria, como la memoria **RAM (Random access memory (Memoria de acceso aleatorio))** y **ROM (Read only memory (Memoria de solo lectura))**. Más tarde, los microcontroladores se desarrollaron en una amplia gama de dispositivos diseñados para aplicaciones de sistemas integrados específicos en dispositivos tales como automóviles, teléfonos móviles y electrodomésticos.

En 1971, el primer microcontrolador fue inventado por dos ingenieros de Texas Instruments, de acuerdo con el Instituto Smithsonian. Gary Boone y Michael Cochran crearon el TMS 1000, el cual era un microcontrolador de 4 bits con función de ROM y RAM. El microcontrolador era utilizado internamente en Texas Instruments en sus productos de cálculo desde 1972 hasta 1974, y fue refinado con el paso de los años. En 1974, TI puso a la venta el TMS 1000 para la industria de electrónicos. El TMS 1000 estuvo disponible en varios tamaños de RAM y ROM. A partir de 1983, cerca de un millón de TMS 1000 fueron vendidos.

Un microcontrolador es, de alguna manera, un cruce entre un microprocesador y un microordenador. Al igual que los microprocesadores, el término microcontrolador se refiere a un solo dispositivo; sin embargo, contiene todo el microordenador en ese único chip.

Por lo tanto, un microcontrolador tendrá un procesador, memoria incorporada y una variedad de dispositivos de entradas y salidas. Al usar un microcontrolador en lugar de una microcomputadora simplifica el diseño general, para lograr esto sacrifica la flexibilidad. Un microordenador se puede configurar para tener cantidades específicas de memoria o dispositivos adjuntos. Los microcontroladores generalmente están limitados a los tamaños de memoria y periféricos que dictan los fabricantes. Hay muchas opciones

en los microcontroladores y sus capacidades, sin embargo, esto puede ser una limitación en algunas circunstancias. Porque los microcontroladores están diseñados más para ser una recopilación de datos independiente y dispositivos de control, en lugar de para la interacción humana o las tareas de red que los microordenadores a menudo manejan, sus dispositivos de entrada y salidas estándar son diferentes. Los convertidores **ADC (Analogic Digital Convert (Convertidor Analogico Digital))**, temporizadores y las interrupciones externas son periféricos comunes encontrados en los microcontroladores, mientras que los teclados, monitores y otros dispositivos utilizados a diario para controlar una computadora personal no lo son.

Tipos de memoria.

La arquitectura de von Neumann fue nombrada después de que un científico se involucrara en el proyecto Manhattan y, debido a los requisitos computacionales de ese proyecto, se unió al desarrollo de la computadora del programa almacenado **EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer (Computadora Automatica Variable de Electronica Discreta))**. Durante esta vez escribió el primer borrador de un informe sobre el EDVAC, que se convirtió en la fuente de la arquitectura de von Neumann.

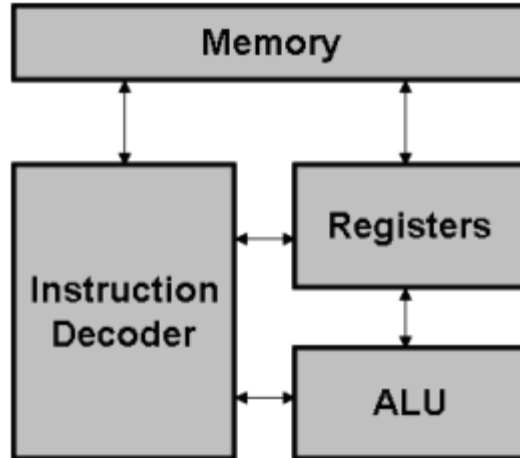
Las primeras computadoras y dispositivos computacionales tenían programas fijos. Estas los programas se integraron en la máquina de varias maneras y para cambiar el programa la máquina a menudo tuvo que ser reconstruida. Esto incluye la mayoría de las primeras computadoras como el **ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer (Integrador Numérico Electrónico y Computador))**. Estas reconstrucciones podrían tomar semanas y usar un alto porcentaje del tiempo de la máquina.

La arquitectura de von Neumann solucionó este problema almacenando el programa en la memoria (por lo tanto, programa almacenado). Este bloque de memoria se comparte entre almacenamiento de programas y almacenamiento de datos, lo que permite que los datos se traten como código y viceversa. Además, permite el uso del código de auto

modificación, que era útil en los primeros días de la arquitectura para reducir el uso de memoria o mejorar el rendimiento.

La Figura 2.4.1 contiene un diagrama de bloques de la arquitectura de von Neumann. Esta muestra el bloque de memoria individual con dos unidades de control, el dispositivo que lee e interpreta el programa, y la **ALU (Arithmetic Logic Unit (Unidad lógica y aritmética))**, donde se ejecutan la mayoría de las operaciones. La necesidad de comunicarse con la memoria externa a la **CPU (Central Procesesing Unit (Unidad Central de Procesamiento))** conduce a un límite de rendimiento conocido como el cuello de botella de von Neumann.

Este cuello de botella es especialmente severo en esta arquitectura en comparación con otros, debido a la unidad de control y ALU que necesitan leer y escribir en la memoria, por lo tanto, comparte el recurso de limitación en el sistema (tiempo de acceso a la memoria).



**Figura 2.4.1. Arquitectura Von Neumann**

Arquitectura Harvard

Una solución al cuello de botella de von Neumann es separar la memoria del programa de la memoria de datos (ver Figura 2.4.2). Esta separación permite varias mejoras sobre la arquitectura de von Neumann.



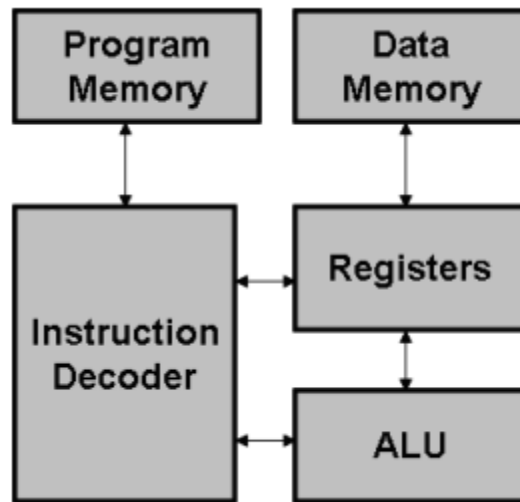
La primera y más obvia mejora es que tanto la memoria del programa como la memoria de datos se pueden acceder simultáneamente. En la arquitectura de von Neumann, para almacenar una palabra de un registro a través de la ALU en la memoria, la unidad de control primero debe cargar e interpretar la instrucción, entonces la ALU puede transferir los datos a la memoria, y finalmente la unidad de control puede pasar a la siguiente instrucción. Esto requiere dos operaciones de lectura / escritura separadas a lo largo del mismo camino. En la arquitectura de Harvard, escribir en la memoria de datos y leer desde la memoria del programa para la siguiente operación se puede realizar simultáneamente reduciendo el tiempo requerido para cualquier instrucción que acceda a la memoria de datos.

Un cambio algo menos obvio que puede aumentar enormemente la velocidad de operación es que las longitudes de las palabras en la memoria del programa ya no necesitan ser un número entero número de bytes. Esto permite palabras de instrucción más largas que pueden contener una instrucción y una dirección de memoria en una sola instrucción, y por lo tanto cada lectura de la memoria del programa, y cada ciclo de reloj del procesador, puede ser una instrucción completa.

En la arquitectura de von Neumann, las instrucciones son muchos comandos para abarcar tanto el código de operación como las direcciones de memoria requeridas. El ejemplo dado arriba requeriría tres operaciones de lectura / escritura, operaciones en oposición a las dos operaciones mencionadas anteriormente o la operación única de la arquitectura de Harvard.

La principal desventaja de la arquitectura de Harvard es que no puede modificarse la memoria del programa, lo que limita su utilidad en sistemas generales como ordenadores. Esto no representa un problema para procesadores más dedicados tales como aquellos en sistemas integrados, aunque el ancho de banda de la memoria debe ser tan grande como la memoria puede ser accedida por dos operaciones por ciclo. Tanto la familia AVR de microcontroladores producidos por la familia PIC de Atmel y Microchip son arquitecturas Harvard, aunque se han modificado ligeramente para

permitir las operaciones lectura / escritura para programar la memoria. Estas operaciones se usan principalmente para arranque cargadores.



**Figura 2.4.2. Estructura Von Neumann con memoria externa.**

Convertidor analógico digital

Muchos microcontroladores o PIC tienen un periférico ADC. Este dispositivo sumamente útil convierte un voltaje analógico, esto es un cierto nivel de voltaje común y corriente, en un número binario que puede ser manipulado en un programa.

Debido a que muchos sensores entregan los valores que leen como voltajes analógicos el uso de convertidores analógicos digital es algo muy común, por no mencionar el hecho que vivimos en un mundo analógico y es nuestra lógica digital la que constituye una abstracción que nos permite manipular información obtenida muchas veces por ADCs.

Si por ejemplo se quiere saber el valor de un nivel leído por un sensor, primero debe buscarse la relación entre la lectura y el voltaje entregado por el sensor en la hoja de datos del mismo, luego este voltaje analógico debe ser convertido a bits usando el convertidor analógico digital, pero para saber qué valor de voltaje significa este número binario debemos hacer un pequeño cálculo para convertir este número binario en un voltaje.

Hay una gran cantidad de terminología integral para el uso de ADC. Aquí están las definiciones de muchos de estos términos, seguidas por un ejemplo de su uso y valores:

ADC: un dispositivo que se encuentra a menudo en microcontroladores o como un chip dedicado que convierte una tensión analógica en un representativo valor digital.

Resolución ADC: generalmente medida en bits, la resolución ADC indica específicamente el número de valores digitales discretos que el ADC puede generar. Por ejemplo, un ADC de 8 bits puede producir 256 ( $2^8$ ).

Exactitud: existen varias fuentes de error inherentes al uso de ADC. La precisión es una medida general de estos errores y se mide en una unidad llamado **LSB (Less Significant Bit (Bit menos significativo))**.

LSB: esta es una unidad para medir, entre otras cosas, el error. Es igual al cambio en el voltaje de la señal de entrada necesario para aumentar la señal de salida digital al siguiente valor consecutivo (es decir, la diferencia entre recibir una salida de 114 frente a 115).

Escala completa: la medición a escala completa de un ADC es el rango que cubre el valor medible más bajo al valor medible más alto. Estos son a menudo basados a tierra o VCC, pero también puede usar voltajes de referencia separados.

Resolución de voltaje: este es el cambio en el voltaje de entrada correspondiente a un cambio de un solo paso en la señal de salida. También es igual a 1 LSB.

Tiempo de conversión: cada conversión de analógico a digital requiere una cantidad finita de tiempo. El tiempo de conversión es el tiempo más largo que una conversión puede tomar.

## Interrupciones

Una interrupción es una notificación al procesador de que se ha producido algún evento y requiere atención, análoga a una llamada telefónica durante el trabajo. Las interrupciones pueden activarse por una serie de eventos que incluyen comunicaciones

entrantes, errores que ocurren en el hardware, notificación de que se ha completado una tarea (como transmisión o una conversión ADC), los valores de cambio de pines de entrada o temporizadores, sólo para nombrar unos pocos.

Un tipo de interrupción que la mayoría de las personas encuentra en un base es la interrupción que ocurre en una computadora cada vez que una tecla está presionada la mayoría de las veces las pulsaciones de teclas se almacenan en búfer y se muestran más tarde, sin la interrupción si la computadora no estaba prestando atención activamente las teclas se perderán. Estas interrupciones son vitales para la fluidez y operación directa de muchos sistemas.

Almacenamiento y ejecución del programa.

Un programa es una lista de instrucciones al procesador. Todos los microcontroladores tienen un conjunto de instrucciones que pueden ejecutar.

Un conjunto de instrucciones típicas de un microcontrolador incluirá instrucciones para: transferir información entre registros y memoria; realiza operaciones aritméticas y lógicas; efectuar comparaciones y pruebas sobre el contenido de sus registros de memoria; controlar la secuencia de ejecución de programas.

Por lo general la operación que una instrucción ha de ejecutar está definida por un **opcode (Operation Code (código de operación))**, (en microcontroladores sencillos generalmente de un solo byte) conocido también como. Algunas instrucciones requieren además del opcode información extra (operandos). Por ejemplo, una instrucción para almacenar el contenido de un registro en una posición de memoria; necesitara incluir la dirección de memoria de destino.

La unidad de control y decodificación de instrucciones es el corazón del procesador. Es la encargada de extraer de forma secuencial las instrucciones de la memoria y luego ejecutarlas.

Unido a la unidad de control se encuentra un generador de reloj, que utiliza un oscilador para producir una señal de reloj muy precisa. En el caso de los microcontroladores PIC,

cada instrucción tarda cuatro ciclos de reloj, por lo que es normal suponer que la velocidad real del trabajo del dispositivo es la velocidad del reloj entre cuatro, de manera de suponer que cada instrucción tarda un solo ciclo de reloj. Es importante indicar que las instrucciones de salto tardan el doble de tiempo.

El funcionamiento de la unidad de control y decodificación de instrucciones se pueden modelar como la alternancia de dos etapas (ambas pueden durar varios ciclos de reloj).

Etapas de búsqueda de instrucciones. En esta etapa se transfiere la dirección de la siguiente instrucción al bus de direcciones, se envía una orden de lectura a los dispositivos de memoria a través del bus de control, se lee la información del bus de datos.

Etapas de ejecución de instrucciones, en él se ejecuta la instrucción, cuando la ejecución está completa, la maquina comienza automáticamente el ciclo de búsqueda de la siguiente instrucción del programa. La ejecución de un programa es por lo tanto una secuencia continua de ciclos de búsqueda y ejecución (en algunas arquitecturas, como la de los PIC de Microchip, el ciclo de búsqueda de la siguiente instrucción puede hacerse en paralelo mientras se ejecuta la instrucción actual).

El procesador de muchos microcontroladores modernos responde a la arquitectura **RISC (Reduced Instruction Set Computer (Computadora de juego de instrucciones reducidas))**. Aun cuando existen diferentes aproximaciones a la arquitectura RISC, existen ciertas características comunes a todas ellas:

- Una instrucción por ciclo
- Operaciones registro a registro
- Modos de direccionamientos sencillos
- Formatos de instrucciones sencillas

Familias de microcontroladores

La familia HC05 es muy utilizada por que es versátil de recursos y es muy fácil de programar, pero no es lo único que lo destaca, también es porque es muy compatible

con las familias de microcontroladores más avanzadas que le permiten pasar diseños a microcontroladores con más alto rendimiento de manera fácil y rápida, aparte de eso tienen otras ventajas:

- Un **timer (reloj)** robusto
- Memoria EEprom de 256
- Memoria de programa desde 4k hasta 32k.
- Memoria RAM desde 176 hasta 528 bytes.
- Ocho canales de A/D
- Comunicación serial síncrona y asíncrona.

Familia HC08 es de propósito general. Los diferentes tipos de microcontroladores de esta familia tienen diferentes tipos de componentes, pero contienen algo en común que pueden pasarse aplicaciones entre ellos, eso les facilita el diseño. Algunos de los componentes internos que contienen estos microcontroladores están:

- Convertidores analógicos digitales
- Módulo de control de tiempos y sistemas de comunicación.

Los microcontroladores de la familia 68HC11 tienen la característica de ser muy potentes y costosos a diferencia de la familia 68HC08 y es muy utilizada en dispositivos empotrados y su arquitectura es de Von Newman, también destaca de ellos que las instrucciones que contienen internamente son muy compatibles con la mayoría de sus predecesores.

- Dos registros índices de 16 bits
- Un registro de banderas
- Un puntero de pila
- Un contador de programa
- Tiene cinco puertos externos (A, B, C, D y E) cada uno de ocho bits excepto en E, que es generalmente de seis bits.

La familia de PIC es creada por Microchip y se divide por gamas: enana, baja, media y alta.

La gama enana se caracteriza por su reducido tamaño, tiene 8 pines, el voltaje que utilizan es de directa y operan entre 2.5 y 5.5 [V] y al trabajar a 5 [V] y 4 [MHz] la corriente es menos de 2 [mA] Su formato de instrucciones puede ser de 12 o de 14 bits y su repertorio de instrucciones es de 35.

Los microcontroladores de gama baja son una serie de PIC's que tienen recursos limitados, pero también tienen una mejora, la de relación en costo/presentaciones, son encapsulados de 18 y 20 pines y se pueden alimentar con un voltaje de 2.5 [V] lo que permite que puedan funcionar con pilas ya que no consumen mucha corriente (menos de 2 [mA] 5 [V] y 4 [MHz]), contienen 33 instrucciones cuyo formato consta de 12 bits.

La familia de gama media es más variada, tienen encapsulados de 18 hasta 68 pines, son más funcionales que los de gama baja y tienen ventajas como:

- Interrupciones
- Poseen comparadores de magnitudes analógicas.
- Convertidores A/D
- Puertos serie y diversos temporizadores.
- Contienen un set de 35 instrucciones que es compatible con el de gama baja.

La familia de gama alta tiene 58 instrucciones de 16 bits, también tienen un sistema de gestión de interrupciones vectorizadas, tienen diferentes controladores periféricos, puertos de comunicación serie y paralelo con elementos externos, un multiplicador hardware de gran velocidad y como una mejor capacidad de memoria, que alcanza los 8k, palabras en la memoria de instrucciones y 454 bytes en la memoria de datos.

Una de las ventajas que lo caracteriza es su arquitectura abierta, lo que permite la posibilidad de ampliación del microcontrolador con un elemento externo, esto hace que los componentes tengan entre 40 y 44 pines.

Familia de microcontroladores Intel MCS 51, esta familia se caracteriza por su capacidad de expansión de memoria ya que tiene 64k de memoria externa RAM y ROM lo que le permite almacenar un programa de control, su memoria tiene espacios para las diferentes direcciones de datos como es la lectura y escritura ya que tiene una arquitectura Harvard. Algunas de sus características son:

- 128 a 256 de RAM interna
- Ok y 54 k de memoria de programa.
- Compatibilidad con I2C, SPI y USB (protocolos de comunicación)
- Permite operaciones a nivel bit, por la inclusión de una unidad booleana.
- Inclusión de dos o tres temporizadores.

Familia ATMEL, esta familia tiene una arquitectura RISC, pueden llegar hasta 32 bits, tienen diferentes grupos de microcontroladores los cuales son:

- Microcontroladores basados en el 8051 Intel, incorpora una memoria de programa flash.
- Microcontroladores AT91, soportan compilaciones en C, emulador.
- Microcontroladores AVR, con arquitectura RISC y CPU de 8 bits, incorpora módulos USART, **SPI (Serial Peripheral Interface Bus o bus serial de interfaz de periféricos)**, ADC, etc. Implementado sobre arquitectura Harvard.

Recientemente surgió un microcontrolador llamado Arduino de la marca ATMEL, que incluye, reguladores de tensión, un puerto USB (En los últimos modelos, aunque el original utilizaba un puerto serie) conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y también hacer pruebas de comunicación con el propio chip. Un Arduino dispone de 14 pines que pueden configurarse como entrada o salida y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 [V] También dispone de entradas y salidas analógicas. Mediante las entradas analógicas podemos obtener datos de sensores en forma de variaciones continuas de un voltaje. Las salidas analógicas suelen utilizarse para enviar señales de control en forma de señales PWM.



Cada uno de los 14 pines digitales se puede usar como entrada o como salida. Funcionan a 5V, cada pin puede suministrar hasta 40 [mA]. La intensidad máxima de entrada también es de 40 [mA]. Cada uno de los pines digitales dispone de una resistencia de pull-up interna de entre 20 [kΩ] y 50 [kΩ] que está desconectada, salvo que nosotros indiquemos lo contrario. Arduino también dispone de 6 pines de entrada analógicos que trasladan las señales a un conversor analógico/digital de 10 bits.

También cuenta con pines especiales de entrada y salida como son:

- RX y TX: Se usan para transmisiones serie de señales TTL.
- Interrupciones externas: Los pines 2 y 3 están configurados para generar una interrupción en el atmega. Las interrupciones pueden dispararse cuando se encuentra un valor bajo en estas entradas y con flancos de subida o bajada de la entrada.
- **PWM (Pulse-Width Modulation o modulación por ancho de pulso)**: Arduino dispone de 6 salidas destinadas a la generación de señales PWM de hasta 8 bits.
- SPI: Los pines 10, 11, 12 y 13 pueden utilizarse para llevar a cabo comunicaciones SPI, que permiten trasladar información full dúplex en un entorno Maestro/Esclavo.
- **I2C (Inter Integrated Circuits o Circuitos internamente integrados)**: Permite establecer comunicaciones a través de un bus I2C. El bus I2C es un producto de Phillips para interconexión de sistemas embebidos. Actualmente se puede encontrar una gran diversidad de dispositivos que utilizan esta interfaz, desde pantallas **LCD (Liquid Crystal Display o Pantalla De Cristal Líquido)**, memorias EEPROM, sensores.

## **Capítulo III Estado del arte de invernaderos**

### **3.1 Antecedentes.**

Los historiadores no pueden registrar con precisión a quién o a quienes se les puede atribuir la implementación del cultivo protegido de plantas. Hay quienes afirman que los egipcios fueron los primeros en implementar este tipo de cultivos, otros atribuyen sus primeros usos a los romanos, aunque de igual forma existen referencias a estructuras y prácticas para proteger cultivos entre griegos, judíos, chinos y otros pueblos de la antigüedad.

Algunas referencias señalan que hace más de 3500 años en el antiguo Egipto se construían especies de invernaderos o estructuras para proteger plantas cultivadas cuando las condiciones ambientales exteriores eran adversas para su desarrollo. Los egipcios ya sabían cómo fabricar vidrio unos 1500 años antes de nuestra era, y esta tecnología no se conoció en Europa, sino hasta las últimas etapas de la Edad Media. Por

lo que es probable que los invernaderos que conocemos hoy en día sean resultado de una de las tantas aplicaciones encontradas al vidrio una vez que éste se difundió en Europa, como una extensión de su empleo en los grandes ventanales de los palacios de reyes y monarcas, donde alguien observó que las plantas de macetas colocadas tras esos ventanales crecían mejor que otras que no tenían las mismas condiciones de iluminación por estar más lejos de los ventanales.

Los romanos, durante el primer siglo de nuestra era, cultivaban pepinos bajo “cristal de Hispania”, conocida en la actualidad como “*lapis specularis*” que no es otra cosa que una piedra de yeso selenítica de un espectacular traslúcido que provenía de las minas de la Hispania romana. Este cultivo se realizaba para el emperador Tiberio, quien los consumía diariamente por prescripción médica. En este caso el cultivo se realizaba en macetas montadas sobre plataformas con ruedas para transportarse fácilmente al sol y durante la noche o los días invernales, protegerlos entre estas piedras translúcidas.

Los invernaderos comienzan a formar parte de los jardines botánicos desde su aparición en la primera mitad del siglo XVI; en Italia existe información sobre el jardín botánico de Padua, considerado el jardín botánico universitario más antiguo del mundo, creado en 1545, que tuvo modificaciones alrededor del año 1550, donde se modificó parte de su estructura para construir algunas partes con vidrio, lo cual significaría que dicho jardín cuenta con un invernadero al menos a partir de esta fecha. Subsecuentemente en el año de 1549 en el jardín botánico de Pisa, en 1569 en el jardín botánico de Bolonia, etc. Cabe mencionar que en Italia hay más de 100 jardines botánicos y algunos de ellos son de los más antiguos de Europa, por lo que no es de extrañar que los invernaderos más antiguos sean de esta región. Algunas de estas estructuras originalmente se les denominaron “**orangeries**”, palabra de origen francés que significa “**naranjería**” que bajo este contexto se traduce como invernadero. Estas estructuras pertenecían normalmente a personas con el poder adquisitivo suficiente para acceder a su pasión por las plantas y frutas exóticas, mismas que fueron populares en los palacios y las grandes fincas del

norte de Europa. En esa época fueron famosos los orangeries de Versalles, construidos bajo la dirección de la Quintinye durante el reinado de Luis XVII a finales de 1600.



**Figura 3.1.1. “Orangerie” inglesa, resguardaba árboles cítricos y otras plantas de climas cálidos.**

Para el siglo XVII además de Europa ya se utilizaban técnicas para proteger a los cultivos del frío en otras partes del mundo y para ello se empleaban armazones portátiles de madera cubiertos con papel transparente aceitado para calentar el ambiente donde se desarrollaban las plantas. En Japón se usaron esteras de paja en combinación con papel impregnado de manteca para proteger a los cultivos de ambientes naturales severos.

Los primeros techos de cristal que dejaban pasar la luz hicieron su aparición en Inglaterra hacia el año de 1717 y se fueron transformando hasta llegar a convertirse en los invernaderos victorianos, exuberantes y extravagantes. A finales de ese siglo el vidrio ya se usaba en estructuras que se empleaban para el cultivo de melón, uvas, duraznos, fresas y cítricos. Algunos de ellos fueron verdaderos palacios de cristal.

El palacio de cristal de la Exposición Universal de 1851 en Inglaterra, fue símbolo de la Revolución Industrial que caracterizó al siglo XIX por la construcción de grandes estructuras de acero y junto con la industria siderúrgica floreció también la del vidrio.

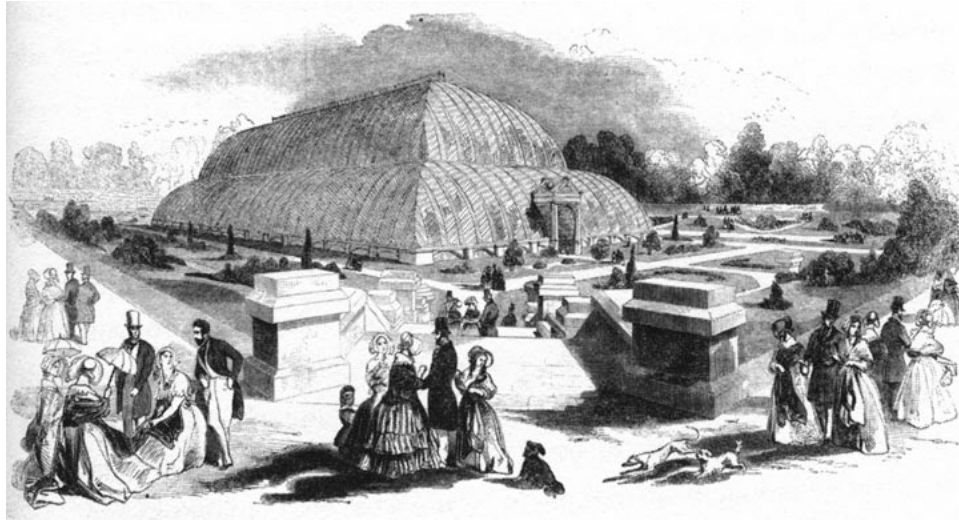
Algunas de estas estructuras todavía están en uso albergando jardines botánicos, sobre todo en Europa.



**Figura 3.1.2. Palacio de Cristal, Inglaterra.**

Las conquistas territoriales, los grandes descubrimientos geográficos y el advenimiento de la Revolución Industrial fueron factores determinantes para fomentar el desarrollo inicial de los invernaderos, desarrollo que tuvo origen principalmente en los países europeos, sobre todo en aquellos en los que ocurrió la Revolución Industrial, así como en los países que participaron en el descubrimiento y colonización del mundo.

Por estas razones comenzó y se desarrolló la construcción de estructuras metálicas con cubiertas de vidrio destinadas a la aclimatación y el cultivo de las plantas traídas de latitudes y condiciones ambientales diferentes a las de Europa. Los materiales por excelencia en esta época, fueron sobre todo los perfiles angulares y las grandes vigas de acero para soportar tanto la estructura como el peso de la cubierta, aunque también se empleaban algunas piezas de madera.



**Figura 3.1.3. La casa de las palmeras**

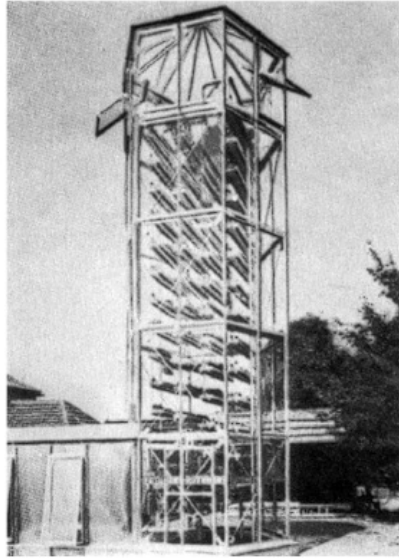
Un ejemplo de ello lo encontramos en la **The Palm House (La casa de las palmeras)** en el jardín botánico de Kew. Construida por el arquitecto Decimus Burton y el ingeniero Richard Turned, fue considerada el invernadero de clima templado más grande del mundo en su época. Con 28 metros de altura, doce calderas llevaban agua caliente por una red de tuberías que funcionaban a modo de radiadores, manteniendo la temperatura de 27 grados en invierno. Pilares huecos de hierro y canalones en la base de piedra recogían agua de lluvia, conduciéndola a un depósito subterráneo para ser aprovechada en las instalaciones del invernadero para el cultivo de palmeras y otras plantas subtropicales.

Posteriormente a finales del siglo XIX e inicio del siglo XX, los invernaderos empezaron a utilizar en la producción comercial de cultivos como plantas ornamentales, flores de corte y hortalizas. Holanda fue el exponente más representativo de las nuevas tecnologías sobre la construcción de invernaderos empleando acero y cristal. Así que para el año de 1904, este país, contaba con 30 hectáreas de invernaderos cubiertos de vidrio y para el año de 1970 existían unas 7000 hectáreas con estas características.

Sin embargo los altos costos de los invernaderos de acero con cubierta de vidrio no permitieron un desarrollo mayor de la superficie con agricultura protegida, situación que frenó la expansión en regiones del mundo poco desarrolladas. Así mismo el uso más común de los primeros invernaderos comerciales fue el cultivo de plantas ornamentales, posteriormente, en las décadas de 1920 a 1940, se establecen las bases de producción hidropónica bajo invernadero. Sin embargo, la producción masiva de alimentos bajo invernaderos se estableció totalmente hasta la introducción de los plásticos flexibles como cubiertas, lo cual ocurrió después de la Segunda Guerra Mundial.

El primer invernadero con cubierta de plástico se estableció en 1948, cuando el Profesor Emery Myers Emmert de la universidad de Kentucky, usó celofán para cubrir un pequeño invernadero, dando así origen al uso de los plásticos en la agricultura, por ello se le considera como el padre de la plasticultura, ya que él fue el primero que desarrolló mucho de los principios de las tecnologías plásticas con propósitos agrícolas a través de sus invernaderos de investigación.

A mediados del siglo XX, después de la Segunda Guerra Mundial, con el advenimiento de los vuelos espaciales, surgen materiales más ligeros y resistentes para la construcción de estructuras en general e invernaderos en particular, desarrollo que da como resultado construcciones de materiales plásticos, resultado de los avances en la industria petroquímica mismos que empezaron a emplear en las cubiertas de los invernaderos. Los plásticos y los perfiles estructurales, permitieron la construcción de estructuras más baratas que las de acero y cristal e hicieron posible que las nuevas tecnologías estuvieran al alcance de un mayor número de productores, fomentando un rápido desarrollo de los cultivos protegidos en varias regiones del mundo.



**Figura 3.1.4. Torre de Ruthner.**

Para el año de 1963 un invernadero en forma de torre fue ideado por el austriaco Ruthner, en un Instituto de Horticultura cerca de Viena, con estructura metálica y con revestimiento de cristal o de plástico rígido. Este tipo de invernadero fue ideado con el fin principal de obtener la máxima automatización de cierto tipo de cultivo por medio de un sistema de producción de ciclo continuo, mediante el uso de cintas transportadoras de rodillos. La velocidad de las cintas se regula en relación al tiempo en las plantas necesitan dentro del invernadero para ciertas fases de su desarrollo.

Actualmente existe una amplia gama de materiales para la construcción de estructuras y recubrimiento de invernaderos, así como para el desarrollo de la agricultura protegida en general. Materiales que comprenden desde la madera a los perfiles tubulares y ángulos de acero de diversos calibres, hasta el aluminio o concreto, elementos que son empleados en la fabricación de estructuras, mientras que en las cubiertas se emplean placas de plásticos rígidos y semirrígidos de diversos tipos, películas flexibles, mallas sombra, mallas protectoras y pantallas térmicas.



De esta forma, el desarrollo y evolución de los invernaderos para la producción comercial de cultivos se aceleró a partir de la década de los años setenta, mediante tres vías determinadas por diferentes circunstancias económicas, sociales y tecnológicas bien definidas.

La primera vía fue la continuación de las estructuras tradicionales, la cual se difundió poco por sus altos costos, que caracterizaban a los primeros invernaderos de acero con perfiles angulares, diseñadas para soportar el gran peso de las cubiertas de vidrio, en algunos casos incluyendo algunas partes de ladrillo o concreto. Estructuras a las que posteriormente se les incorporaron elementos metálicos como el aluminio para recibir y sujetar los materiales de las cubiertas, donde además del vidrio se empezaron a emplear placas de plásticos rígidos y semi-rígidos. Estos tipos de estructuras se caracterizan por perfiles rectos y techos a dos aguas, aunque también los hubo con techos curvos, dando curvatura en las uniones de las piezas.

La segunda vía de evolución de los invernaderos, que inició a mediados del siglo XX, se fomentó mediante la construcción de estructuras de bajo costo, realizadas artesanalmente, poco elaboradas y caracterizadas por un bajo nivel tecnológico. Muchos de estos invernaderos fueron manejados dentro de un esquema familiar, con la participación de productores de bajos ingresos, que se organizaron en sociedades y cooperativas con la finalidad de conseguir créditos y apoyo para construir instalaciones e iniciar sus empresas. Estas estructuras se construyeron de madera, tubos de hierro sin galvanizar y perfiles tubulares de acero negro, los materiales empleados en la cubierta fueron plásticos flexibles como polietileno y las láminas de fibra de vidrio.

La tercera vía de desarrollo de los cultivos protegidos fue proporcionada por la construcción de invernaderos ligeros, mismos que se fabrican de forma industrial empleando estructuras modulares de poco peso. Los materiales empleados en estas construcciones son perfiles tubulares de acero galvanizado, en menor medida aluminio, de diferentes calibres. Mientras en las cubiertas destacan las películas o filmes plásticos, materiales que permiten la construcción de estructuras más ligeras y aerodinámicas, preferentemente modulares para instalarse en baterías de varias naves. Por esta vía,

estaba ocurriendo el principal desarrollo y expansión de los invernaderos modernos en la actualidad.

En los invernaderos automatizados de nivel tecnológico alto se incluyen instalaciones con dispositivos automatizados con sensores y actuadores para controlar el riego. Un ejemplo son los temporizadores, que se programan para encender y apagar bombas, así como foto celdas para apagar y encender luces, o sensores para operar calentadores y otros dispositivos similares. Algunos invernaderos automatizados tienen actividades controladas por computadora.

En este tipo de instalaciones existe un control automatizado completo del ambiente y la nutrición de los cultivos, con sistemas de irrigación y el uso de pantallas térmicas y mallas de sombreo. Son instalaciones herméticas y usan los insumos y equipo de aplicación más modernos, como aplicación de CO<sub>2</sub>, uso de acolchados blancos dentro del invernadero para el manejo de la luz, hormonas y abejorros para la polinización.

Los sistemas automáticos en los invernaderos proporcionan cierta independencia en el manejo de los cultivos ya que se tiene el control de aspectos vitales, sin la dependencia de los operadores, que están en función de las variaciones ambientales y su efecto sobre las condiciones internas incrementando así la producción destinada a satisfacer una cada vez más creciente demanda en nuestros días.

### **3.2. Tipos de invernaderos**

Un invernadero es toda aquella estructura cerrada cubierta por materiales transparentes, dentro de la cual es posible obtener condiciones artificiales de microclima, y con ello cultivar plantas fuera de estación en condiciones óptimas.

Las ventajas del empleo de invernaderos son: precocidad en los frutos, aumento de la calidad y del rendimiento, producción fuera de época, ahorro de agua y fertilizantes,

mejor control de insectos y enfermedades, y la posibilidad de obtener más de un ciclo de cultivo al año. Algunos inconvenientes son: alta inversión inicial, alto costo de operación y requiere personal especializado.

Los invernaderos se pueden clasificar de distintas formas. Según las determinadas características de sus elementos constructivos (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 como los siguientes:

- 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.
- Requerimientos bioclimáticos. De acuerdo a la especie en cultivo.
- Características climáticas. De acuerdo a la zona o área geográfica donde vaya a construirse el invernadero.
- Disponibilidad de mano de obra. (Factor humano).
- Imperativos económicos locales (mercado y comercialización).

Según la conformación estructural, los invernaderos se pueden clasificar en:

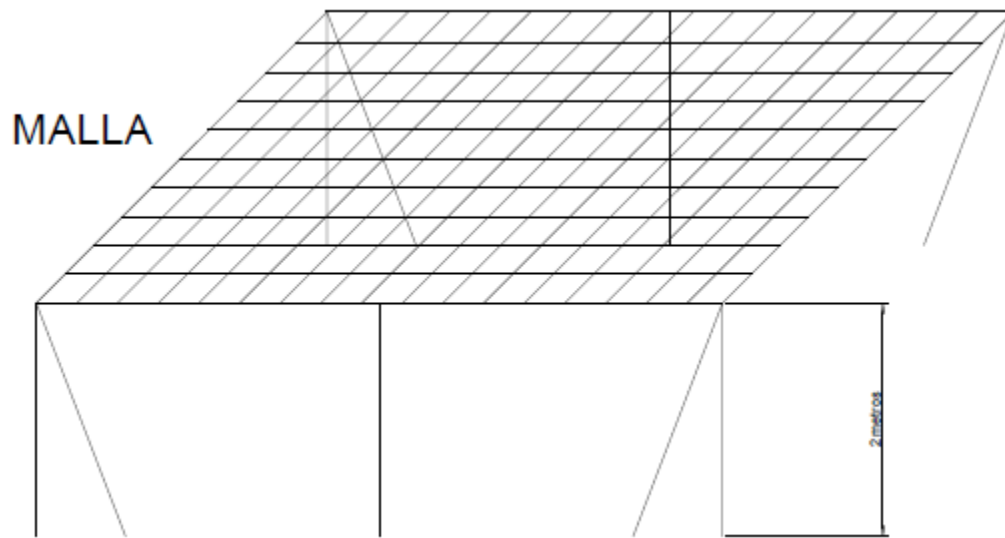
- Plano o tipo parral.
- Tipo raspa y amagado.
- Asimétrico.
- Capilla (a dos aguas, a un agua).
- Dientes de sierra.
- Multi-capilla

- Gótico.
- Tipo túnel.
- De cristal o tipo Venlo.

*Invernadero plano o tipo parral.* Este tipo de invernadero se utiliza en zonas poco lluviosas, aunque no es aconsejable su construcción. 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. 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. Los invernaderos planos tienen una altura de cubierta que varía entre 2.15 y 3.5 metros, y la altura de las bandas oscila entre 2 y 2.7 metros. Los soportes del invernadero se apoyan en bloques troncopiramidales prefabricados de hormigón colocados sobre pequeños pozos de cimentación.

*Ventajas.* 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, entre otras.

*Desventajas.* Poco volumen de aire y/o mala ventilación, la instalación de ventanas cenitales es bastante difícil, demasiada especialización en su construcción y conservación, rápido envejecimiento de la instalación, es poco o nada aconsejable en lugares lluviosos, corren 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, de difícil mecanización y dificultad en las labores de cultivo por el excesivo número de postes, permite el goteo del agua de lluvia y entrada de 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.



**Figura 3.2.1. Invernadero tipo parral.**

*Invernadero en raspa y amagado.* Los invernaderos de raspa y amagado son invernaderos que resultan de una transformación de los invernaderos planos o tipo parral con el objetivo de poder evacuar el agua de lluvia, debido principalmente a que en los invernaderos planos, al llover, se forman grandes bolsas de agua que perjudican y comprometen seriamente la estructura.

Consiste en un invernadero donde la parte alta, que se conoce como “raspa”, está sostenida mediante tubos galvanizados o de perfiles laminados y alambres o trenzas de hilos de alambre, y la parte baja, que se conoce como “amagado”, se une a la estructura mediante horquillas de hierro sujetas a la base del invernadero.

El uso de este tipo de invernadero está recomendado para climas templados, ya que por cuestiones de estanqueidad y aislamiento no se recomienda su empleo en climas fríos. Debido a su diseño, su baja altura les confiere resistencia a fuertes vientos.

#### Ventajas

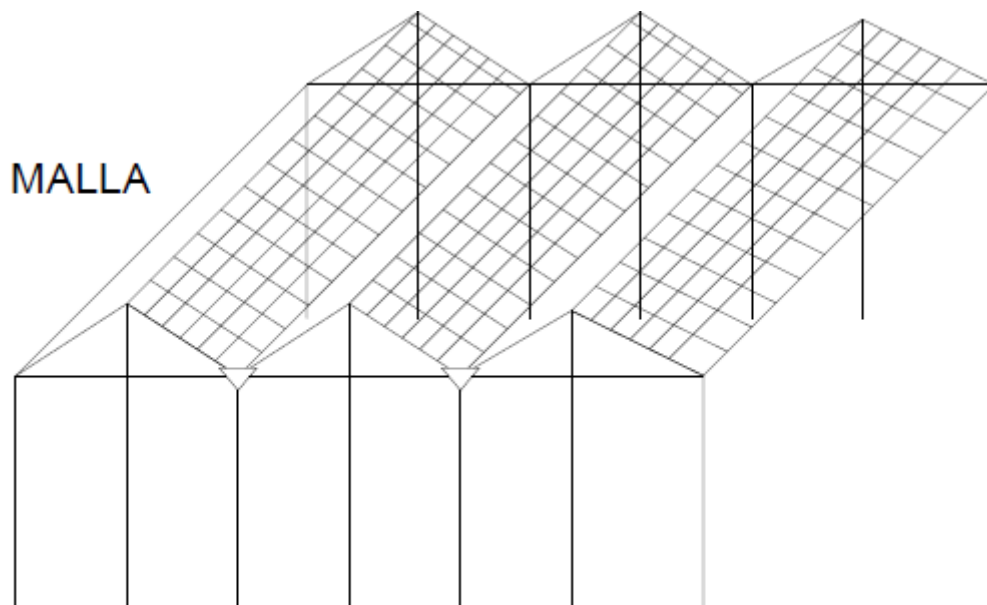
- Económico.

- 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.

#### Desventajas

- Diferencias de luminosidad.
- 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.



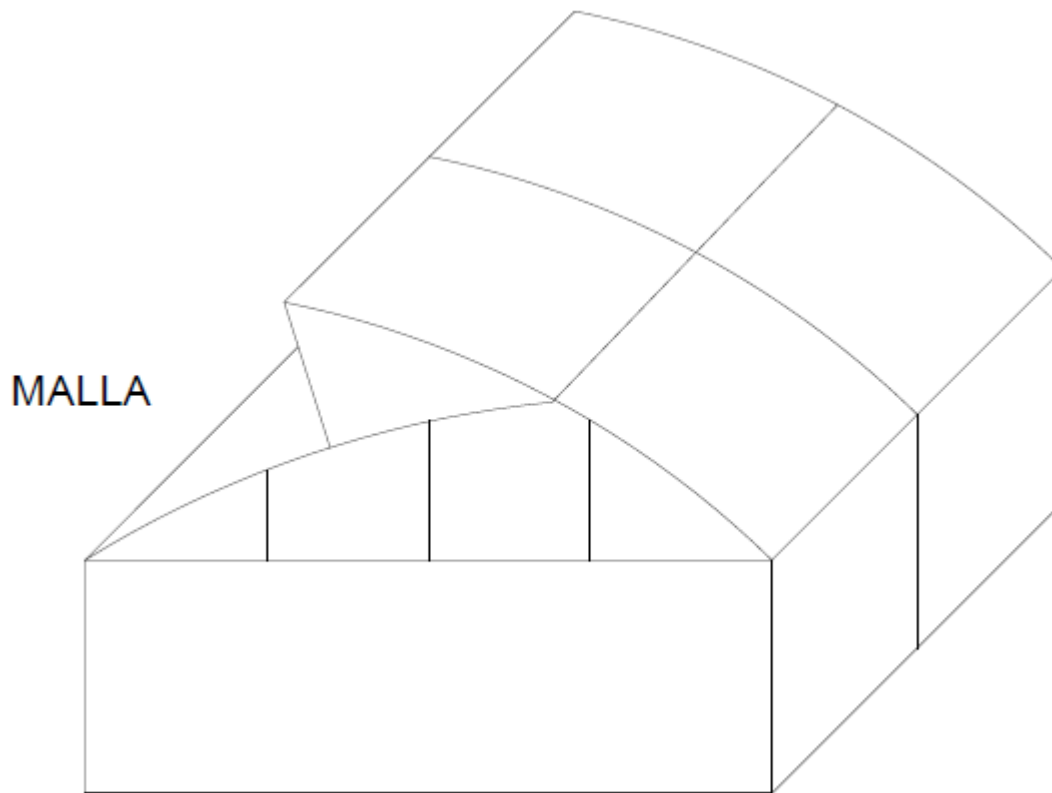
**Figura 3.2.2. Invernadero en raspa y amagado**

*Invernadero asimétrico.* También se denominan “Invernaderos Tropicales” porque su uso está muy extendido en estas regiones. Su geometría es asimétrica porque, a diferencia de los invernaderos tipo capilla y góticos, uno de los lados de la cubierta está más inclinado que el otro. La inclinación de la cubierta se estudia en función de la incidencia perpendicular sobre la misma de la luz al medio día solar, durante el invierno, con el objetivo de aprovechar al máximo la radiación solar incidente.

Está diseñado para el desarrollo de todo tipo de cultivos en clima tropical, con temperaturas cálidas y alta humedad. Proporciona una eficaz ventilación cenital, siendo esta normalmente fija. Las ventanas cenitales suelen orientarse para proteger al cultivo de los vientos fuertes típicos de las regiones tropicales

Difiere de los 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. 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° pero ocasiona grandes inconvenientes por la inestabilidad de la estructura a los fuertes vientos. Por ello se han tomado ángulo comprendidos entre los 8 y 11° en la cara sur y entre los 18 y 30° en la cara norte. La altura máxima de la cumbrera varía entre 3 y 5 metros, y su altura mínima de 2.3 a 3 metros.

La ventilación de este invernadero suele ser fija y es resuelta a través de las aperturas localizadas en el centro de cada uno de los arcos estructurales que corren a lo largo de todo el techo. Las aperturas permiten ventilación natural y la salida de aire caliente.



**Figura 3.2.3. Invernadero asimétrico.**

#### Ventajas

- Buen aprovechamiento de la luz en la época invernal.
- Elevada inercia térmica debido a su gran volumen unitario.
- Buena estanqueidad a la lluvia y al aire (no acceden al interior).
- Buena ventilación debido a su elevada altura.
- Permite la instalación de ventilación cenital a sotavento.

#### 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.



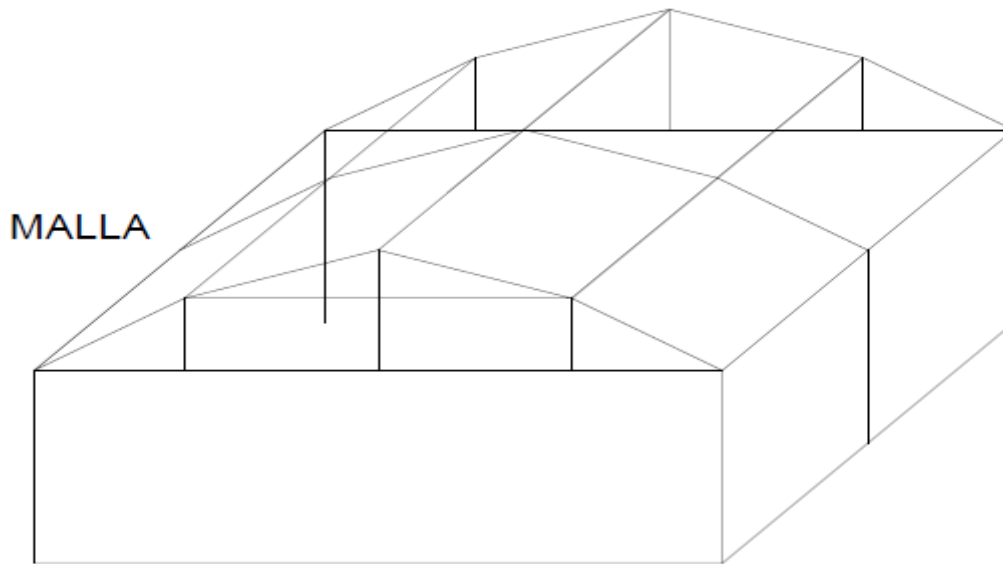
*Invernadero de capilla simple a dos aguas.* Los invernaderos de capilla simple tienen el techo formando uno o dos planos inclinados, según sea a un agua o a dos aguas.

### Ventajas

- 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.
- Permite la unión de varias naves en batería.
- Construcción de mediana a baja complejidad.
- Utilización de materiales con bajo costo, según la zona (postes y maderos de eucaliptus, pinos etc).
- Apto tanto para materiales de cobertura flexibles como rígidos.

### 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.



**Figura 3.2.4. Invernadero de capilla simple a dos aguas.**

*Invernadero en dientes de sierra.* Una variación de los invernaderos capilla, que se comenzó a utilizar en zonas con muy baja precipitación y altos niveles de radiación, fueron los invernaderos a una vertiente.

Estos invernaderos contaban con una techumbre única inclinada en ángulos que variaban entre  $5^\circ$  y  $15^\circ$  (orientados en sentido este-oeste y con presentación del techo hacia la posición del sol -norte para el hemisferio sur-).

El acoplamiento lateral de este tipo de invernaderos dio origen a los conocidos como dientes de sierra. La necesidad de evacuar el agua de precipitación, determinó una inclinación en las zonas de recogida desde la mitad hacia ambos extremos.

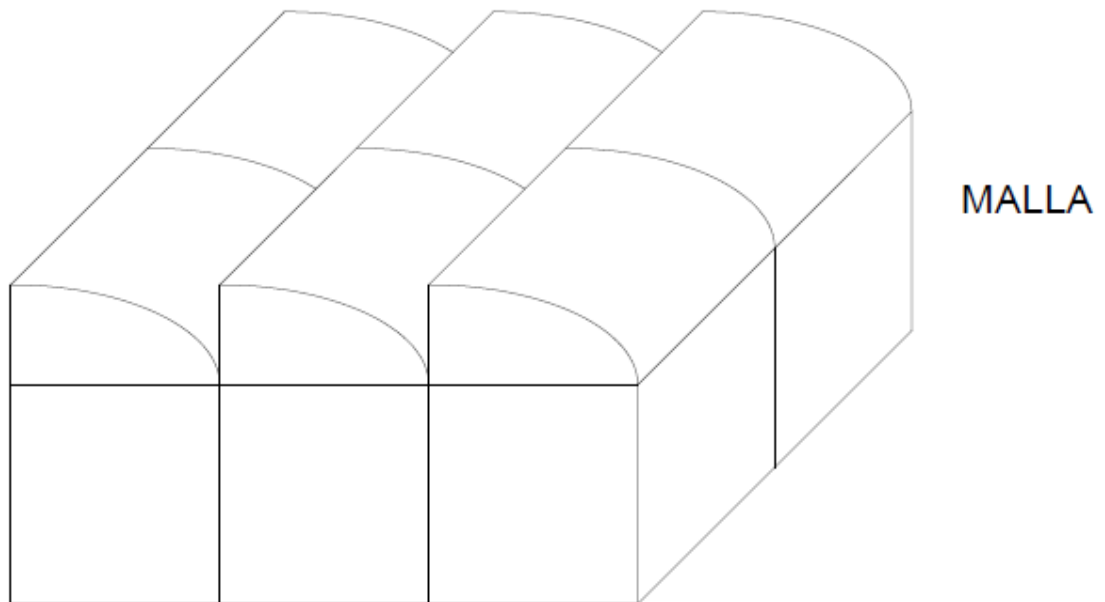
#### Ventajas

- Construcción de mediana complejidad.
- Empleo de materiales de bajo costo (según zonas).

#### Desventajas

- Sombreo mucho mayor que capilla (debido a mayor número de elementos estructurales de sostén).
- Menor volumen de aire encerrado (para igual altura de cenit) que el tipo capilla.

La anchura que suele darse a estos invernaderos es de 12 a 16 metros. La altura en cumbrera está comprendida entre 3.25 y 4 metros. Si la inclinación de los planos del techo es mayor a  $25^\circ$  no ofrecen inconvenientes en la evacuación del agua de lluvia. La ventilación es por ventanas frontales y laterales. Cuando se trata de estructuras formadas por varias naves unidas la ausencia de ventanas cenitales dificulta la ventilación.

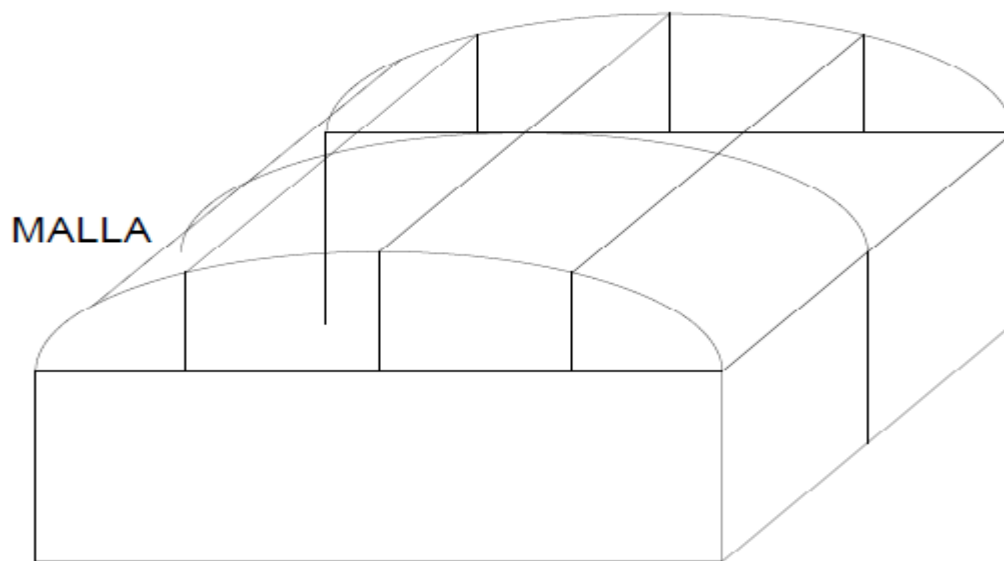


**Figura 3.2.5. Invernadero en dientes de sierra.**

*Invernadero multicapilla.* Se caracteriza por la forma de su cubierta formada por arcos curvos semicirculares y por su estructura totalmente metálica. El empleo de este tipo de invernadero está pensado para climas templados y fríos, aunque con las modificaciones adecuadas se pueden adaptar a casi todo tipo de condiciones climáticas, como puede

ser el reforzado de su estructura para climas más fríos, donde las cargas por nieve o granizo pueden ser un problema.

Tienen gran resistencia a fuertes vientos y permite una rápida instalación al ser estructuras prefabricadas. Su ventilación es mejor que en otros tipos de invernadero, debido a la ventilación cenital y vertical en las paredes frontales y laterales. La construcción de este tipo de invernadero es más difícil y cara que el tipo de invernadero capilla simple a dos aguas.



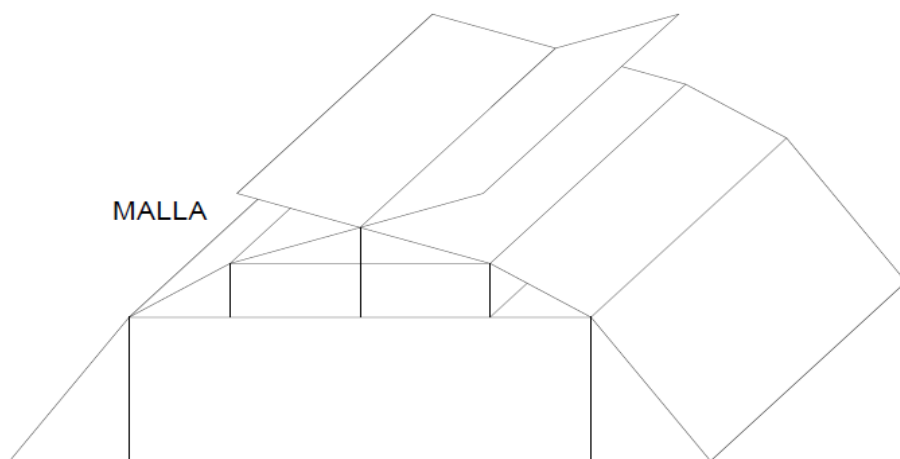
**Figura 3.2.6. Invernadero multicapilla.**

#### Ventajas

- Pocos obstáculos en su estructura.
- Buena ventilación.
- Buena estanqueidad a la lluvia y al aire.
- Permite la instalación de ventilación cenital, así como ventilación perimetral
- Buen reparto de la luminosidad en el interior del invernadero.
- Fácil instalación.

*Invernaderos Góticos.* El tipo de Invernadero Gótico es muy similar al de tipo capilla, diferenciándose en el diseño de los arcos, siendo estos de tipo ojival, lo que permite albergar un mayor volumen de aire, proporcionando un mejor microclima e iluminación interior.

Está diseñado para adaptarse a todo tipo de cultivos, particularmente a cultivos suspendidos y su construcción está orientada a climas extremos. Son estructuras diseñadas para soportar grandes cargas además de exigir ciertos cuidados y condiciones ambientales para el cultivo. Al ser la cumbrera de tipo gótico, nos permite construir naves más anchas.



**Figura 3.2.7. Invernaderos Góticos.**

*Invernadero túnel.* Están especialmente diseñados para pequeñas superficies y cultivos de pequeño tamaño como hortícolas de porte rastrero o baja altura. Resultan ser invernaderos económicos, ya que su estructura es simple, resistente y posibilita su traslado.

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 5×8 o 3×5 metros La altura máxima de este tipo de invernaderos oscila entre 3.5 y 5 metros En las bandas laterales se adoptan

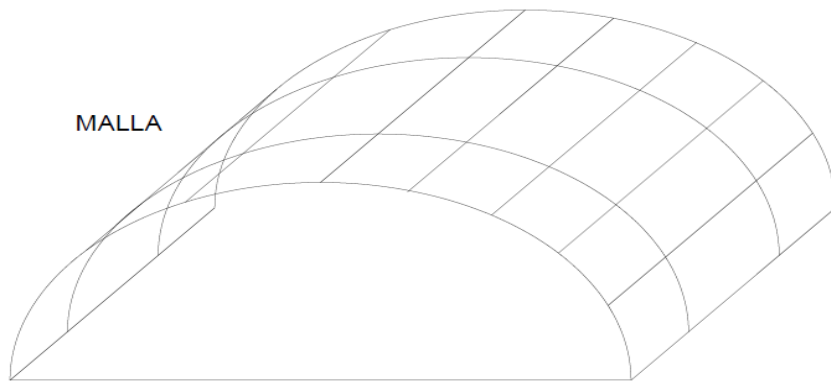
alturas de 2.5 a 4 metros. El ancho de estas naves está comprendido entre 6 y 9 metros y permiten el adosamiento de varias naves en batería. La ventilación es mediante ventanas cenitales que se abren hacia el exterior del invernadero.

### Ventajas

- Se trata de un tipo de invernadero barato y sencillo.
- Reduce considerablemente el problema de la condensación y el goteo del agua en los cultivos debido a la cubierta curva.
- Estructuras con pocos obstáculos.
- Buena ventilación.
- Buena estanqueidad a la lluvia y al viento.
- 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.

### Desventajas

- No aprovecha el agua de lluvia.
- Relativamente pequeño, volumen de aire retenido (escasa inercia térmica) pudiendo ocurrir el fenómeno de inversión térmica.
- Solamente recomendado en cultivos de bajo a mediano porte (lechuga, flores, frutilla, etc.)



**Figura 3.2.8. Invernadero túnel.**

*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. En México algunos agroparques ya cuentan con estos invernaderos con alta tecnología. El techo de este invernadero 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 metros. Desde los canales hasta la cumbrera hay un solo panel de vidrio de una longitud de 1.65 metros y anchura que varía desde 0.75 metros hasta 1.6 metros. La separación entre columnas en la dirección paralela a las canales es de 3 metros. En sentido transversal están separadas 3.2 metros si hay una línea de columnas debajo de cada canal, o 6.4 metros si se construye algún tipo de viga en celosía.

#### Ventajas

- Buena estanqueidad, lo que facilita una mejor climatización de los invernaderos.

#### Inconvenientes

- La abundancia de elementos estructurales implica una menor transmisión de luz, tiene un elevado costo y las naves son muy pequeñas debido a la complejidad de su estructura.

### 3.3 Métodos de cultivo hidropónico dentro de un invernadero.

Hidroponía es una palabra derivada de dos palabras griegas: **hydro (agua)** y **ponos (trabajo)**, por lo que etimológicamente significa “**trabajo en agua**”. Sin embargo, actualmente se define como la técnica del cultivo sin suelo, donde las plantas se riegan con una mezcla de elementos nutritivos disueltos en agua (solución nutritiva) y en la cual el suelo como medio de cultivo se sustituye por ciertos sustratos inertes y estériles, o en algunos casos por la misma solución nutritiva.

Los métodos de cultivo más utilizados son:

Nutrient Film Technique (NFT).

El sistema de NFT (Nutrient Film Technique) "la técnica de la película de nutriente", es el sistema hidropónico recirculante más popular para la producción de cultivos en el mundo. Fue desarrollado en la década de los 60 por el Dr. Allan Cooper, en Inglaterra y desde esa época, este sistema está destinado principalmente a la producción de hortalizas, especialmente especies de hoja (Lechuga, acelga, entre otras), a gran y mediana escala con alta calidad de producción en invernaderos.

Por medio de una bomba se proporciona la solución nutritiva a las plantas a través de un tubo en el que se colocan varios recipientes.

Ventajas:

- Ahorro significativo en solución nutritiva y en agua.
- Acelera y facilita el tiempo de cosecha.
- Aprovechamiento de espacio, ya que se puede cultivar en niveles.
- La instalación de un sistema NFT resulta más sencilla (menor número de bombas para el riego de la solución nutritiva, la obstrucción de los goteros, etc.).

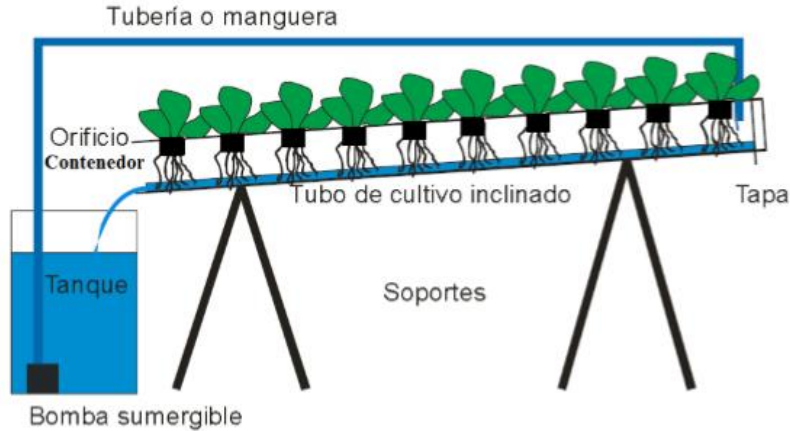
Desventajas:



- Requiere de un cuidado adecuado en el estado de la solución nutritiva, con el fin de que brinde buenos resultados.
- Los costos iniciales son mayores que con otros sistemas.

El sistema se basa principalmente en la reducción de espacio y comprende una serie de diseños, en donde el principio básico es la circulación continua o intermitente de una fina capa de solución nutritiva a través de las raíces, que pasa por una serie de canales que pueden ser de PVC, polietileno y poliuretano con una forma rectangular, escalonada, en zigzag o vertical, llamados canales de cultivo. Figura 3.3.25 En cada canal hay aberturas donde se colocan las plantas, éstas, pueden estar dentro de canastillas especiales con un medio de sostén (Tezontle, Fibra de coco, Foamy agrícola), o en pequeños vasos, estos canales están apoyados sobre mesas o caballetes que pueden tener una ligera pendiente o desnivel (0.5-1%) que facilita la circulación de la solución nutritiva, dependiendo del diseño del sistema.

La solución es recolectada y almacenada en un recipiente ya sea cubeta o un tanque (esto depende de los litros de solución nutritiva) a través de una bomba que permite la circulación de la solución nutritiva por los canales de cultivo. Esta recirculación mantiene a las raíces en contacto permanente con la solución nutritiva, favoreciendo la oxigenación de las raíces y un suministro adecuado de nutrientes minerales para el desarrollo de las plantas. Como los nutrientes se encuentran fácilmente disponibles para las plantas, el gasto de energía es mínimo, de esta manera la planta gasta la energía en otros procesos metabólicos.



**Figura 3.3.1 New Growing System (NGS).**

Una modificación del sistema NFT, que mejora la aireación del sistema radicular es llamada NGS (New Growing System (**Nuevo Sistema de Crecimiento**)), en el que el movimiento del agua es continuo.

El sistema NGS, es un método de cultivo, "hidropónico recirculante sin sustrato" especialmente indicado para cultivos hortícolas.

#### Características

En donde las raíces se desarrollan en una solución nutritiva circulante en circuito cerrado, el sistema aprovecha el 100% de agua y la solución nutritiva, discurre por el interior de un conjunto de láminas de poliestileno superpuestas en forma de V de tal manera que la solución nutritiva recorra un tramo más o menos largo y cae a la lámina siguiente a través de agujeros dispuestos en su parte inferior.



### **Figura 3.3.2 Invernadero Vertical**

La aeroponía, Figura 3.3.27, es una técnica que consiste en cultivar diferentes plantas en un entorno con alta humedad, un ejemplo de esto es el sistema en torre el cual es una estructura cerrada o semi-cerrada donde las plantas se sostienen en un mecanismo cilíndrico que puede ir o no sobre un contenedor con solución nutritiva, la cual es suministrada por medio de un sistema de riego por aspersión, nebulización o goteo, por lo que las raíces se encuentran hidratadas, en contacto con el aire y los nutrientes todo el tiempo.

Semillas.

En todo cultivo es imprescindible tener en cuenta la calidad de la semilla para el éxito del mismo. La semilla es el material de partida para la producción y es condición indispensable que tenga una buena respuesta bajo las condiciones de siembra y que produzca una plántula vigorosa a los fines de alcanzar el máximo rendimiento.

Desde un punto de vista sustentable, es imposible obtener una buena cosecha si no se parte de una semilla de calidad, ya que un cultivo puede resultar de una calidad inferior a la semilla sembrada, pero nunca mejor que ella. Si bien a través de prácticas post cosecha, como el secado, acondicionamiento y limpieza de semillas, es posible mejorar

la calidad de la semilla cosechada, siempre es necesario evaluar la relación costo beneficio. Con la semilla se inicia el proyecto con el objetivo de obtener un producto sano y saludable.

Algunas hortalizas se propagan a partir de esquejes o raíces (como es el caso de la fresa y de la papa). La mayoría de las hortalizas se originan de semillas, por lo que debemos de disponer *de semillas de alta calidad*.

Para que el proceso de germinado se lleve a cabo con éxito, es necesario que exista humedad, oxígeno y una temperatura adecuada, además de utilizar el sustrato correcto. Por ejemplo, utilizar; perlita, vermiculita o tezontle, con el fin de que retenga la humedad suficiente y por la porosidad haya una excelente adecuada de oxígeno.

Para la humedad, el agua, es fundamental para que la semilla se rehidrate y exista un medio acuoso donde los procesos metabólicos puedan llevarse a cabo. Además de realizar previamente un remojo de por lo menos 12 horas, de las semillas para acelerar el tiempo de germinación.

No olvidemos que en la germinación se comprende un intercambio de gases, la semilla libera bióxido de carbono e ingresa oxígeno, y que las plantas como seres vivos tienen los mismos requerimientos que nosotros para vivir. Por lo que, para lograr una buena circulación de oxígeno se deben utilizar sustratos muy porosos como la vermiculita.

Otro punto muy importante en el proceso de germinación es el de la temperatura, ya que para cada clase de semillas, existe un *temperatura mínima*, que por debajo de ésta los procesos de germinación no se puede detectar de manera visual en un periodo razonable de tiempo y una *temperatura máxima*, que por encima de ésta los daños a la semilla son irreversibles. Existiendo una temperatura óptima en la cual se da el porcentaje máximo de germinación en un mínimo de tiempo.

En mayoría de las plantas cultivadas se ha visto que no requieren luz para germinar, pues lo hacen de igual manera en la luz que en la oscuridad. Es hasta que aparecen las

primeras hojas, que es indispensable la luz solar. Por último es recomendable no tener tus plantas con poca luz después de que observes sus primeras hojas.

### **3.4 Análisis de fortalezas y debilidades de invernaderos.**

A pesar de que la implementación de invernaderos representa amplias ventajas sobre la producción a campo abierto, también es cierto que tiene sus inconvenientes, pues no son libres de provocar algún tipo de impacto en el ambiente. Es por ello que se necesita conocer ambos lados de la moneda.

Un invernadero está formado por una estructura metálica o de plástico cubierta por materiales translúcidos para conseguir la máxima luminosidad en el interior. Dentro de este invernadero obtendremos unas condiciones artificiales (microclima) que genera a las plantas una mayor productividad con un mínimo costo y en menos tiempo. Resguarda a las plantas o cultivos que están en su interior de daños ambientales como heladas, fuertes vientos, granizo, plagas de insectos, etc.

Como en todo, no existe riesgo cero, ni impacto cero, en los invernaderos, existe una serie de ventajas y desventajas que se deben tener presentes al tomar la decisión de construir un invernadero o seguir cultivando a campo abierto, ya sea para aumentar la productividad de una empresa establecida o al iniciar una nueva.

En cuanto a las ventajas que presenta el crecimiento de plantas cultivadas bajo invernaderos, respecto al cultivo de las mismas a campo abierto, a continuación se mencionan algunas de las más relevantes:

#### *Intensificación de la producción.*

Los invernaderos se consideran elementos de la agricultura intensiva por varias razones, en primer lugar debido a que es posible establecer las condiciones para el buen desarrollo de las plantas, porque existe cierto aislamiento con el exterior; también porque se pueden colocar más plantas por unidad de superficie que en campo abierto; y

el último aspecto, también de relevancia, es la posibilidad de utilizar instalaciones de control climático, que mejoran las condiciones del cultivo hasta un punto óptimo.

#### *Aumento de los rendimientos.*

Se ha comprobado tras mucho tiempo de estudio que los rendimientos por unidad de superficie de un cultivo se ven aumentados de 2 a 3 veces con el uso de invernaderos y si se utiliza hidroponía los rendimientos pueden ser varias veces los obtenidos a la intemperie, pudiendo llegar a ser 10 veces superior si se invierte el cuidado necesario.

#### *Menor riesgo de producción.*

Si el cambio climático es natural o inducido por el hombre no es caso a tratar aquí, pero si hay que reconocer que afecta a todo por igual, incluyendo la producción de cultivos; y es que al estar los cultivos protegidos por estructuras como lo son los invernaderos minimiza el daño que estos puedan sufrir debido a la aleatoriedad de los fenómenos naturales, que en campo abierto pueden llegar a representar pérdidas totales.

#### *Uso más eficiente de insumos.*

Con técnicas como la fertilización, irrigación y la hidroponía es posible brindarle a las plantas solo los elementos que necesitan durante cada etapa de su desarrollo, por lo que solo se gastan los fertilizantes necesarios minimizando el desperdicio, que al final significa pérdida de dinero. Lo mismo ocurre con el agua, ya que las instalaciones modernas de los sistemas de riego permiten su uso más eficiente, en este sentido hago referencia al riego localizado o de precisión (por goteo, microaspersión y nebulización).

#### *Mayor control de plagas, malezas y enfermedades.*

Para que un invernadero facilite el control de plagas, enfermedades y malezas debe haber sido correctamente diseñado y construido, siendo en este sentido donde muchos de ellos fallan pues la hermeticidad del mismo es la clave de un control exitoso. Además, el cultivo en invernaderos facilita la programación de las aplicaciones, siendo que es factible controlar quien tiene acceso al cultivo.

### *Posibilidad de cultivar todo el año.*

Debido a que dentro del invernadero se tiene relativa independencia del medio exterior es posible tener producción en cualquier época del año, sin importar si el invierno es muy frío o el verano propicia altas temperaturas, pues para el primer caso se puede implementar calefacción y para el segundo ventilación y enfriamiento. De esta manera al utilizar invernaderos es factible producir sin interrupciones debidas a las condiciones climáticas.

### *Obtención de productos fuera de temporada.*

Como consecuencia de poder producir todo el año también se tiene la ventaja de obtener productos fuera de temporada, con lo que es posible encontrar mejores mercados de comercialización por la falta de competencia y porque los mercados no se encuentran saturados como ocurre en la temporada de mayor producción. Para esto es necesario conocer los tiempos que se manejan en los cultivos a campo abierto de manera que se comercialicen los productos evitando la alta competencia.

### *Obtención de productos en regiones con condiciones restrictivas.*

Las condiciones medioambientales no siempre son las adecuadas para el establecimiento de cultivos o restringen en gran medida las especies que se pueden cultivar a solo aquellas adaptadas a las condiciones del lugar. De esta manera con la ayuda de invernaderos es factible aprovechar las extensiones de tierra en donde la producción es muy difícil pues el agua se puede aprovechar al máximo y solo se da a las plantas los elementos necesarios para su desarrollo. Dentro de un invernadero las plantas gozan cierto aislamiento del exterior.

### *Obtención de productos de alta calidad.*

Dentro de un invernadero las plantas no están expuestas al desgaste físico producido por elementos ambientales como lluvias y vientos fuertes, granizadas o alta radiación solar, por lo cual la calidad de los productos obtenidos es mayor, demostrada tanto en su presentación al consumidor final como en su composición interna. Esto permite obtener

mayores ganancias al momento de vender nuestros productos, o encontrar mejores mercados pudiendo llegar a exportar si se obtiene una alta calidad.

*Mayor comodidad y seguridad.*

Dentro de un invernadero no solo las plantas están protegidas, pues los trabajadores también encuentran cobijo de las inclemencias del tiempo, y es que a campo abierto es más factible sufrir por la radiación solar que provoca altas temperaturas, o en cualquier momento puede comenzar a llover y granizar. Dentro del invernadero se pueden cumplir las actividades de cultivo programadas con anterioridad sin que el tiempo climático sea un obstáculo para dejarlas para otro día.

*Condiciones ideales para investigación.*

Los invernaderos, principalmente aquellos que cuentan con control automático de variables ambientales, permiten estudiar el comportamiento de los elementos de la producción sin que estos se vean sometidos a la influencia distorsionante de los factores climáticos. Así es posible estudiar el potencial productivo, de acuerdo con la información genética, de las especies cultivadas y determinar los factores óptimos para su desarrollo. Este aspecto cobra relevancia en las escuelas de agronomía e institutos dedicados a llevar a cabo investigaciones sobre el desarrollo y comportamiento de las plantas y cultivos agrícolas.

A continuación, se presentan algunas desventajas en la construcción y manejo de invernaderos, las cuales se deben de tener presentes y así estar preparados para enfrentar o minimizar los efectos negativos.

Sin embargo, es fácil dejarse llevar por los puntos positivos que estas estructuras nos ofrecen y emprender un proyecto sin siquiera haberse detenido a analizar las cuestiones negativas, que también existen. Por esta razón a continuación haremos un análisis de los principales inconvenientes a los que se puede uno enfrentar cuando se decide a comenzar una producción en la que se proyecte la construcción de invernaderos:

*Inversión inicial elevada.*



Los invernaderos son estructuras que tienen un costo de construcción relativamente alto, por ello la inversión inicial necesaria es elevada y el principal objetivo del productor debe ser recuperar ese gasto, razón por la cual solo es recomendable utilizarlos para producir cultivos de alto valor económico, como algunas hortalizas y ornamentales, pues económicamente no se justifican para cultivos básicos o con poco valor de comercialización. La inversión por realizar para construir invernaderos es relativamente elevada.

### *Desconocimiento de las estructuras*

Un invernadero debe ser diseñado y construido en función de varios aspectos, entre los que destacan las condiciones del medio ambiente de la zona y los requerimientos climáticos de los cultivos que se quieren producir. De esta manera el hecho de no identificar el tipo de estructura que requiere el proyecto implica más gastos a futuro para reacondicionar los espacios.

### *Altos costos de producción*

Los gastos de operación en un invernadero son mayores que en campo abierto, lo cual es lógico porque se tienen gastos muchos mayores por el hecho de brindarle al cultivo las condiciones idóneas para su desarrollo. Si en el exterior las temperaturas son bajas el gasto en electricidad y/o gas por concepto de calefacción elevará el costo de producción, de igual manera ocurrirá si se tienen altas temperaturas y se quiere enfriar el ambiente; solo por mencionar algunos ejemplos.

### *Alto nivel de capacitación*

Dentro de los invernaderos los trabajadores son completamente responsables de las plantas, porque el hecho de poder controlar todas las variables del ambiente significa que cualquier problema presentado hace responsable al hombre inmediatamente. Por esta razón los trabajadores deben ser capacitados constantemente para que puedan estar preparados para cualquier inconveniente que se presente. Esta capacitación implica mayores costos de producción.

### *Condiciones óptimas para el desarrollo de patógenos*

Uno de los objetivos de los invernaderos es mantener a las plantas en las condiciones óptimas para su desarrollo, esto implica por ende que los patógenos disfrutarán de las mismas ventajas. Es cierto que estas estructuras permiten aislar los cultivos de las plagas y enfermedades encontradas en el exterior, pero si no se implementan las medidas fitosanitarias adecuadas y estos se logran introducir lo más probable es que su desarrollo se vea acelerado y sus efectos sean inmediatos representando pérdidas en la producción.

### *Dependencia del mercado*

Y, por último, pero no por ello menos importante, la comercialización de los cultivos obtenidos en invernaderos requiere tener un mercado seguro con canales de comercialización previamente verificados, pues de nada sirve obtener rendimientos elevados si al final los productos serán vendidos a precios bajos o al mismo costo de los productos de campo abierto. Recordemos que los productos hortícolas como las flores y hortalizas son altamente perecederos, y que mientras más tiempo se mantengan en almacenamiento su precio de venta será menor debido a la disminución de la calidad.

## **3.5 Tipos de hortalizas cultivadas dentro de invernaderos**

El término hortaliza incluye a las verduras y legumbres verdes como habas y guisantes. Las hortalizas excluyen a las frutas y cereales. Debido a las grandes ventajas que presenta el cultivo protegido o dentro de invernadero, los cultivos hortalizas se ha extendido y no es raro encontrar prácticamente cualquier hortaliza en cualquier época del año, cosa que hace unas décadas resultaba algo difícil.

La taxonomía es una ciencia que se encarga de agrupar ordenadamente a los organismos vivos, y como tal la forma más elemental de agrupar a las hortalizas es por

su clasificación taxonómica. La siguiente es una lista de las hortalizas cultivadas dentro de invernadero más comunes:

### *Liliáceas*

*Espárrago*. Es el brote de la planta esparraguera, se cosecha inmaduro, antes de ramificarse y endurecerse. Según el manejo durante el cultivo se obtienen dos tipos, blancos y verdes. Se trata de una de las especies más sensibles a las oscilaciones térmicas, que se manifiesta por la inercia de sus movimientos vegetativos. La temperatura de la atmósfera para el crecimiento de turiones está comprendida entre 11 y 13°C de media mensual. El óptimo de desarrollo vegetativo está comprendido entre 18 y 25°C. Por debajo de 15°C por el día y 10°C por la noche paraliza su desarrollo; por encima de 40°C encuentra dificultades para desarrollarse. Para su cultivo en hidroponía se requiere de contenedores de 30 cm de profundidad o más. La humedad relativa óptima está comprendida entre el 60 y 70%.

*Ajo*. Es un cultivo muy antiguo aprovechado por el bulbo que se forma en la base de sus hojas. Es muypreciado como condimento por el fuerte y característico sabor que presenta. Posee propiedades medicinales debido a las sustancias azufradas que contiene. Para conseguir un desarrollo vegetativo vigoroso es necesario que las temperaturas nocturnas permanezcan por debajo de los 18°C. En pleno desarrollo vegetativo tolera altas temperaturas (por encima de 40°C) siempre que tenga suficiente humedad en el sustrato.

*Cebolla*. Es el bulbo subterráneo y comestible que crece en la planta del mismo nombre. Es una hortaliza de origen asiático y actualmente existe una amplia gama de variedades, que pueden clasificarse en función del color del bulbo, forma, tamaño, usos y origen. Su óptima temperatura oscila entre 15 y 20°C, en la germinación hay que buscar temperaturas de 20 a 25°C.

*Puerro*. Consta de tres partes bien diferenciadas, hojas largas y lanceoladas, bulbo alargado blanco y brillante y numerosas raíces pequeñas que van unidas a la base del bulbo. Es muypreciado como condimento por el sabor que da a los platos. En conjunto el puerro tiene aproximadamente unos 50 cm de altura, con 3 a 5 cm en grosor. Requiere una temperatura óptima de desarrollo vegetativo de unos 13 a 24°C.

### *Compuestas*

*Alcachofa*. Es una planta vivaz, extensamente cultivada por sus granulares inflorescencias ricas en escamas carnosas de color verde o morado. Se consume de muy diversas formas y su sabor es muypreciado. El rango de temperaturas adecuado para una buena cosecha de alcachofas se sitúa entre 7-29° C. Requiere de una humedad relativa sobre el 60%.

*Escarola*. La escarola es una planta que se aprovecha por sus hojas, que pueden ser rizadas o lisas, y de colores entre verde y amarillo. Se consume cruda en ensalada o formando parte en algunos guisos. Al igual que las coles, la escarola soporta mejor las temperaturas bajas que las altas. En el cultivo se requiere entre 14-18°C durante el día y 5-8°C por la noche, durante la fase de crecimiento. La humedad del sustrato debe mantenerse siempre cerca del 60%.

*Lechuga*. Hortaliza de extenso consumo, de las que se cultivan numerosas variedades. El cultivo de la lechuga en invernadero ha sido muy difundido en los países del norte de Europa, donde Holanda sobresale. La temperatura óptima de germinación oscila entre 18-20°C. Durante la fase de crecimiento del cultivo se requieren temperaturas entre 14-18°C por el día y 5-8°C por la noche. La humedad relativa conveniente para la lechuga es del 60 al 80%, aunque en determinados momentos agradece menos del 60%.

*Achicoria*. Es una planta vivaz de notable interés hortícola. Las propiedades tónicas de sus hojas y raíces, de sabor algo amargo, la convierten en una hortaliza buscada para la industria culinaria. Numerosos son las variedades que se cultivan. Estas pueden agruparse en tres grupos: Achicorias de hojas, Achicorias de raíz, Achicorias de hojas y raíz. El intervalo de temperaturas óptimas para la germinación es de 25-30°C. La

temperatura mínima de crecimiento de las plantas es de 8°C, desarrollándose de forma óptima entre 16-20°C. La humedad relativa se mantiene alta, hasta el 95%, a no ser que surjan enfermedades.

### *Quenopodiáceas*

*Espinaca.* Posee hojas verdes y dispuestas en roseta, se consume tanto cruda como cocinada. Las hojas tienen forma ovalada y aspecto rugoso, pudiendo ser enteras o dentadas. El intervalo óptimo para el cultivo de la espinaca oscila entre los 18-20°C. La humedad relativa se proporciona en un rango del 40 al 60%.

*Acelga.* Es una hortaliza con grandes hojas verdes y carnosas pencas blancas, su consumo normalmente es cocida y aderezada. Su sabor es semejante al de las espinacas pero algo más suave. En el desarrollo vegetativo las temperaturas están comprendidas entre un mínimo de 6°C y un máximo de 27 a 33° C, con un medio óptimo entre 15 y 25° C. La humedad relativa está comprendida entre el 60 y 90% en cultivos en invernadero.

*Remolacha.* La remolacha o betabel, tiene la raíz generalmente redonda, más o menos achatada, internamente de color rojo con destellos violáceos, con zonas concéntricas más claras, a veces blanquecinas. También existen variedades de raíz larga, pero son menos apreciadas, La raíz se usa cocida o preparada como ensalada.

### *Brasicáceas*

*Brócoli.* Es una hortaliza de la familia de las coles. Su consumo aumenta constantemente. Las variedades presentan a veces diferencias sustanciales por el color de su inflorescencia: verdoso o amarillo o paja o blanco marfil, y por su forma. Para un desarrollo normal de la planta es necesario que las temperaturas durante la fase de crecimiento oscilen entre 20 y 24°C; para poder iniciar la fase de inducción floral necesita entre 10 y 15°C durante varias horas del día. La humedad relativa óptima oscila entre 60 y 75%.

*Col blanca.* Las coles-repollo son muy apreciadas en la cocina tradicional de muchos países. Actualmente se han extendido por todo el mundo y se consumen de múltiples maneras.

*Col china.* Las coles chinas son hortalizas que comienzan poco a poco a difundirse por todos los continentes, aunque es un cultivo muy conocido y consumido en Asia. Se pueden consumir de diversas formas, tanto crudas como cocidas. El óptimo de desarrollo de la col china está en 18-20°C. Y el óptimo para la formación de cogollos está entre los 15-16°C..

*Col de Bruselas.* Son muy apreciadas por sus propiedades culinarias y por su particular sabor, similar al resto de las coles.

*Col de Milán.* Hortaliza que coloquialmente recibe el nombre de repollo de hoja rizada. Las hojas de esta hortaliza son de color verde claro a oscuro. La hoja se caracteriza por una superficie irregular.

*Col Lombarda.* También llamada col roja o morada, es una col comestible de sabor ligeramente dulce y muy apreciado, que se caracteriza por el atractivo color de sus hojas.

*Coliflor.* Al igual que el brócoli, la coliflor es una inflorescencia redondeada, carnosa y de gran tamaño. Existen diferentes variedades de coliflor que pueden clasificarse en función de diferentes criterios. Si se refiere al color, se distingue entre blancas, verdes y moradas. La temperatura óptima oscila entre 14-20°C.

*Colinabo.* El colinabo es también llamado nabo de Suecia. Es una raíz engrosada parecida al nabo. Es grande y de pulpa amarillenta.

*Nabo.* El nabo es la raíz de la planta del mismo nombre. Las raíces de las distintas variedades pueden presentar tamaños, formas y colores variables. Del nabo se consume la raíz, gruesa y carnosa. Requiere temperaturas inferiores a los 10°C para germinar.

*Rábano.* El rábano es una planta cultivada por sus raíces más o menos gruesas y carnosas, que se comen crudas, como ensalada y como guarnición. Existen variedades de formas esféricas, cónicas, cilíndricas y ovaladas. Está recubierto por una corteza en la que también hay bastante diversidad; puede ser roja, blanca, morada, negra o inclusive roja y blanca. La temperatura óptima se encuentra entre 18-22°C.

### *Cucurbitáceas*

*Pepino.* Planta de tallo trepador. El fruto es cilíndrico, alargado, de color cuando está maduro, liso o provisto de pequeñas protuberancias terminadas en una papila rugosa de color obscuro, que cae fácilmente; pulpa blanca. Los frutos se consumen cuando todavía no están maduros, en estado natural o conservados en vinagre. Las temperaturas óptimas serán de 18-20°C y una humedad relativa del 70-80%.

*Calabaza.* Diversas son las especies cultivadas. Estas se distinguen por algunos caracteres botánicos, entre los cuales cabe citar la forma y el tamaño del fruto y la semilla. En botánica las calabazas se subdividen en cuatro grupos: *Cucurbita, máxima-Cucurbita, moscata-Cucurbita* y *pepo-Cucurbita melanosperma*. En la práctica se distinguen en Calabacines y Calabazas. La calabaza soporta temperaturas más elevadas que el pepino, la temperatura óptima para el crecimiento vegetativo estará entre 25-30°C. La humedad relativa oscila entre 65% y 80%.

### *Fabáceas*

*Judía.* La judía, habichuela, alubia o ejote, se aprovecha por sus semillas secas. Las variedades de judía son numerosísimas, se dividen en grupos, teniendo en cuenta si son trepadoras o enanas, si se comen en su totalidad o si han de ser desgranadas (secas o tiernas), si son de vaina verde o de otro color. Requieren una temperatura óptima durante el día de 21-28°C y una temperatura óptima durante la noche de 16-18°C. La humedad relativa óptima del aire en el invernadero durante el cultivo es del 60% al 65%.

*Haba.* Se cultivan ampliamente a causa de sus semillas ricas en sustancias nutritivas, de un sabor dulce característico, que se consumen en estado fresco, cuando todavía son muy tiernas. Las temperaturas óptimas serán de 18-20°C. Requiere una humedad relativa del 40-45%.

*Chícharos.* Se trata de una de las plantas comestibles más antiguas. Se presenta en una vaina de color verde (claro u oscuro, según la variedad), más o menos comprimida, en muchos casos cilíndrica y puntiaguda en sus dos extremos. Las vainas suelen tener de 8 a 10 cm de longitud, son lisas y brillantes. Éstas protegen en su interior semillas las cuales son comestibles. Las variedades de esta hortaliza se dividen en grupos: enanos, semienanos o trepadores. Tiene su óptimo de crecimiento con temperaturas comprendidas entre 16 y 20°C. Es necesaria una humedad relativa de 80%.

#### *Umbelíferas*

*Zanahoria.* Es una de las hortalizas más cultivadas en el mundo. Su consumo se ha extendido ampliamente en el mundo. La parte consumida de la zanahoria es la raíz, de la que existen múltiples formas y sabores. Un óptimo entorno oscila entre los 16-18°C.

*Perejil.* Puede ser de hojas lisas o rizadas. El de hojas lisas se utiliza más para dar sabor y las de hojas rezadas para decorar diversos platos.

*Apio.* Es una variedad de hortaliza con peciolo largos y carnosos que se conocen con el nombre de pencas. Éstas pueden consumirse crudas en ensaladas o solas, cocidas y como condimentos en sopas y estofados. La temperatura ideal está en torno a 16-20°C.

*Apio Nabo.* Es una gran raíz generalmente muy gruesa y esférica de pequeñas raíces secundarias que suelen ser retiradas para su comercialización.

#### *Solanáceas*

*Berenjena.* Es un fruto de forma variable que puede ir de esférica a ovoide y oblonga. El color es morado, blanco e inclusive negro; el interior es firme y suave siempre de color blanco y contiene numerosas semillas comestibles del mismo color. Soporta bien las



temperaturas elevadas, siempre que la humedad sea adecuada, llegando a tolerar hasta 40-45°C. La temperatura media debe estar comprendida entre 23-25°C. La humedad relativa óptima oscila entre el 50% y el 65%.

*Pimiento.* Hortaliza de forma, tamaño y color variable. Su sabor puede ser dulce o picante, se puede consumir fresco o en conserva. La temperatura óptima para su cultivo es de 25-30°C con una humedad relativa del 70-75%.

*Tomate.* Es la hortaliza más extendida en todo el mundo. Se cultiva en todas las latitudes siendo los principales productores China y Estados Unidos. Se consume de múltiples maneras, tanto crudas como procesadas para la industria. Es menos exigente en temperatura que la berenjena y el pimiento. La temperatura óptima de desarrollo oscila entre 20 y 30°C durante el día y entre 1 y 17°C durante la noche. La humedad relativa óptima oscila entre un 60% y un 80%.

*Papa.* Es de igual manera que el tomate, uno de los cultivos más extendidos en todo el mundo. Su consumo puede ser dedicado a la alimentación humana en fresco, para alimento del ganado y como materia prima en la industria agroalimentaria. Gracias a la gran cantidad de países que se dedican al su cultivo y la gran variedad de papas existentes, su disponibilidad en el mercado está asegurada en cualquier época del año. Las temperaturas más favorables para su cultivo las que están en torno a 13 y 18°C.

## **Capítulo IV Análisis y planteamiento del problema**

### **4.1 Tipo de cultivo**

Cuando hablamos del cultivo de hortalizas en invernaderos verticales, se vuelve inevitable mencionar el uso de los métodos de cultivo sin suelo; la hidroponía pasa a ser una solución al inconveniente que se tendría al cultivar de manera tradicional en estructuras verticales. De esta manera se hace posible el cultivar en invernaderos apilados unos encima de otros.

Se ha tratado anteriormente el tema del cultivo sin suelo, que en su idea más básica, consta de sustituir el suelo agrícola, por soluciones acuosas con nutrientes químicos disueltos y sustratos estériles como soporte de la raíz de las plantas. En teoría todo tipo de planta podría desarrollarse de manera adecuada con estas soluciones nutritivas, pero también es cierto que no todas las plantas, en nuestro caso específico, hortalizas, serían adecuadas para su cultivo en invernaderos verticales, por lo que la elección de un grupo específico de hortalizas para este propósito se vuelve fundamental.

Uno de los principales factores que delimitan el tipo de hortalizas que pueden cultivarse en un invernadero vertical es que, al tener cultivos apilados unos encima de otros, la luz solar no puede aprovecharse en su totalidad, lo que implica que es necesario el uso de luz artificial o suplementaria, para completar de ese modo la fotosíntesis y que la planta pueda cumplir su objetivo biológico. El mayor aprovechamiento de esta luz artificial se da mientras más cerca esté la hortaliza de la fuente de luz, al estar más lejos se requerirá de mayor potencia en la fuente de luz artificial, que puede traducirse en calor el cual a su vez puede afectar de manera crítica a la planta y además elevar los costos de producción, por lo que no es conveniente que la distancia entre cultivos sea excesiva. El tener una menor distancia entre los cultivos también favorecerá al incremento en la

productividad, ya que podremos tener una mayor cantidad de plantas en cultivo con cierto grupo de hortalizas que con otras. Un ejemplo de ello es el cultivo del tomate, encontramos alturas de plantas que van desde los 90cm a 1.5m en algunas variedades, en otras van desde 1.8m a los 2.1m, lo que implicaría que el aprovechamiento de la fuente de luz artificial no sería óptimo y al tener tanta separación entre los cultivos no tendríamos la misma cantidad de cultivo cosechado que con otro grupo de hortalizas que tengan un crecimiento en altura menor.



**Figura 4.1.1. Iluminación artificial en un invernadero**

Es así como el espacio entre cultivos delimita en gran medida el tipo de hortalizas a utilizar, por lo que quedarían fuera de nuestra elección, plantas con crecimiento mayor a los 30cm como el tomate, el pepino y la berenjena, que además de la altura que pueden alcanzar, dentro de su cultivo se requieren técnicas de polinización, que van desde la polinización manual hasta procesos más sofisticados que implican el uso de abejorros para la obtención de sus respectivos frutos, sin mencionar que requieren de otras técnicas tales como el tutorado que tiene como objetivo que los frutos no toquen el suelo para mejorar la calidad de los mismos, así como incrementar la ventilación. De igual manera, quedan fuera las hortalizas que puedan generar bulbos, ya que en algunos casos como el puerro puede alcanzar fácilmente 50 [cm] de altura en sus hojas, sin contar con la profundidad requerida para la buena formación del bulbo y las raíces. Hortalizas como la papa, zanahoria, nabo y remolacha quedan fuera de nuestra elección.



**Figura 4.1.2. Tutoreo en plantas de tomate**

Tomando en cuenta las exclusiones anteriores, existe un grupo de hortalizas que dan solución a los problemas planteados sobre el cultivo en vertical, ya que entre las características que poseen estas plantas resalta su reducida altura, no más de 20 [cm], la facilidad de su cultivo y rapidez en su crecimiento. Son hortalizas cuyas necesidades de cultivo como son temperatura y humedad relativa son parecidas y que en el pasado ya han demostrado tener una buena compatibilidad con el cultivo hidropónico. Este grupo engloba a la acelga, escarola, espinaca, lechuga y perejil principalmente las cuales en conjunto son llamadas hortalizas de hoja verde.

Es debido a las características que este grupo de hortalizas posee, que serán a las cuales esté enfocado el diseño del invernadero vertical como los cultivos a producir.

#### **4.2 Requerimientos generales del microprocesador.**

La elección del microcontrolador adecuado para un producto, diseño experimental o desarrollo, puede ser una tarea desalentadora y hasta viciada si no se inicia con conceptos claros y elementales, desde que lanzamos el primer trazo en una hoja de diseño. No sólo hay una mínima cantidad de características técnicas a tener en cuenta, también hay cuestiones muy diversas y que no a todos pesa por igual. No será lo mismo un aficionado que se lance a construir una pequeña aplicación llamativa con LEDs y

servomotores (que quizás nunca termine), respecto a una gran empresa de manufactura, donde los costos y los tiempos de espera, que puedan paralizar un proyecto de millones de unidades, se incrementen una semana. A nivel de aficionado, podemos estar acostumbrados a echar mano del primer microcontrolador que tengamos disponible a la mano o de aquel que se venda en la tienda más cercana a nuestro hogar. Sin embargo, en un millón de unidades (juguetes con luces, por ejemplo) ahorrar un peso puede significar una gran ganancia para la empresa.

Es decir, sin llegar a la obsesión de la mezquindad absoluta, es bueno aprender a administrar recursos ya que quizás hoy, ése peso “extra” nos sobre en el bolsillo, pero si mañana debemos aprender a administrar enormes producciones en masa, de un día para el otro, puede llegar a ser un camino muy empinado y difícil de sortear. Liberarnos del vicio de aprender a seleccionar materiales en el mercado podemos hacerlo desde el principio, durante el aprendizaje. Sin caer en pagar más gastos de transportes que de materiales, nuestro producto final hablará por nosotros.

En la última parte de esta introducción debemos reconocer que al inicio de un proyecto hay una gran tentación de saltar y empezar a seleccionar el microcontrolador antes de que los detalles del sistema estén terminados de enumerar y plasmar en un sencillo listado de necesidades, esto es, una selección de acciones que deberá ejecutar nuestro desarrollo. Esta tentación es, por supuesto, una muy mala idea. Antes de administrar cualquier pensamiento orientado a la selección del microcontrolador, los ingenieros encargados del desarrollo del hardware y software deben trabajar los altos niveles del sistema, con diagramas de bloques esquemáticos y diagramas de flujos operativos. Sólo entonces, existirá suficiente información para empezar a hacer una selección racional y prudente del microcontrolador.

- *Hacer una lista de las interfaces de hardware requeridas.*

Esta es una de las primeras y principales enumeraciones a realizar. Utilizando un diagrama genérico de bloques de hardware, puedes crear una lista de todas las interfaces externas que el microcontrolador tendrá que soportar. Hay dos tipos

importantes de interfaces que necesitan ser enumeradas. Las primeras son las interfaces de comunicación. Esto incluye los periféricos, tales como USB, I2C, SPI, UART, CAN, LIN y/o todos aquellos sistemas de comunicación que habitualmente llamamos bus de datos. Se debe de poner especial atención, dentro de esta etapa, si la aplicación requiere conectividad USB o alguna forma de Ethernet. Estas interfaces afectan en gran medida a la cantidad de espacio del programa tendrá que llevar adelante el microcontrolador. Además, aquí entra a jugar un papel fundamental el factor económico.

Es decir, ¿Conviene utilizar un microcontrolador con USB nativo o un FTDI operado por UART? Claro, hoy la capa física del USB o de Ethernet pueden ser habituales y nativas en microcontroladores de bajo costo, sin embargo, trabajando por UART se puede utilizar todo el abanico de soluciones desarrolladas que puede brindar Arduino. Hay que observar un pequeño detalle, un ATMEGA con UART y un IC FTDI pueden resultar más efectivos que un PIC con Ethernet embebido. El otro gran tipo de interfaz es el de las entradas y salidas digitales I/O, ADC, DAC, PWM y los comparadores. Este tipo de interfaz terminará de cerrar el número de pines que serán requeridos por el microcontrolador para la aplicación.

- *Requisitos de potencia del microcontrolador*

En la segunda etapa de organización debemos comenzar a pensar en los requisitos de potencia de procesamiento que necesitará nuestro microcontrolador. Esto equivale a pensar si necesitamos un procesador trabajando a más de 100 [Mhz], o si un 16F628A a 4 [Mhz] será suficiente para la tarea. Al igual que con el hardware, debemos tomar nota de los requisitos que serán importantes. Por ejemplo, ¿alguno de los algoritmos necesitará utilizar matemáticas en con numero flotante? Aquí tendremos que comenzar a plantear los tipos de variables más grandes (mayor cantidad de bytes) que tendremos que manipular. ¿Existen lazos de control de alta frecuencia en sensores (MEMS, ADC, etc.)? Dicho de otro modo, sería estimar los tiempos y la frecuencia en que el microcontrolador ejecutará tareas específicas. La cantidad de potencia de cálculo requerida será uno de los mayores requisitos para determinar la arquitectura y la frecuencia de trabajo del microcontrolador. Como se puede observar, ya tenemos dos

puntos de apoyo muy importantes: Saber cuánta estructura externa deberá manejar con comodidad el Microcontrolador y a qué velocidad deberá hacerlo.

- *Selección de la arquitectura.*

Aquí comienza una de las etapas con mayor carga de interrogantes ¿Puede este proyecto llegar a funcionar con arquitectura de 8 bits? ¿De 16 bits? ¿O necesitaré de un núcleo ARM de 32 bits? Entre la comprensión de la aplicación y el hardware a utilizar (saber que tareas hará el micro, en qué orden y con qué periféricos), sumado a las exigencias de los algoritmos de software requeridos, ya podremos comenzar a delinear una orientación hacia la arquitectura definitiva.

La arquitectura puede parecer un factor sencillo de resolver, sin embargo, siempre alguien deseará agregar algo más.

- *Necesidades de memoria.*

La cantidad de Memoria de Programa (OTP o Flash) y la cantidad de RAM disponible, son dos componentes muy importantes en la selección de un microcontrolador. Hay que asegurar de que no quedarás sin espacio para todo el programa (líneas de código) o en el espacio destinado a manejar las variables y las operaciones matemáticas que el proceso requiera es, sin duda, una la más altas de todas las prioridades de selección. Siempre será mucho más fácil seleccionar un microcontrolador con abundancia en estas características. Llegar al final de un diseño y descubrir que lo que necesitamos sería sólo un 5% más de espacio en Flash o en RAM puede significar una pérdida de tiempos imperdonables. Después de todo, siempre se puede empezar con un dispositivo bien dotado de espacio de memorias y luego pasar a otro más pequeño, dentro de la misma familia de microcontroladores. Además, la mayoría de los compiladores que se encargan de organizar el programa, hasta llevarlo a un archivo ejecutable por el microcontrolador, pueden calcular el espacio necesario a utilizar a medida que vamos incorporando código a la interfaz de desarrollo (IDE). No hay que olvidar dejar espacio para la creatividad de terceros y las próximas versiones mejoradas del mismo equipo. Esto puede ahorrar muchos problemas a futuro y muchos rediseños.

- *Examinar los costos y las limitaciones energéticas*

En este punto, el proceso de selección probablemente ya se tendrá una serie de posibles candidatos. Este es un buen momento para examinar los requisitos de energía y el costo de cada unidad. Respecto a los requerimientos de energía, si nuestro trabajo final se alimentará desde una batería debemos asegurar de utilizar sistemas de ultra-bajo consumo energético. Aquí tenemos otro pilar fundamental en la elección. Como mencionamos al principio, la evaluación de costos es elemental, sin embargo, hay un criterio que no puede ser pasado por alto: "la relevancia de la aplicación en sí misma". La aclaración es la siguiente: no será lo mismo un procesador barato para un juguete, que uno sencillo, pero de alta gama y calidad para un equipo de electro-medicina. Quizás hasta este punto, con un microcontrolador de 50 pesos teníamos resultado el sistema, sin embargo, las altas garantías de seguridad de funcionamiento pueden llevarnos a seleccionar otro de 500 pesos. Es decir, la economía y la calidad de la aplicación deben equilibrar la balanza.

- *IDE, Compiladores y Herramientas de Depuración.*

Esta puede ser una de las etapas de selección que no merece demasiados comentarios. Todos los fabricantes de microcontroladores se esforzarán y brindarán a los usuarios códigos de ejemplos, kit de desarrollos, compiladores de código, herramientas de depuración del mismo y hasta programadores específicos de la marca. Es importante saber que este material estará disponible para la construcción de los prototipos iniciales, de lo contrario, el proceso de desarrollo puede llegar a ser largo, tedioso y costoso.

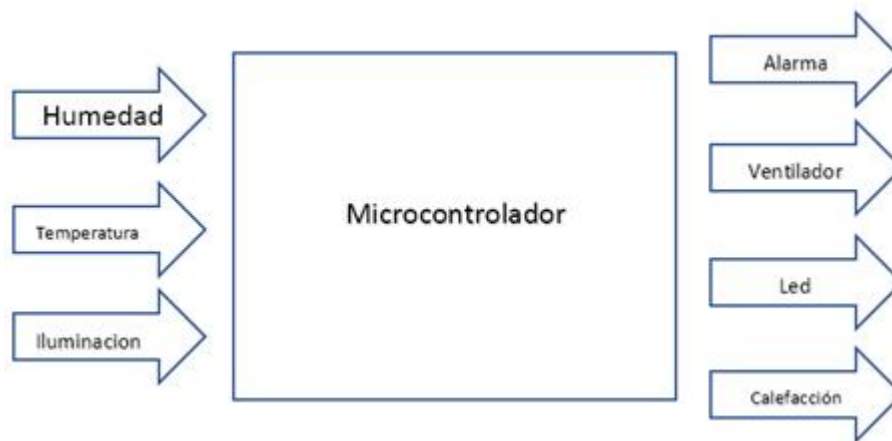
- *Simulación en Ordenador.*

Si bien esta práctica no es aplicable a muchos casos, podemos crear un entorno de trabajo dentro de un Software de Simulación que sea capaz de soportar nuestro microcontrolador y experimentar allí si el comportamiento del dispositivo es el esperado. No siempre esta práctica es aconsejable para aferrarse a un concepto. Esto es, que allí funcione no significa que en la vida real suceda lo mismo, sin embargo, los resultados siempre serán muy aproximados y usar un simulador específico (recomendado por el



fabricante de los microcontroladores) puede ser una herramienta segura y ágil para avanzar durante la fase de desarrollo.

A continuación, se muestra un diagrama de entradas y salidas del microcontrolador, para poder conocer los requerimientos que deberá tener y realizar una selección adecuada a las necesidades del proyecto, por lo que al realizar una aproximación inicial al diseño final.



**Figura 4.2.1 Diagrama de entradas y salidas del microcontrolador**

Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open – source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Está pensado e inspirado en artistas, diseñadores, y estudiantes de computación o robótica y para cualquier interesado en crear objetos o entornos interactivo, o simplemente por hobby. Arduino consta de una placa principal de componentes eléctricos, donde se encuentran conectados los controladores principales que gestionan los demás complementos y circuitos ensamblados en la misma. Además, requiere de un lenguaje de programación para poder ser utilizado y, como su nombre lo dice, programado y configurarlo a nuestra necesidad, por lo que se puede decir que Arduino es una herramienta "completa" en cuanto a las herramientas principales nos referimos, ya que sólo debemos instalar y configurar con el lenguaje de programación de esta placa los componentes eléctricos

que queramos para realizar el proyecto que tenemos en mente, haciéndola una herramienta no sólo de creación, sino también en el ámbito del diseño de sistemas electrónicos-automáticos y, además, fácil de utilizar. Arduino también simplifica el proceso de trabajo con microcontroladores, ya que está fabricada de tal manera que viene “pre ensamblada” y lista con los controladores necesarios para poder operar con ella una vez que la saquemos de su caja, ofreciendo una ventaja muy grande para profesores, estudiantes y aficionados interesados en el desarrollo de tecnologías. Las posibilidades de realizar proyectos basados en esta plataforma tienen como límite la imaginación de quien opera esta herramienta.

Arduino está constituido en el hardware por un microcontrolador principal llamado Atmel AVR de 8 bits (que es programable con un lenguaje de alto nivel), presente en la mayoría de los modelos de Arduino, encargado de realizar los procesos lógicos y matemáticos dentro de la placa, además de controlar y gestionar los recursos de cada uno de los componentes externos conectados a la misma. Consta además de una amplia variedad de sensores eléctricos como cámaras VGA, sensores de sonido, seguidores de línea, botones de control de sensores, e incluso, otras placas de micro controladores (mejor conocidos como Shields), que pueden adaptarse fácilmente gracias a que Arduino cuenta con entradas de pines analógicos y digitales para integrar estos componentes sin necesidad de alterar el diseño original de esta placa. Estos a su vez son controlados junto con el procesador primario por otros componentes de menor jerarquía, pero de igual importancia y prioridad, como el Atmega168, Atmega328, Atmega1280 y el Atmega8, que son lo más utilizados debido a sus bajos precios y gran flexibilidad para construir diversidad de diseños. Además, Arduino cuenta con la ventaja de tener entre sus elementos principales puertos seriales de entrada /salida (input/output), lo que le permite conectarse por medio de un cable USB a una computadora para poder trabajar con ella desde nivel software, ya que es dónde se le darán las “órdenes” que ejecutarán cada uno de los componentes conectados a la placa, e incluso, para operar como un dispositivo más (dependiendo de la configuración que hayamos establecido y para que se quiere utilizar). Además, Arduino para operar necesita de una fuente de alimentación externa, ya que, por desgracia, no cuenta con una propia, por lo que

también se encuentra incorporada una entrada para conectar un cable con entrada similar al USB, donde será conectado a un otro dispositivo que tenga entrada USB, o hasta en el mismo dispositivo.

Las características generales de todas las placas Arduino son las siguientes:

- El microprocesador ATmega328
- 32 kbytes de memoria Flash
- 1 kbyte de memoria RAM
- 16 [MHz]
- 13 pins para entradas/salidas digitales (programables)
- 5 pins para entradas analógicas
- 6 pins para salidas analógicas (salidas PWM)
- Completamente autónomo: Una vez programado no necesita estar conectado al PC
- Microcontrolador ATmega328
- Voltaje de operación 5 [V]
- Voltaje de entrada (recomendado) 7-12 [V]
- Voltaje de entrada (limite) 6-20 [V]
- Digital I/O Pins 14 (con 6 salidas PWM)
- Entradas analógicas Pins 6
- DC corriente I/O Pin 40 [mA]
- DC corriente 3.3 [Volts] Pin 50 [mA]
- Memoria Flash 32 kB (2 kB para el bootloader)

- SRAM 1 KB
- EEPROM 512 byte
- Velocidad de reloj 16 [MHz]

Existe una diversidad de plataformas que operan con microcontroladores disponibles para la computación a nivel físico (hardware). Todas estas herramientas se organizan en paquetes fáciles de usar para minimizar el trabajo del desarrollo a nivel de programación (software). Además, Arduino ofrece ventajas como:

**Asequible.** Las placas Arduino son más asequibles comparadas con otras plataformas de microcontroladores. La versión más cara de un módulo de Arduino puede ser montada a mano, e incluso ya montada cuesta bastante menos de \$1000 pesos aproximadamente.

**Multi-Plataforma.** El software de Arduino funciona en los sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y Linux. La mayoría de los entornos para microcontroladores están limitados a Windows.

**Entorno de programación simple y directo.** El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes y lo suficientemente flexible para los usuarios avanzados. Pensando en los profesores, Arduino está basado en el entorno de programación de Processing con lo que el estudiante que aprenda a programar en este entorno se sentirá familiarizado con el entorno de desarrollo Arduino.

**Software ampliable y de código abierto.** El software Arduino está publicado bajo una licencia libre y preparada para ser ampliado por programadores experimentados. El lenguaje puede ampliarse a través de librerías de C++, y si se está interesado en profundizar en los detalles técnicos, se puede dar el salto a la programación en el lenguaje AVR C en el que está basado. De igual modo se puede añadir directamente código en AVR C en tus programas si así lo deseas.

**Hardware ampliable y de Código abierto.** Arduino está basado en los microcontroladores ATMEGA168, ATMEGA328 y ATMEGA1280. Los planos de los módulos están publicados bajo licencia Creative Commons, por lo que diseñadores de circuitos con

experiencia pueden hacer su propia versión del módulo, ampliándolo u optimizándolo. Incluso usuarios relativamente inexpertos pueden construir la versión para placa de desarrollo para entender cómo funciona y ahorrar algo de dinero.

#### **4.3 Elección de la iluminación óptima para el sistema.**

Respecto a las lámparas ya existentes, podemos decir que el led ya ha superado a la mayoría de las fuentes de luz artificial. Para realizar una elección de led adecuado se deben considerar muchas variantes en el mercado, siempre se va a encontrar una solución que satisfaga los requerimientos técnicos, como las necesidades específicas de iluminación. Además, descubriremos que los precios van a encajar en nuestro presupuesto si tenemos en cuenta también los ahorros producidos y la amortización. Al mismo tiempo, en la mayoría de los proyectos, los leds nos ofrecen mayor posibilidad de uso, que las lámparas convencionales no pueden ofrecer.

Respecto a las nuevas fuentes de luz, como los OLED por sus siglas en Ingles de **Organic Light Emitting Diode (Diodo Orgánico de Emisión de Luz)**, o las lámparas de Plasma y otras que aún están en desarrollo, y por tanto es prematuro compararlas, consideramos que en una mayorías de los casos el led también va a ganar cualquier comparación técnica económica que hagamos.

A continuación se efectúa una breve descripción de los tipos de fuentes de luz más usados en iluminación para tomar en contexto lo dicho anterior.

- *Lámparas de incandescencia*

El funcionamiento de estas lámparas se basa en la emisión de la luz producida por un filamento llevado a la incandescencia por el paso de una corriente eléctrica. Para conseguir una mayor emisión posible, la temperatura del filamento también deberá ser la mayor posible.

La construcción consiste en una ampolla de vidrio rellena de gas argón, que para evitar su ionización incorpora una mezcla de nitrógeno en proporciones que varían del 8 al 15%. Una de las funciones de este gas es limitar la evaporación del filamento de tungsteno de doble arrollamiento y conseguir incrementar aproximadamente en un 10% su eficacia para una misma duración. La única posibilidad de mejorar sus características estriba en la limitación de esta evaporación, y esto se consigue mediante la adición de halógenos. Finalmente el casquillo cumple con la función de fijar mecánicamente la lámpara y permitir la corriente eléctrica al filamento. Su eficacia no supera los 28 [lm/W] salvo en casos muy excepcionales, siendo entre 8 y 20 [lm/W] los valores más usuales en las lámparas para alumbrado.

Las lámparas incandescentes se utilizaban para casi todo, ya que fueron la primera fuente de luz artificial, alimentada por energía eléctrica y desplazaron poco a poco a los antiguos sistemas de iluminación.

Las lámparas incandescentes han experimentado pocos cambios desde su descubrimiento hasta el final de sus días. Hay que tener en cuenta que un incremento de un 5% en la atención de red produce una reducción del 50% de su vida útil mientras que el flujo luminoso solo se ha incrementado en un 20%.

- *Lámparas de descarga*

Se basa en el fenómeno de luminiscencia, por el cual se producen radiaciones luminosas con un escaso aumento de la temperatura. En las lámparas de descarga, la luz se consigue con una corriente eléctrica entre dos electrodos situados en un tubo, que contenga un gas o vapor ionizado.

Las lámparas de descarga se pueden clasificar según el gas utilizado (vapor de mercurio o sodio) o la presión que este se encuentra (alta o baja presión). Las propiedades varían mucho de unas a otras y esto las hace adecuadas para unos usos u otros.

Todas las lámparas de descarga necesitan para su funcionamiento de equipos auxiliares de encendido ya sean balastos convencionales o electrónicos pudiendo estar ubicados en su interior como el exterior en forma compacta.

En el espectro de radiación de mercurio predominan las radiaciones ultravioletas y para que estas sean visibles se recubren las paredes de los tubos con un polvo fluorescente, que aumentara el porcentaje en rojo de la radiación luminosa total emitida.

*La lámpara de vapor de mercurio con halógenos metálicos* perfeccionó a las lámparas de vapor de mercurio convencionales, ya que la adición de los halógenos eleva la eficacia mejora notablemente las características cromáticas de las mismas. La ausencia de radiaciones ultravioletas elimina la necesidad de incorporar la capa fluorescente interna.

*Lámparas fluorescentes sin electrodos* introduce un nuevo concepto en la generación de luz. Se basa en el concepto de descarga de gas en baja presión sin electrodos la ionización se logra mediante un generador externo de alta frecuencia que crean, mediante una antena interna un campo electromagnético dentro de la ampolla de descarga. Esta característica hace que las prestaciones sean excelentes y que la vida útil aumente considerablemente superando las 60 000 horas. Esta vida útil solo esta limita para los componentes electrónicos que forman el equipo de encendido o generador de alta frecuencia.

**Tabla 4.3.1 Principales características de las lámparas**

| 2008-2012        | Halógena                         | Fluorescente                        | Fluorescente compacta                                   | Descarga V.S.A.P     | Descarga V.M.        | Descarga V.M.H.      | Cosmowhite           | Inducción                    |
|------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
| Flujo (lm)       | 250-36300                        | 1000-6200                           | 500-4800  | 6600-56500           | 6200-22000           | 6300-32500           | 6800-16500           | 1400-17000                   |
| Tonalidad        | 2800-3200                        | 2700-6500                           | 3000-4000   | 2000-2500            | 3500-4500            | 2800-4500            | 2800-2860            | 2700-6500                    |
| Eficacia (lm/W)  | 16-35                            | 96-104                              | 53-87   | 100-138              | 50-60                | 80-90                | 113-118              | 80-90                        |
| Tensión (V)      | 12-230                           | 55-208                              | 220-230<br>50-126                                       | 90-100               | 125-140              | 90-125               | 92-230               | 12-24-230                    |
| Corriente (A)    | 1                                | 0.17-0.67                           | 0.22-0.55   | 1-4.5                | 1.15-3.25            | 1-4.3                | 0.63-1.5             | 0.19-2                       |
| Potencia (W)     | 50-1500                          | 14-80                               | 8-80  | 70-400               | 125-400              | 70-400               | 60-140               | 23-300                       |
| Equipo necesario | Transformador o directo a la red | Balastro convencional y electrónico | Directa a red o con balastro convencional o electrónico | Balastro con Ignitor | Balastro sin Ignitor | Balastro con Ignitor | Balastro electrónico | Generador de alta frecuencia |
| UV               | No                               | Si corregida                        | Si corregida  | No                   | Si corregida         | No                   | No                   | Si corregida                 |
| IR               | Sí                               | No                                  | No  | No                   | No                   | No                   | No                   | No                           |
| Vida útil        | 2000h a 5000h                    | 8000h a 20000h                      | 6000h a 12000h  | 24000h a 28000h      | 12000h               | 12000h a 22000h      | 12000h a 30000h      | 60000h                       |
| Precauciones     | Temperatura                      | Mercurio                            | Mercurio  | Tensión elevada      | Mercurio             | Tensión elevada      | Tensión elevada      | Tensión elevada              |
| Otros Aspectos   | Permite regulación               | Permite regulación                  | Permite regulación                                      | Permite regulación   | Regulación crítica   | Regulación crítica   | Permite regulación   | Encendido Instantáneo        |

Las lámparas de vapor de sodio se clasifican en lámparas de vapor de sodio a baja presión (cuya utilización es muy poco frecuente), y lámpara de vapor de sodio a alta presión que aunque son similares a la mayoría de lámparas de descarga, tienen un tubo de descarga sensiblemente distinto a los de otras lámparas de descarga. Esto es debido a las altas temperaturas de funcionamiento así como la agresividad de la amalgama de sodio, que provoca que dicho tubo de descarga deba ser construido con una base de óxido de aluminio.

El LED es una lámpara de estado sólido cuya base son diodos semiconductores especiales, capaces de emitir luz en ciertas condiciones. Debido al paquete de luz que emite un led no es muy elevado, para alcanzar un flujo luminoso similar a las otras lámparas existentes (como las incandescentes o las fluorescentes compactas), las lámparas led están formadas por agrupaciones led, en mayor o menor número, según la capacidad luminosa deseada.

**Tabla 4.3.2. Eficacia del Led vs otras lámparas**

| <b>Tipos de lámparas</b> | <b>Lm/W (Datasheet)</b> | <b>Lm/W (usable)</b> | <b>Vida útil (h)</b> | <b>CRI*</b> |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-------------|
| Incandescencia           | 15                      | 12                   | 500                  | 90          |
| Halógena                 | 20                      | 16                   | 1200                 | 100         |
| Halógenos metálicos      | 70-90                   | 56-72                | 12000                | 85          |
| Fluorescencia            | 60-90                   | 39-60                | 8000                 | 80          |
| Sodio baja presión       | 120-150                 | 84-105               | 16000                | 25          |
| Sodio alta presión       | 95-130                  | 76-96                | 28000                | 45          |
| Led                      | 90-160                  | 70-120               | >50000               | >90         |

\* (Índice de Reproducción Cromática) Capacidad que una fuente luminosa tiene para reproducir fielmente los colores de varios objetos en comparación con una fuente de luz natural o ideal



Por calidad de luz en plantas se entiende que su composición espectral de las diferentes longitudes de onda en el rango de la luz visible es de entre 400 a 700 [nm], es decir aquella cuyos fotones son absorbidos por los pigmentos, como las clorofilas, fitocromos y otros encargados de los diferentes procesos. La luz roja e infrarroja por ejemplo es importante para estimular la floración de muchas plantas. La luz azul regula la apertura de los estomas, la orientación natural de las plantas hacia la luz así como es clave para los procesos celulares relacionados al crecimiento.

Las luces led, ya sea como suplemento o como única fuente de luz, muestra en general un gran potencial en la producción intensiva en invernaderos, por su efecto en promover el crecimiento vegetativo y en poder regular la floración de muchas especies de plantas, debido a su alta eficacia en emitir las diferentes longitudes de onda que las plantas requieren en sus distintos procesos. Poseen muchas ventajas sobre otras fuentes de luz, entre las se incluyen: una mayor eficacia en el uso de la energía, más larga vida útil, tamaño más pequeño, más resistentes y la principal es que los gastos de electricidad se reducen significativamente.

La mayoría de las plantas utilizan la parte azul del espectro visible de la luz (430 a 460 [nm]) para promover el crecimiento vegetativo, mientras que la parte roja (650 a 700 [nm]) y algo de la infrarroja promueve la floración y la formación de yemas.

La luz led de 10 [Watts] especial para cultivos que va de 380 a 840 [nm] cumple con las especificaciones para el desarrollo del invernadero ya que esta proporciona la potencia espectral máxima en las áreas rojas y azules del espectro de longitud de onda. Esto es deseable ya que promueve la fotosíntesis en las plantas, lo que permite una luz de cultivo multipropósito eficiente en un solo componente



**Figura 4.3.1. Luz led de 10 Watts**

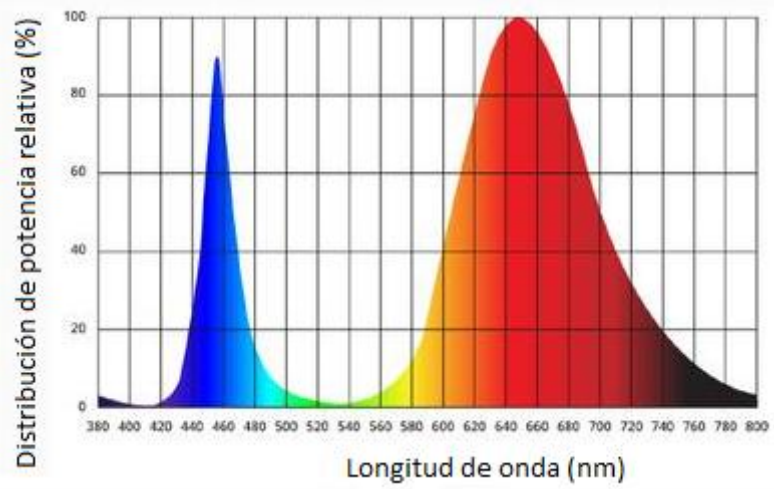
Este led cuenta con una luz de 900 lúmenes cuando se conduce a la máxima potencia y a la distancia de un metro. Al igual que todos los led de alta potencia, este componente debe montarse en un disipador de calor de aluminio o cobre con un pegamento o compuesto térmico entre la parte posterior de la PCB utilizada y la superficie del disipador de calor. Esto es esencial para lograr un rendimiento, una eficiencia y una vida útil óptimos en cualquier aplicación LED.

Sus características eléctricas son:

**Tabla 4.3.3. Características eléctricas y ópticas en  $IF = 600 [mA]$  y  $Ta=25^{\circ}C$**

| Parámetros                        | Símbolo         | Mínima | Típica | Máxima | Unidad        |
|-----------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|---------------|
| Flujo luminoso                    | $\phi_v$        | 700    | ~      | 900    | lm            |
| Longitud de onda                  | $\lambda_D$     | 380    | ~      | 840    | nm            |
| Voltaje de alimentación           | VF              | 9      | ~      | 11     | v             |
| Potencia disipada                 | PD              | 8.1    | ~      | 9.9    | W             |
| Angulo de visión                  | $2\theta_{1/2}$ | ~      | 120    | ~      | deg           |
| Resistencia térmica               | $R\theta_{J-B}$ | ~      | 12     | ~      | $^{\circ}C/W$ |
| Corriente de polarización inversa | IF              | ~      | ~      | 900    | mA            |

|  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|



**Figura 4.3.2 Espectro de emisión de luz led elegida**

#### **4.4. Elección de sensor de temperatura**

Los sensores son aquellos dispositivos que se encargan de captar la magnitud física que se quiere medir y la transforman en un análogo eléctrico de voltaje o de corriente. El criterio que se debe tomar para la selección de los sensores para una determinada aplicación son las siguientes.

- 1.-Pertinencia respecto al fenómeno: el principio de operación debe estar en relación directa con la amplitud que se quiere medir. Para una misma magnitud puede haber varios principios de operación y, por lo tanto varios sensores.
- 2.-Sensibilidad: Tiene que ver con la energía asociada con la medición. Algunos principios de operación toman gran energía y su sensibilidad es limitada, algunos otros toman muy poca energía y su sensibilidad es grande.
- 3.-Rango: Es el alcance (valor mayor o menor que se quiere medir) que despliega un sistema de instrumentación con respecto a la magnitud que se está midiendo.
- 4.-Linealidad: Corresponde a que la pendiente de la curva de calibración del instrumento basado en el transductor considerado sea constante en todo el rango.

5.-Simplicidad en la operación: Según se quiera menos o más electrónica para su operación.

6.-Costo: Es un factor importante sobre todo en la producción y comercialización del problema.

7.-Adaptabilidad con el sistema: Tiene que ver con el acoplamiento con las otras partes de la electrónica involucradas como niveles de impedancia y voltaje.

La temperatura es una de los más importantes parámetros en un proceso de control. Hay diversos tipos de sensores para medir la temperatura como son termopares, termoresistencias, circuitos integrados y termistores estos últimos son usados por sus grandes ventajas pero la elección del sensor siempre depende del promedio de temperatura, del rango máximo y mínimo de temperatura, la velocidad de respuesta, del acoplamiento térmico, el medio ambiente en el que se encuentre y del costo.

Para nuestro caso seguiremos las siguientes consideraciones

**Tabla 4.3.4 Sensores para medir la temperatura**

| <b>Sensor</b>        | <b>Rango de temperatura<br/>°C</b> | <b>Precisión ±<br/>°C</b> | <b>Costo</b> | <b>Robustez o adaptabilidad</b> |
|----------------------|------------------------------------|---------------------------|--------------|---------------------------------|
| Termopares           | -270 a +2600                       | 1                         | Bajo         | Muy alto                        |
| Termoresistencias    | -200 a +600                        | 0.2                       | Medio        | Alto                            |
| Termistores          | -50 a +200                         | 0.2                       | Bajo         | Medio                           |
| Circuitos Integrados | -40 a +125                         | 1                         | Bajo         | Bajo                            |

- Los termistores son usados en aplicaciones de temperatura media a baja según su rango de temperatura, no son tan robustos como los termopares o las

termoresistencias y no se pueden usar en ambientes químicos tan fácilmente pero su precisión es muy buena.

- Los semiconductores o circuitos integrados son usados comúnmente para bajas temperaturas, aunque con una precisión mala con respecto a los sensores anteriores son de muy bajo costo y algunos modelos se venden con salidas digitales, permitiendo a estos ser conectados directamente al equipo de cómputo, sin la necesidad de utilizar convertidores A/D (analógico- digital).

**Tabla 4.3.5 Ventajas y desventajas de sensores de temperatura**

| <b>Sensor</b>   | <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>  |
|---|---|---|
| Termopar  | <ul style="list-style-type: none"> <li>*Opera en un amplio rango de temperaturas.</li> <li>*Bajo costo.</li> <li>*Muy robusto o muy adaptativo a los ambientes.</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>*No lineal.</li> <li>*Poca precisión.</li> <li>*Se requiere valores de referencia</li> <li>*Sensible al ruido</li> </ul>                                     |
| RTD (Detector de temperatura de resistencia variable) | <ul style="list-style-type: none"> <li>*Lineal.</li> <li>*Opera en un amplio rango de temperaturas.</li> <li>*Alta estabilidad</li> </ul>                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>*Respuesta de tiempo muy lento</li> <li>*Alto costo</li> <li>*Se requiere una fuente de corriente para alimentar.</li> <li>*Sensible a los golpes</li> </ul> |
| Termistor   | <ul style="list-style-type: none"> <li>*Respuesta de tiempo muy rápida</li> <li>*Bajo costo</li> <li>*Tamaño pequeño</li> <li>*Durabilidad y grandes cambios en su</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>*No lineal.</li> <li>*Se requiere una fuente de corriente para alimentar.</li> <li>*Operación limitada en los rangos de</li> </ul>                           |

|                    |   |  |
|--------------------|---|--|
|                    | resistencia frente a los cambios de temperatura.  | temperatura.<br>*No es fácil intercambiar sin recalibrar   |
| Circuito integrado | *Muy Lineal<br>*Bajo Costo<br>*Salidas digitales que pueden ser conectadas directamente al microprocesador sin un convertidor A/D | *Operación muy limitada en los rangos de temperatura.<br>*Se requiere una fuente de voltaje o de corriente para alimentar.<br>*Errores de autocalentamiento.<br>*No tiene buen acoplamiento térmico con el ambiente. |

- Errores de medición

Podría haber varias fuentes de generación de errores durante la medición de temperatura. Veremos los más importantes.

- Error por autocalentamiento.

Los RTDs, Termistores y semiconductores requieren de una fuente externa de alimentación para que den lectura de temperatura. Esta fuente puede causar al sensor calor y dar una lectura errónea por autocalentamiento. El efecto de autocalentamiento depende del tamaño de sensor y la cantidad de potencia disipada por el sensor. Este efecto puede ser evitado usando una fuente de potencia externa baja o calibrando el autocalentamiento en el ambiente que se está midiendo.

- Errores por ruido eléctrico.

El ruido eléctrico puede introducir errores dentro de la medición. Por ejemplo los termopares producen extremadamente bajos voltajes y como resultado de eso el ruido fácilmente puede dar disparos en falso y cambios en la medición. Este ruido puede ser minimizado usando un filtro paso bajas, minimizando los picos de tensión en la tierra, y manteniendo al sensor y los cables conductores alejados de la maquinaria eléctrica.

- Error por estrés mecánico o por impactos

Algunos sensores como los RTDs son sensibles a las vibraciones mecánicas y pueden dar salidas erróneas en la medición, esta puede ser minimizada evitando la deformación o posibles impactos cercanos al sensor no usar adhesivos para fijar el sensor es mejor cambiar a otro tipo de sensor si estos ambientes son los que predominan.

- Acoplamiento térmico

Es importante que el sensor usado haga buen contacto térmico con la superficie de medición. Si la superficie tiene un gradiente de temperatura (como resultado de una pobre conductividad térmica) entonces la colocación del sensor deberá ser con la debida precaución que no toque superficies que aporten calor latente. Si el sensor es usado en un líquido deberá ser agitado para la uniformidad de calor.

- Constante de tiempo del sensor

Esta también es una fuente de error ya que cada tipo de sensor tiene una constante de tiempo, y este es el tiempo de respuesta al cambio a la temperatura externa que está midiendo. La constante de tiempo está definida como el tiempo que toma la salida del sensor en alcanzar el 63% del valor en estado estable final. El error debido a la constante de tiempo del sensor puede ser minimizado poniendo un termopar o poniendo un sensor con una constante de tiempo pequeña

- Cables de alimentación del sensor

Los cables del sensor son comúnmente de cobre y estos son por lo tanto excelentes conductores de calor. Estos cables pueden conducir error en la medición si la superficie

en la que se encuentran tiene una diferente temperatura a la que se quiere medir en el medio. Esos errores se pueden minimizar usando cables finos en su recubrimiento o tener cuidado donde se coloca el cable.

En la industria alimentaria, no basta con medir la temperatura, sino que la humedad relativa es también un factor importante a tener en cuenta.

La elección del sensor para el invernadero será un circuito integrado veremos a continuación las cualidades técnicas.

El sensor digital de temperatura y humedad relativa SHT31 permite realizar mediciones muy precisas a bajo costo. El SHT31 posee mejores prestaciones respecto a los sensores DHT11 y DHT22, como mejor resolución, mayor precisión y es más compacto. Utilizado en aplicaciones de Control automático de temperatura, Aire Acondicionado, Monitoreo ambiental en agricultura, etc.

Su integración es sencilla tanto a nivel de software como hardware. A nivel de software se dispone de librerías para Arduino con soporte para el protocolo I2C. En cuanto al hardware solo son necesarios 4 cables, dos de alimentación y dos de datos I2C

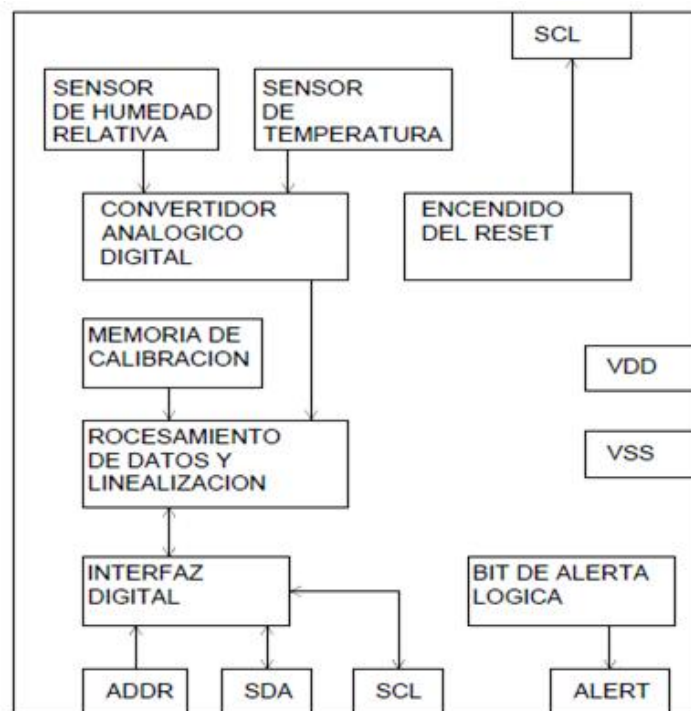
Las características del SHT31 son:

- Muy barato \$50 pesos
- Funciona con 2.4 [Volts] y 5.5 [Volts] de alimentación
- Rango de trabajo de temperatura: de -40 °C a 150 °C
- Resolución de Temperatura: 0.015 °C
- Precisión de Temperatura: 0.2 °C
- Rango de humedad relativa: de 0% al 100% HR
- Resolución de humedad relativa: 0.01 % HR
- Precisión de humedad relativa: 2% HR
- Tiempos de muestro rápidos
- Bajo consumo



- Protocolo de comunicación I2C
- Comparemos con un sensor DHT 22 con características similares que también se puede acoplar a las necesidades del tema.
- En cuanto al DHT22:
  - El costo es aproximadamente, entre \$100 pesos
  - Funciona con 3,3 y 5.5 [Volts] de alimentación
  - Rango de temperatura: de  $-40^{\circ}$  a  $125^{\circ} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$
  - Rango de humedad: de 0% al 100% con 5% de precisión.
  - Lee 2 veces por segundo.
  - Bajo consumo.
  - Devuelva la medida en  $^{\circ}\text{C}$

El sensor que mejor cumple con las necesidades del invernadero tanto económicas por su bajo costo, como en las técnicas por su sencillez en el alambrado por ser un bus de datos y tener una mejor resolución es el SHT31



**Figura 4.4.1. Esquema básico interno del sensor de temperatura.**

Una de las ventajas que nos ofrece el SHT31, además de medir la temperatura y la humedad, es que es digital. A diferencia de sensores como el LM35, este sensor utiliza un pin digital para enviarnos la información y por lo tanto, estaremos más protegidos frente al ruido además que la señal ya viene calibrada.

La secuencia de comunicación para la medición de temperatura, consiste en la condición de inicio con el protocolo de comunicación I2C (7 bits más la dirección 0 como el bit de escritura) más 16 bits del comando de medición (información concerniente al estado de la temperatura y humedad), la recepción del comando de medición se hace por la entrada SDA y confirmada por la señal de reloj SCL como información de sincronía.

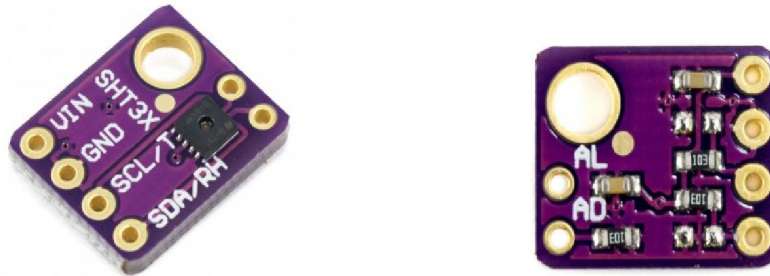
El ruido no deja de ser una señal eléctrica, al igual que las señales de Arduino, normalmente una señal continua de 5 [Volts], y de otros sistemas eléctricos que trabajan con señales alternas que pueden ir, por ejemplo, de 220 [Volts] a -220 [Volts].

Por lo tanto, el ruido es una señal de interferencia que se añade o se suma a nuestra señal útil produciendo efectos perjudiciales. Por ejemplo un sensor de temperatura cuya relación temperatura-voltaje es de  $1^{\circ}\text{-}10$  [mV]. Esto quiere decir que cada grado, se incrementa en 10mV la tensión obtenida. Si medimos la temperatura en algún lugar donde sabemos que hay  $20^{\circ}\text{C}$  exactamente, el resultado será 200 [mV]. Al conectar el sensor a Arduino comprobamos que el voltaje obtenido es de 220 [mV], lo que equivale a una temperatura de  $22^{\circ}\text{C}$ . Esos 20 [mV] de más es el ruido, una señal parasitaria que se añade a nuestra señal útil y por lo tanto la altera.

Los pines de sensor del SHT31 son:

- VIN: alimentación
- SDA (Serial Data): transmisión de datos. Es la vía de comunicación entre el maestro y el esclavo para enviar la información
- SCL: Señal de reloj para sincronización en la transmisión de datos
- GND: conexión a tierra

- AL: Señal de alerta
- AD: Dirección para seleccionar más de dos sensores en un mismo bus de datos



**Figura 4.4.2 Vista frontal y vista trasera**

Por lo tanto, partimos de una señal analógica que luego es convertida en formato digital y se enviará al microcontrolador.

La señal de ruido no afecta en igual medida a las señales digitales, dependerá de la amplitud del ruido. En términos generales, las señales analógicas son más sensibles al ruido.

Si en el ejemplo anterior del sensor de temperatura, la señal de ruido tuviera 0.3 [mV] en vez de 20 [mV], no afectaría a nuestras medidas. Por lo tanto la amplitud de la señal es importante. En el caso de las señales digitales, la amplitud también es importante, pero solo afectará si dicha amplitud es lo suficientemente grande para cambiar de estado de alto a bajo o de bajo a alto.

Una señal digital en Arduino no es solo alto y bajo y relacionarlo con 0 [V] y 5 [V]. en Arduino existen unos márgenes para identificar si la señal está en estado alto o bajo.

Como comprobamos, de 0 [V] a 1,5 [V] se considera un estado bajo. De 3 [V] a 5 [V] se considera un estado alto. Por último de 1,5 [V] a 3 [V] se considera una indeterminación. Supongamos que tenemos un nivel bajo en la señal digital con un valor

de 0,5 [V]. Para que se produzca un cambio a una indeterminación necesitaremos que la amplitud del ruido sea de más de 1 [V] y para que cambie a estado alto más de 2,5 [V].

Por lo tanto, el ruido no afecta en la misma medida a las señales digitales eso sí, cuando afecta los resultados pueden ser “catastróficos”.

#### **4.5 Elección de sensor de iluminación.**

Los foto-detectores son semiconductores que pueden detectar señales ópticas través de procesos electrónicos. La longitud onda de fuente de luz pueden ser coherentes o incoherentes en la región del infrarrojo lejano por un lado y la región ultra violeta por el otro aumentado la necesidad de foto detectores sensibles alta velocidad. El funcionamiento de un foto-sensor general incluye básicamente tres procesos: generación por luz incidente, transporte y multiplicación por mecanismo de ganancia de corriente si está presente y extracción de portadores como corriente de terminal para proporcionar la región de salida.

Los foto detectores son importantes en los sistemas de comunicación de fibra óptica operados por la región del infrarrojo cercano de 0.8 a 1.6 [ $\mu\text{m}$ ]. Ellos demodulan las señales ópticas que convierten las variaciones ópticas en variaciones eléctricas que posteriormente se amplifican y procesan. Para tales aplicaciones, los foto-sensores deben cumplir estrictos requisitos tales como alta sensibilidad en longitudes de ondas operativas, alta velocidad de respuesta y mínimo ruido.

Un sensor fotoeléctrico o fotocélula es un dispositivo electrónico que responde al cambio en la intensidad de la luz. Estos sensores requieren de un componente emisor que genera la luz, y un componente receptor que percibe la luz generada por el emisor.

Todos los diferentes modos de sensado se basan en este principio de funcionamiento. Están diseñados especialmente para la detección, clasificación y posicionado de objetos; la detección de formas, colores y diferencias de superficie, incluso bajo condiciones ambientales extremas.

Los sensores de luz se usan para detectar el nivel de luz y producir una señal de salida representativa respecto a la cantidad de luz detectada. Un sensor de luz incluye un transductor fotoeléctrico para convertir la luz a una señal eléctrica y puede incluir electrónica para condicionamiento de la señal, compensación y formateo de la señal de salida.

El sensor de luz más común es el LDR -Light Dependant Resistor o Resistor dependiente de la luz-.Un LDR es básicamente un resistor que cambia su resistencia cuando cambia la intensidad de la luz.

Existen tres tipos de sensores fotoeléctricos, los sensores por barrera de luz, los de reflexión sobre espejo y los de reflexión sobre objetos.

#### Barrera de luz

Las barreras tipo emisor-receptor están compuestas de dos partes, un componente que emite el haz de luz, y otro componente que lo recibe. Se establece un área de detección donde el objeto a detectar es reconocido cuando el mismo interrumpe el haz de luz. Debido a que el modo de operación de esta clase de sensores se basa en la interrupción del haz de luz, la detección no se ve afectada por el color, la textura o el brillo del objeto a detectar. Estos sensores operan de una manera precisa cuando el emisor y el receptor se encuentran alineados

#### Ventajas e Inconvenientes

La luz solo tiene que atravesar el espacio de trabajo una vez, por lo que se favorecen grandes distancias de funcionamiento, hasta 60 metros. Son apropiadas para condiciones ambientales poco favorables, como suciedad, humedad, o utilización a la intemperie, así como independientemente del color del objeto realiza una detección precisa del objeto.

La instalación se ve dificultada por tener que colocar dos aparatos separados y con los ejes ópticos alineados de manera precisa y delicada, ya que el detector emite en infrarrojos. Además de la imposibilidad de que los objetos a detectar sean transparentes.

## Precauciones de montaje

A la hora del montaje hay que tener en cuenta las superficies reflectantes cercanas a los dispositivos, provocando un mal funcionamiento de la fotocélula. También hay que tener en cuenta las posibles interferencias mutuas por la cercanía de varios de estos dispositivos, además de controlar los ambientes sucios, ya que la suciedad afecta negativamente en la lente emisora.

## Reflexión sobre espejo

Tienen el componente emisor y el componente receptor en un solo cuerpo, el haz de luz se establece mediante la utilización de un reflector catadióptrico. El objeto es detectado cuando el haz formado entre el componente emisor, el reflector y el componente receptor es interrumpido. Debido a esto, la detección no es afectada por el color del mismo. La ventaja de las barreras réflex es que el cableado es en un solo lado, a diferencia de las barreras emisor-receptor que es en ambos lados.

## Ventajas e Inconvenientes

En estas fotocélulas el haz de luz recorre dos veces la distancia de detección, con lo cual las distancias de trabajo que se consiguen son medias (de unos 15 metros). El espejo es fácil de instalar, y no se necesita cableado hasta el mismo, por lo que solo hay que cablear un detector. Además de ser válidos para detección de objetos opacos, también cubren eficientemente aplicaciones con detección de objetos con cierto grado de transparencia.

El problema más llamativo es que el objeto a detectar tiene que ser mayor que el espejo y, a ser posible, no reflectante, además de que la alineación tiene que ser precisa.

## Precauciones de montaje

Un objeto con superficie reflectante puede provocar errores de detección, esto se puede evitar haciendo que la reflexión del objeto a detectar no tenga la misma inclinación que el haz del detector

## Reflexión sobre objeto

La luz infrarroja viaja en línea recta, en el momento en que un objeto se interpone el haz de luz rebota contra este y cambia de dirección permitiendo que la luz sea enviada al receptor y el elemento sea censado, un objeto de color negro no es detectado ya que este color absorbe la luz y el sensor no experimenta cambios. Hay dos tipos de fotocélulas de reflexión sobre objeto, las de reflexión difusa y las de reflexión definida.

## Reflexión difusa

En las fotocélulas de reflexión difusa sobre el objeto el emisor lanza un haz de luz; los rayos del haz se pierden en el espacio si no hay objeto, pero cuando hay presencia de objeto, la superficie de éste produce una reflexión difusa de la luz, parte de la cual incide sobre el receptor y se cambia así la señal de salida de la fotocélula.

## Reflexión definida

La reflexión en la superficie del objeto a detectar por las fotocélulas de reflexión definida normalmente es de carácter difuso, como en los sensores de reflexión difusa, o sea que los rayos reflejados salen sin una trayectoria determinada.

Esto es muy importante, para no caer en la falsa idea de que la diferencia respecto a los sensores de reflexión difusa está en el tipo de reflexión; lo está en el tipo de óptica empleada.

En las fotocélulas de reflexión definida la fuente de luz está a una distancia mayor que la distancia focal, por lo que el haz converge a un punto del eje óptico

## Ventajas e Inconvenientes

Las fotocélulas de reflexión sobre objeto se componen únicamente de un emisor y un receptor montados bajo una misma carcasa, por lo que el montaje es sencillo y rápido. En estas fotocélulas el haz de luz recorre dos veces la distancia de detección y además el objeto puede ser de reflectividad baja, por lo que sólo se consiguen distancias de detección pequeñas (por lo general menos de un metro).

## Tipos de sensores de luz

### Foto resistor

Un fotoresistor, o LDR es un dispositivo cuya resistencia varía en función de la luz recibida. Podemos usar esta variación para medir, a través de las entradas analógicas, una estimación del nivel de luz.

Por tanto, un fotoresistor disminuye su resistencia a medida que aumenta la luz sobre él. Los valores típicos son de 1 [M $\Omega$ ] en total oscuridad, a 50-100 [ $\Omega$ ] bajo luz brillante.

Por otro lado, la variación de la resistencia es relativamente lenta, de 20 a 100 [ms] en función del modelo. Esta lentitud hace que no sea posible registrar variaciones rápidas, como las producidas en fuentes de luz artificiales alimentadas por corriente alterna. Este comportamiento puede ser beneficioso, ya que dota al sensor de una gran estabilidad.

Finalmente, los fotoresistores no resultan adecuados para proporcionar una medición de la iluminancia, es decir, para servir como luxómetro. Esto es debido a su baja precisión, su fuerte dependencia con la temperatura y, especialmente, a que su distribución espectral no resulta adecuada para la medición de iluminancia.

### Fotodiodo

Es sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Para que su funcionamiento sea correcto se polariza inversamente, con lo que se producirá una cierta circulación de corriente cuando sea excitado por la luz. Debido a su construcción, los fotodiodos se comportan como células fotovoltaicas, es decir, iluminados en ausencia de una fuente exterior de energía generan una corriente muy pequeña con el positivo en el ánodo y el negativo en el cátodo.

### Fototransistor

Sensible a la luz, normalmente a los infrarrojos. La luz incide sobre la región de base, generando portadores en ella. Esta carga de base lleva el transistor al estado de



conducción. El fototransistor es más sensible que el fotodiodo por el efecto de ganancia propio del transistor.

Un fototransistor es igual a un transistor común, con la diferencia que el primero puede trabajar de 2 formas:

1. Como transistor normal con la corriente de base  $I_b$  (modo común).
2. Como fototransistor, cuando la luz que incide en este elemento hace las veces de corriente de base.  $I_b$  (modo de iluminación).

Puede utilizarse de las dos en formas simultáneamente, aunque el fototransistor se utiliza principalmente con el pin de la base sin conectar.

En el mercado se encuentran fototransistores tanto con conexión de base como sin ella y tanto en cápsulas plásticas como metálicas (TO-72, TO-5) provistas de una lente.

### *Célula fotoeléctrica*

Una célula fotoeléctrica, también llamada celda, fotocélula o célula fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía lumínica (fotones) en energía eléctrica (flujo de electrones libres) mediante el efecto fotoeléctrico, generando energía solar fotovoltaica. Compuesto de un material que presenta efecto fotoeléctrico: absorben fotones de luz y emiten electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

La eficiencia de conversión media obtenida por las células disponibles comercialmente (producidas a partir de silicio monocristalino) está alrededor del 16 %, pero según la tecnología utilizada varía desde el 6% de las células de silicio amorfo hasta el 22 % de las células de silicio monocristalino. También existen las células multicapa, normalmente de arseniuro de galio, que alcanzan eficiencias del 30 %. En laboratorio se ha superado el 46 % con células experimentales.

La vida útil media a máximo rendimiento se sitúa en torno a los 25 años, período a partir del cual la potencia entregada disminuye por debajo de un valor considerable.

Al grupo de células fotoeléctricas para energía solar se le conoce como panel fotovoltaico. Los paneles fotovoltaicos consisten en una red de células solares conectadas como circuito en serie para aumentar la tensión de salida hasta el valor deseado (usualmente se utilizan 12 [V] o 24 [V]) a la vez que se conectan varias redes como circuito paralelo para aumentar la corriente eléctrica que es capaz de proporcionar el dispositivo.

El tipo de corriente eléctrica que proporcionan es corriente continua, por lo que si necesitamos corriente alterna o aumentar su tensión, tendremos que añadir un inversor y/o un convertidor de potencia.

#### Sensor CCD

Es un dispositivo de carga acoplada (Charge-Coupled Device (**Dispositivo de Carga Acoplada**)) es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados. Bajo el control de un circuito interno, cada condensador puede transferir su carga eléctrica a uno o a varios de los condensadores que estén a su lado en el circuito impreso. La alternativa digital a los CCD son los dispositivos CMOS utilizados en algunas cámaras digitales y en numerosas cámaras web. En la actualidad los CCD son mucho más populares en aplicaciones profesionales y en cámaras digitales

#### Sensor CMOS

Es un sensor de píxeles activos (Active Pixel Sensor APS), es un sensor que detecta la luz basado en tecnología CMOS y por ello más conocido como Sensor CMOS.

Gracias a la tecnología CMOS es posible integrar más funciones en un chip sensor, como por ejemplo control de luminosidad, corrector de contraste, o un conversor analógico-digital.

Para seleccionar un sensor es necesario tomar en cuenta:

Capacidad.

Composición del material que estos están hechos.

Sensibilidad a la humedad.

Dependiendo de la función que va a realizar (medición que se requiere)

Salida con la que cuenta (digital o analógica), ya que si es digital es inmune al ruido en comparación con una señal analógica.

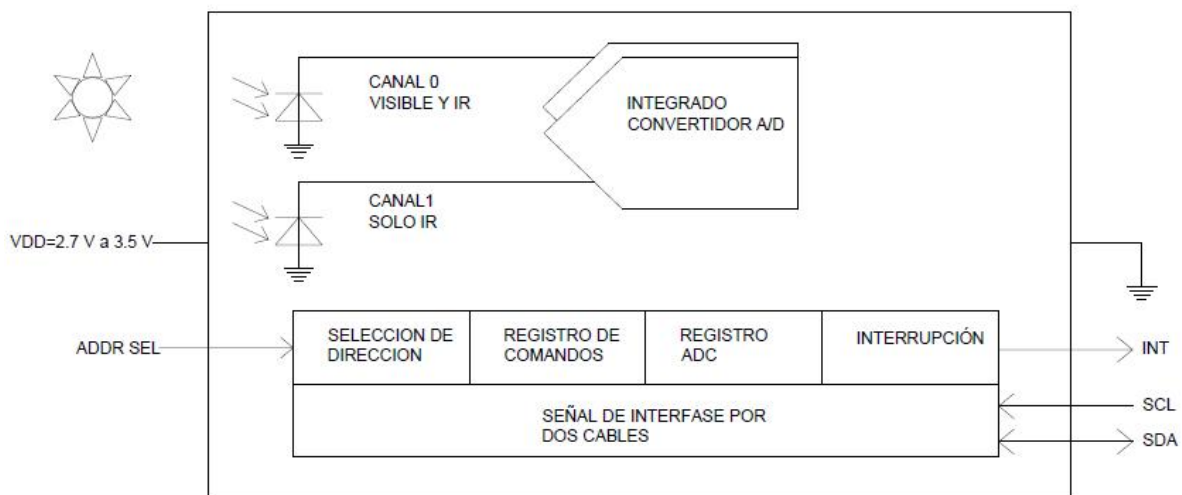
Tipo de energía que requiere.

Tiempo de respuesta.

Tamaño.

Conexiones, etc.

A diferencia de sensores más simples, como fotoresistores y fotodiodos, el TSL2561 incorpora sensores de luz infrarroja y visible para aproximarse mejor a la respuesta del ojo humano. Debido a que el TSL2561 es un sensor integrador (absorbe la luz durante un período de tiempo predeterminado), es capaz de medir cantidades muy pequeñas y muy grandes de luz con su tecnología de circuito integrado CMOS.



**Figura 4.5.1 Diagrama de bloque del sensor**

El TSL2561 es un sensor de capacidades avanzadas, mide intensidad de luz de forma digital, este sensor se puede utilizar en diferentes ambientes de iluminación, a continuación detallamos más información.

EL módulo TSL2561 que tiene la capacidad de medir con mucha mayor precisión, permite hacer cálculos más exactos de los niveles de iluminación (Lux – Lx es su símbolo) y además es posible configurar sus niveles de ganancia con respecto al tiempo.

Algo que vale la pena señalar es que este sensor cuenta con dos diodos, el de infrarrojos y un diodo de espectro completo, lo que permite hacer mediciones por separado, tanto de luz visible como de luz de espectro completo.

Una de las grandes ventajas del sensor TSL2561, ya que la gran mayoría de sensores sólo puede medir o una u otra, mientras que este sensor puede captar tanto la luz visible como la luz infrarroja que el ojo humano no puede captar.

Cuenta con una interfaz de comunicación mediante el protocolo I2C.

Además el consumo de energía es muy bajo, ideal para cuando queremos hacer un registro de datos de bajo consumo de energía. En modo activo este sensor puede consumir hasta 0.5 [mA], y cuando no se está utilizando consume tan sólo 15 [mA].

- Su respuesta de medición se puede comparar casi con la del ojo humano.
- Puede medir niveles de iluminancia en diversas condiciones de iluminación.
- Opera sin problemas entre rangos de temperatura de -30 a 80 °C.
- Lux: de 0.1 a 40,000
- Voltaje de operación: de 2.7 a 3.6 [V].
- Interfaz: Protocolo I2C.
- Utiliza direcciones I2C de 7 bits seleccionables: 0x39, 0x29, 0x49.



Figura 4.5.2 Módulo del sensor TSL2561

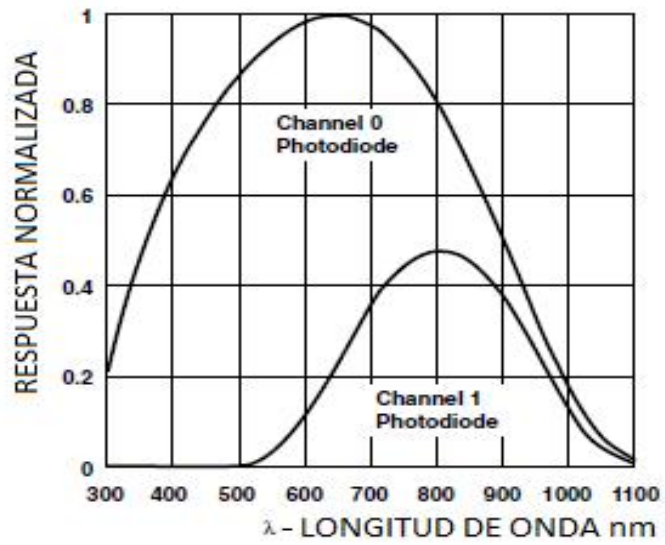


Figura 4.5.3 Respuesta espectral

## **Capítulo V Diseño del sistema**

### **5.1 Desarrollo conceptual de un invernadero vertical**

Las dimensiones a considerar para este invernadero se basan en un modelo que cubra dos necesidades fundamentales; la primera, se requiere que pueda adaptarse de manera fácil al espacio que pudiera tenerse en una residencia particular, la segunda, que sea modular para una producción a una escala mayor de ser necesario.

El principal problema al que nos enfrentamos es ajustarlo de manera adecuada a una residencia o un departamento, ya que no contamos con una referencia de qué espacio tiene cada casa disponible para un proyecto de este tipo y como no es posible personalizar cada caso sin tener que rediseñar el mismo, la opción que tenemos es proponer las medidas mínimas necesarias para que el sistema pueda funcionar de manera óptima, pensando en la posibilidad de instalarse en un pequeño espacio.

Una de las ventajas del cultivo sin suelo, es que los sistemas pueden adaptarse a determinadas medidas, por lo que al momento de proponer dimensiones al momento de

diseñar puede no ser un inconveniente a la hora de implementar este tipo de sistemas. Es necesario tener en cuenta que el diseño de una sola unidad debe ser óptimo y llevar los elementos mínimos necesarios para su buen desempeño, ya que el modelo se podrá replicar la cantidad de veces que sea necesario.

Una de las condiciones a considerar en este tipo de invernaderos es el espacio entre camas de cultivo, de ahí la decisión del manejo de las hortalizas de hoja verde, las cuales tienen como característica no superar los 30 [cm] de altura hasta la hora de su cosecha. Dentro de los tipos contemplados para cultivo en este invernadero, resaltan los siguientes:

- Espinaca
- Acelga
- Lechuga (ciertos tipos escarola, romana y criolla)

Que son variedades de hortalizas que pueden tener sus raíces en sistemas de cultivo hidropónico no muy profundas de hasta 10 [cm].

El espacio entre la altura máxima de la hortaliza y la iluminación debe ser por lo menos de 15 [cm], de otro modo el aprovechamiento de esta luz no sería óptimo. Otro de los factores para que exista este espaciado es que, a distancias menores a 10 [cm] de la fuente de luz, la planta sufre de una saturación y el proceso de fotosíntesis se detiene, lo que ocurre cuando la iluminación supera los 30000 [lux]. Debido a las características del **LED (Light-Emitting Diode o Diodo Emisor de Luz)** que es de amplio espectro el cual se implementará, el área efectiva de iluminación a 45 [cm] es de 50 x 50 [cm]. Estos parámetros son de vital importancia para nuestro invernadero, ya que con ellos podremos definir el largo, ancho y alto del mismo.

En la Figura 5.1.1, se muestra la conceptualización de las medidas propuestas, donde cada nivel cuenta con dos LED de amplio espectro de 10 [W] cada uno (Figura 5.1.2). Cada LED cubre por nivel, un espacio de 50 x 50 [cm], lo que nos deja con un espacio de 100 x 50 [cm] de área de cultivo por nivel.

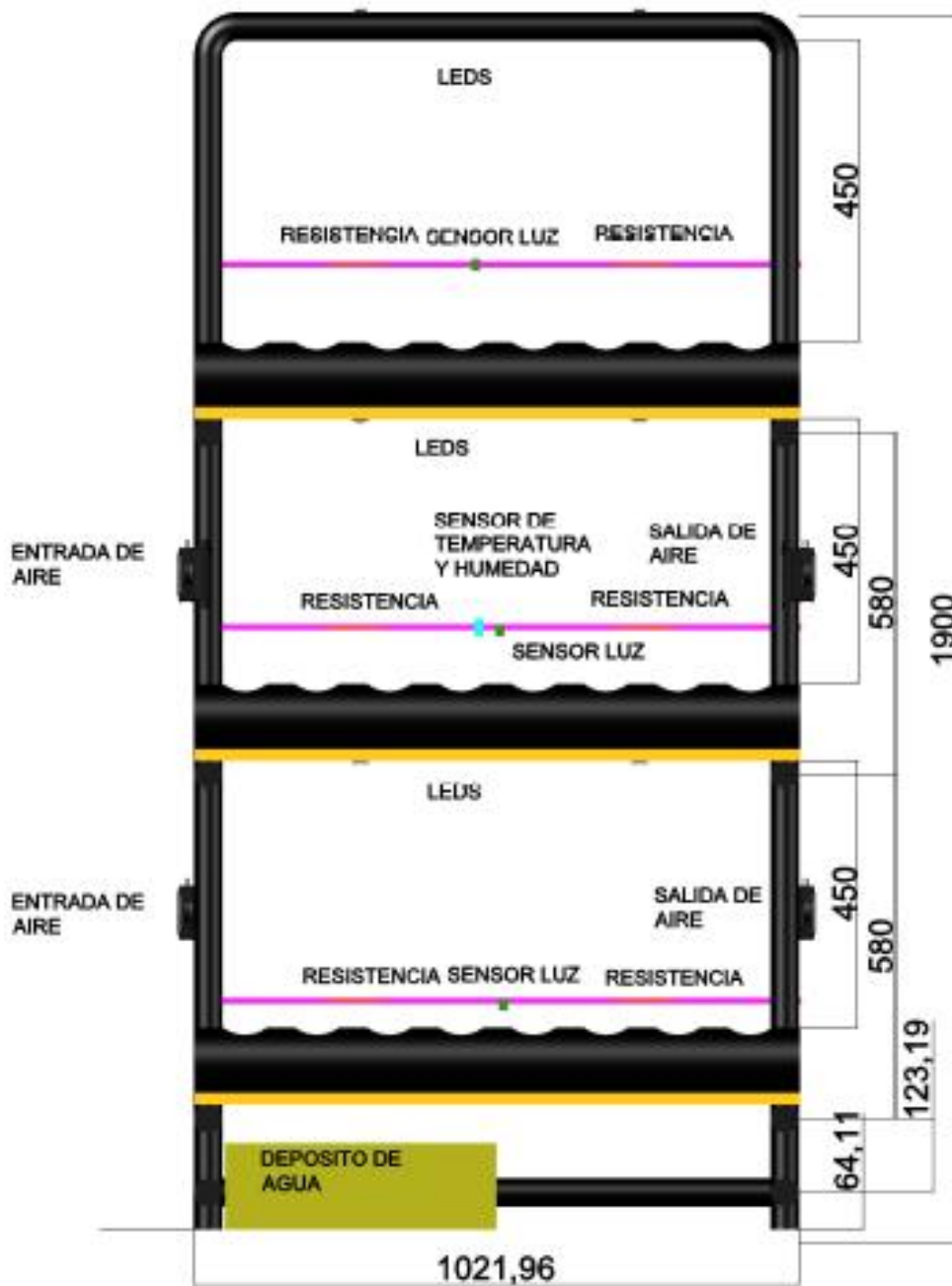


Figura 5.1.1. Medidas propuestas para el invernadero vertical cotas en (mm)



El espacio entre niveles se consideró de 450 [mm], tomando en cuenta que el LED requerirá un disipador de no más de 50 [mm] de grosor y de manera adicional se ha considerado un máximo de 4 pulgadas para la tubería PVC correspondiente al sistema de cultivo hidropónico. Tomando en cuenta estas medidas y agregando el espacio de los componentes propios para el funcionamiento del sistema hidropónico dan al invernadero una altura de 1900 [mm].

Para la elaboración de invernadero se propone la utilización en el marco de PVC tubular de 48 [mm] de espesor, comercialmente es la tubería de 1 ½ pulgadas con soleras de 10 [mm] de alto por 1021 [mm] de largo y 3 [mm] de ancho que sostienen a los sensores y resistencias y los entrepaños que sostiene a la tubería de 110 [mm] son de madera de 5 [mm]



**Figura 5.1.2. LED Amplio Espectro 10 [W]**

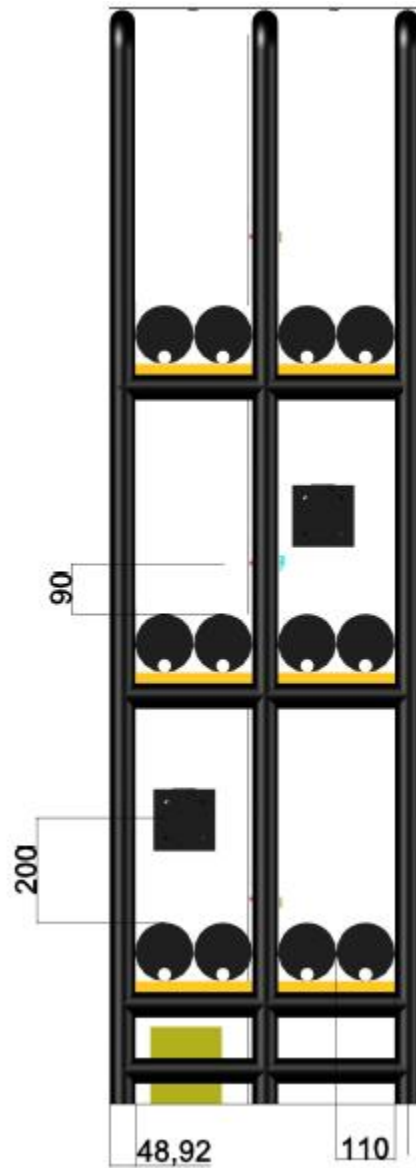
Los sensores de iluminación a su vez, se encuentran colocados en la parte central de cada nivel, por dos razones, la primera, tener un promedio de la luz que emiten ambos LED, la segunda, en ese espacio es menos probable que alguna hortaliza cubra la luz

LED. La intensidad de iluminación de los LED estará controlada por el sistema en función de las lecturas de su respectivo sensor.

Para el control de temperatura, el sistema cuenta con resistencias térmicas de 200 [W] por nivel. Estas resistencias poseen un elemento que transfiere calor en forma constante sin perder su forma y serán controladas por el sistema para ajustar la temperatura dentro del invernadero. Al ser un sistema cerrado la temperatura y humedad presentes pueden ser sensados por un solo dispositivo, el cual se encuentra en la parte central del invernadero.

El control de temperatura se completa por dos pares de ventiladores, estos serán los encargados del descenso de temperatura en caso de requerirse, además de garantizar un flujo de aire dentro del invernadero lo cual impide la proliferación de enfermedades en el cultivo. Un par de ventiladores en uno de los costados introducirá aire frío y por el otro se extraerá aire caliente como se muestra en la Figura 5.1.1. Del mismo modo que las placas térmicas, los ventiladores estarán controlados por el sistema en función de las lecturas del control de temperatura.

Los sensores se colocaron a 90 [mm] del nivel más bajo del cultivo, con el sistema difuso se harán las correcciones necesarias para encontrar el punto adecuado para el generar un ecosistema dentro del invernadero



**Figura 5.1.3. Vista lateral del invernadero.**

La interfaz para visualización de los datos del sistema se encontrará en la parte frontal del invernadero a 1.7 [m] aproximadamente en donde se situará, además el microprocesador y elementos de control.

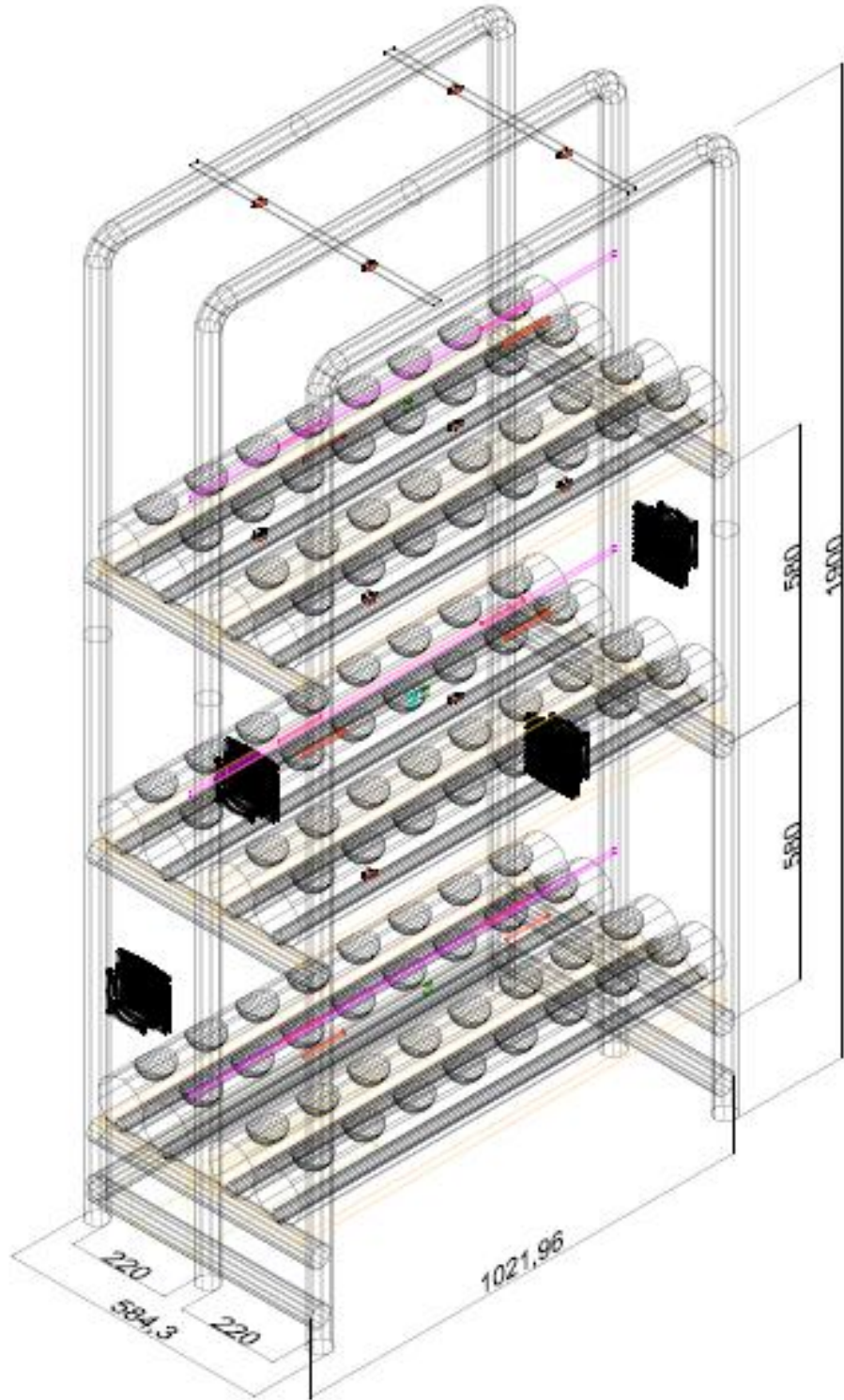
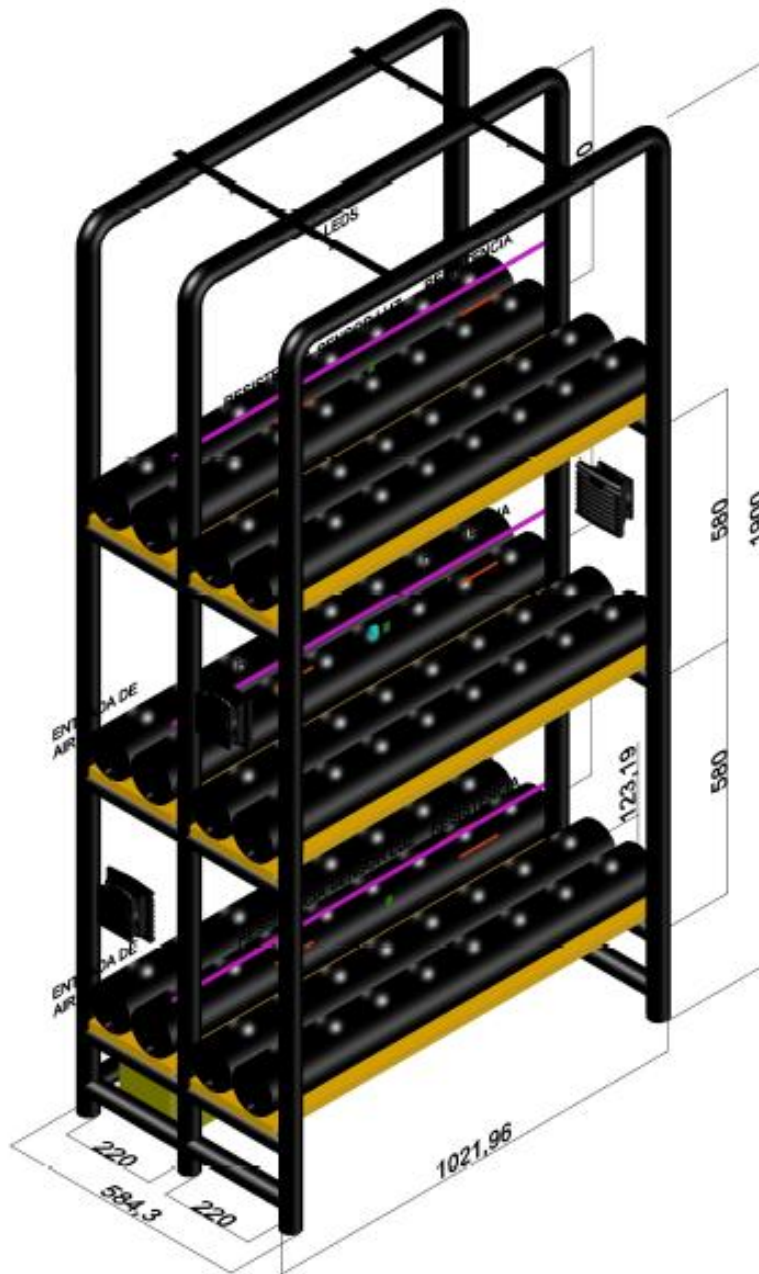


Figura 5.1.4. Vista isométrica del invernadero.

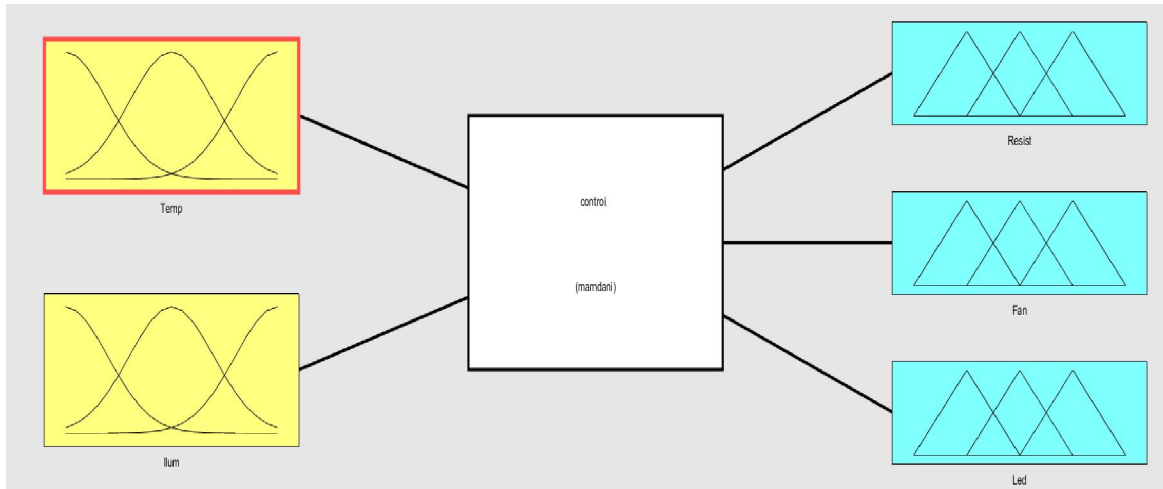


**Figura 5.1.5 Prototipo final del invernadero**

## **5.2 Desarrollo de la programación necesaria para el microprocesador**

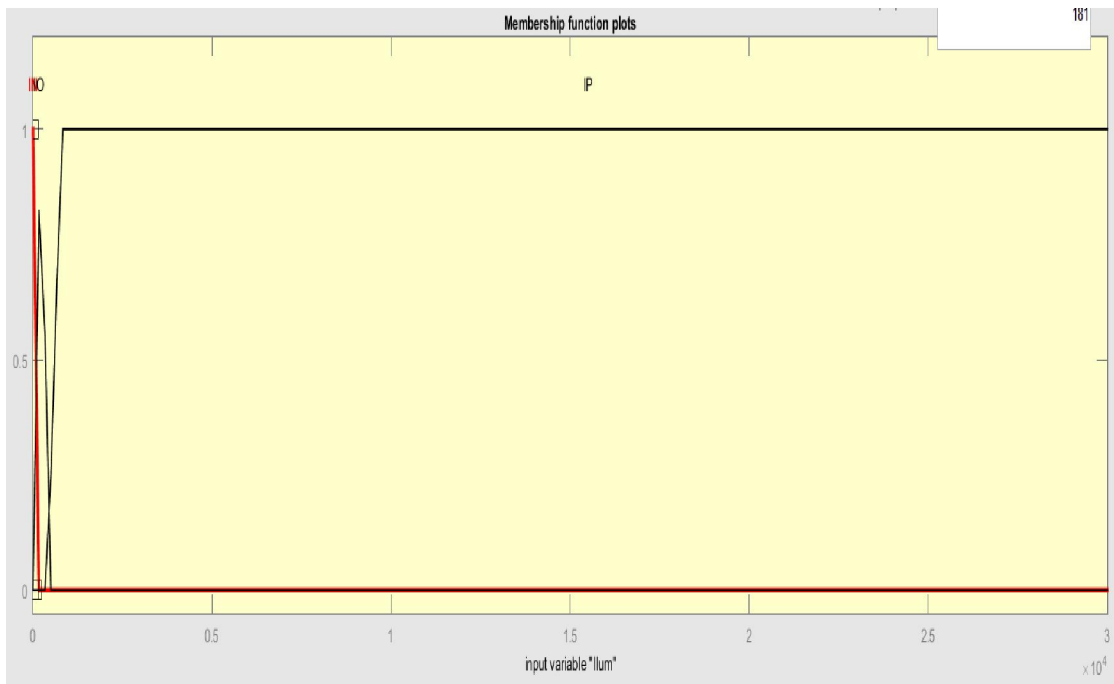
Para el diseño del control de la temperatura se optó por un control difuso, en el cual se controlara por la parte de temperatura, una resistencia para incrementar la temperatura y un par de ventiladores para disminuir la misma y también tener un flujo de aire, por otra parte en la iluminación solo se contralara la intensidad de los leds para generar la

iluminación óptima la cual está en el rango de 50 a 160 [lux], para lo cual se generó el siguiente diagrama (figura 5.2.1) de entradas y salidas del control difuso.



**Figura 5.2.1. Entradas y salidas del control difuso**

Y generando los conjuntos para cada una de las entradas y salidas tenemos para el caso de la entrada de iluminación (figura 5.2.2):

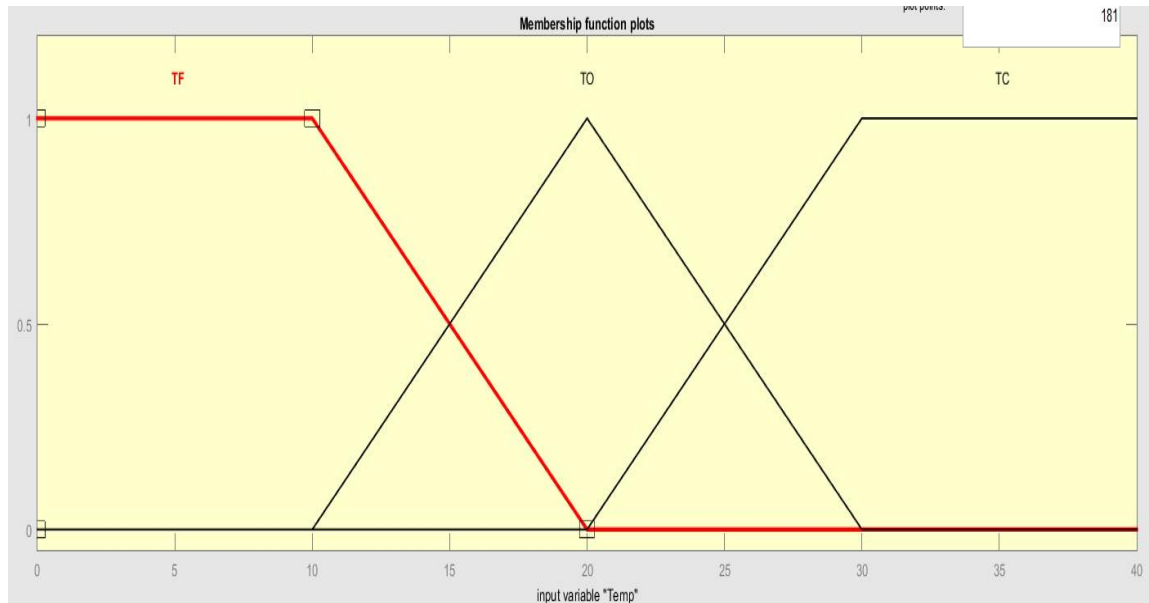


**Figura 5.2.2 Conjuntos difusos de entrada de iluminación.**

Donde

- IN es iluminación baja y su conjunto difuso se define como { 0, 0, 10, 100 }
- IO es iluminación optima { 10, 200, 500 }
- IP es demasiada iluminación { 400, 800, 30000, 30000 }.

En el caso de la entrada de temperatura tenemos los conjuntos definidos como se muestra en la figura 5.2.3.

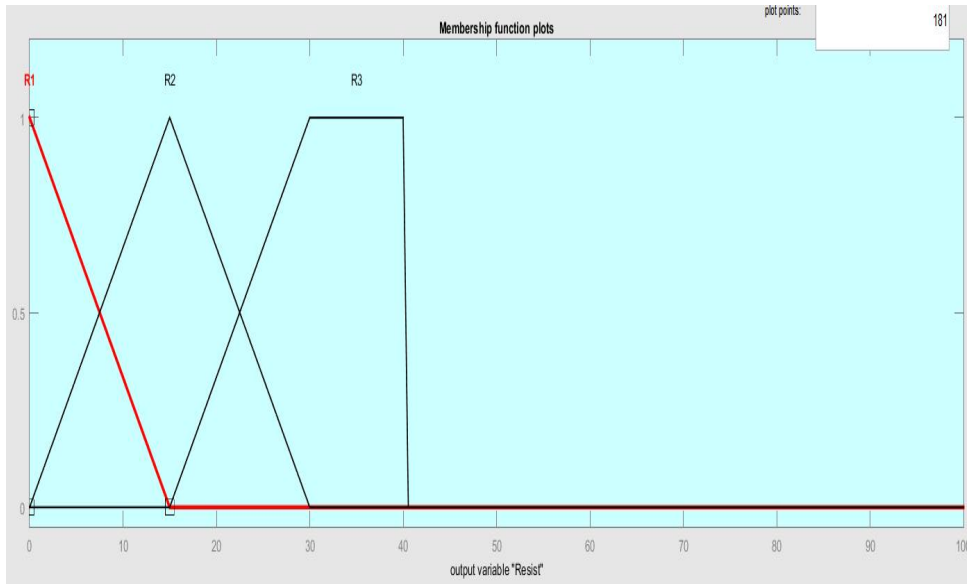


**Figura 5.2.3. Conjuntos difusos de entrada de temperatura**

En el mismo caso que el anterior tenemos tres intervalos los cuales están definidos como:

- TF: Temperatura Fría. { 0, 0, 10, 20 }
- TO: Temperatura Optima. { 10, 20, 30 }
- TC: temperatura Caliente. { 20, 30, 45, 50 }

En la parte de las salidas contamos con tres dispositivos a controlar los cuales variarían su potencia de salida de 0 a 100% los cuales están representados en las Figuras 5.2.4, 5.2.5 y 5.2.6:

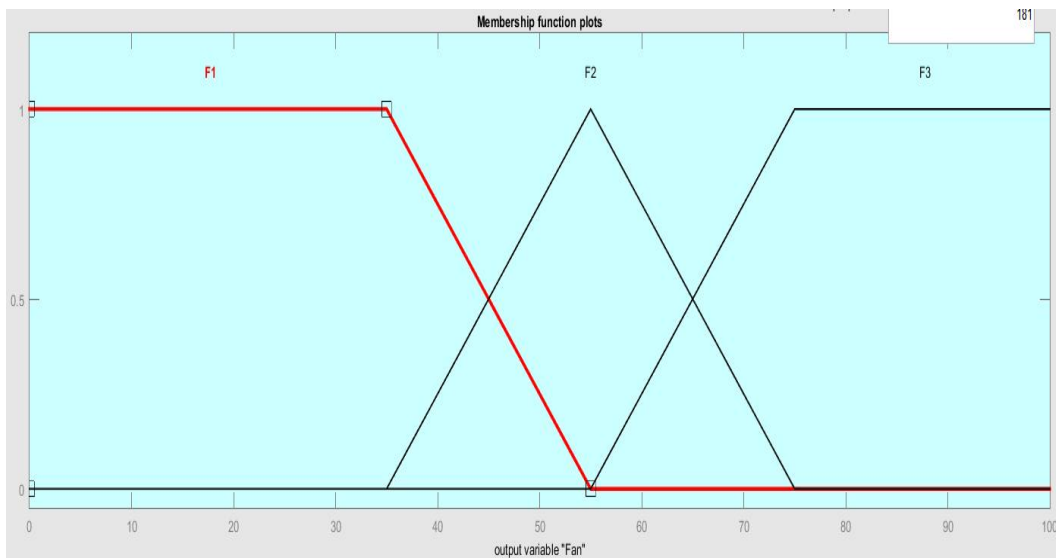


**Figura 5.2.4. Conjuntos difusos de salida del resistor**

Donde tenemos:

- R1: { 0, 0, 0, 15 }
- R2: { 0, 15, 30 }
- R3: { 15, 30, 40, 40 }

Ya que se desea que la resistencia solo trabaje en valores bajos debido a que en porcentajes altos calienta más de lo que se requiere para el invernadero.



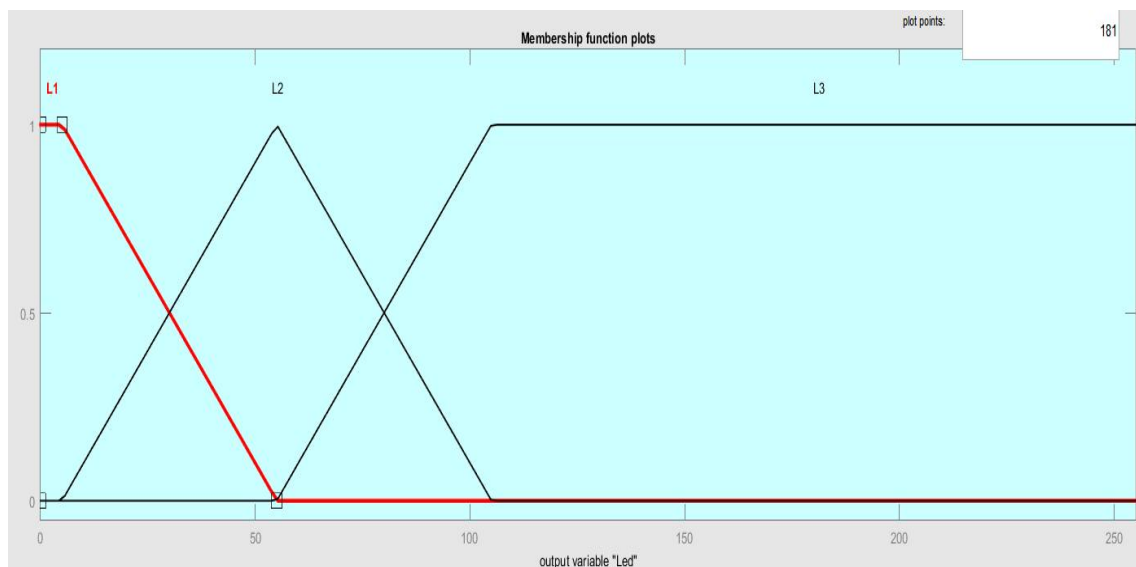
**Figura 5.2.5. Conjuntos difusos de la salida de los ventiladores**



Del cual tenemos:

- F1: { 0, 0, 35, 55 }.
- F2: { 35, 55, 75 }.
- F3: { 55, 75, 100, 100 }.

En este caso se observó que al usar el **dimmer (regulador de intensidad)** en una carga inductiva el ventilador no comienza a girar hasta el 40%, por lo que se diseñó el conjunto para que en el primer conjunto el ventilador este apagado en lo que se calienta el invernadero y después mantener un flujo de aire dentro del mismo.



**Figura 5.2.6 Conjuntos difusos de la salida del led.**

- L1: { 0, 0, 5, 55 }
- L2: { 5, 55, 105 }
- L3: { 55, 105, 255, 255 }

En este caso se observó que los valores adecuados para generar la iluminación necesaria se encontraban en el intervalo de 50 a 100 en la cuenta del PWM.

En los tres casos se manejaron tres intervalos para simplificar el diseño del control, aunque al momento de generar el código para el controlador se tendrá que adecuar para cada caso, ya que contaremos con dos tipos de salidas, una de ellas será un PWM para poder controlar la potencia en DC y un Dimmer para la parte de AC.

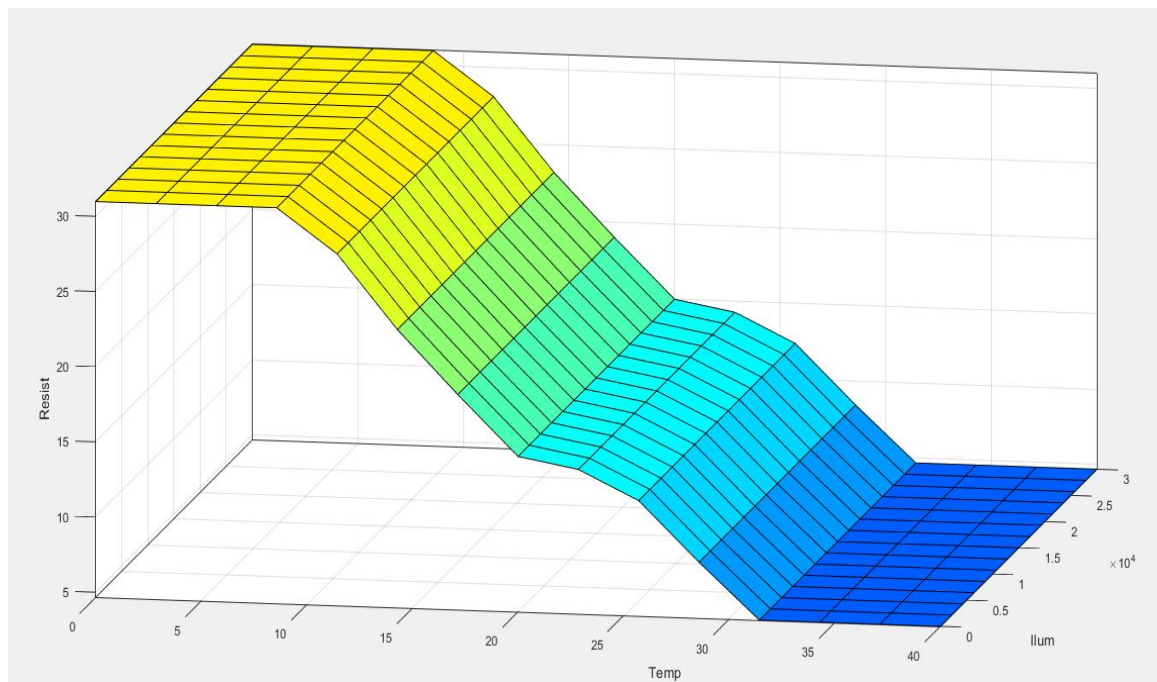
En cuanto a las reglas que el controlador deberá de seguir son las siguientes:

\*Si la temperatura está en el rango de TF, entonces la resistencia será R3.

- Si la temperatura está en el rango de TO, entonces la resistencia será R2 y el ventilador F1.
- Si la temperatura está en el rango de TC, entonces la resistencia será R1 y el ventilador F3.
- Si la iluminación está en el rango de IN, entonces el led será L3.
- Si la iluminación está en el rango de IO, entonces el led será L2.
- Si la iluminación está en el rango de IP, entonces el led será L1.

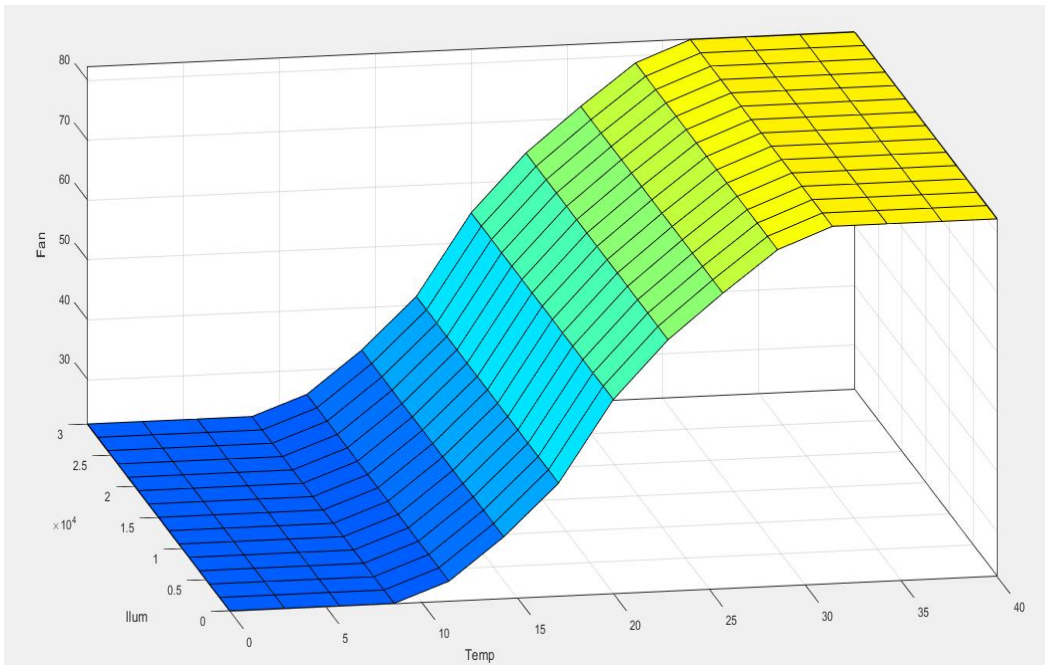
Con estas reglas podremos controlar las condiciones internas del invernadero para garantizar que estén dentro de los parámetros establecidos.

Con estas reglas podemos obtener las áreas de control para el resistor, ventiladores y el led mostrados en las figuras 5.2.7, 5.2.8 y 5.2.9 correspondientemente:



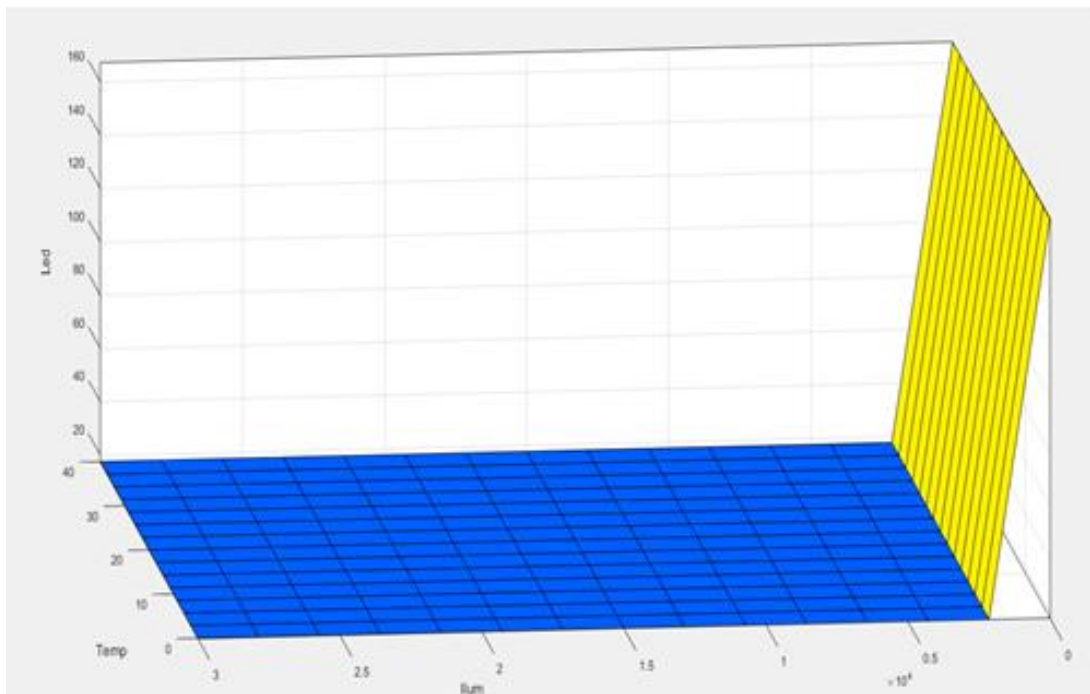
**Figura 5.2.7 Curva de control del resistor**

Esta grafica nos indica el comportamiento que tendrá la resistencia en el intervalo de temperatura, del cual se puede observar que cuando la temperatura es baja, la resistencia trabajara a su máxima capacidad a la cual se diseñó.



**Figura 5.2.8 Curva de control de los ventiladores**

Aquí se observa el comportamiento de los ventiladores el cual funciona inversamente de la resistencia para así poder obtener un balance entre la potencia del ventilador y la resistencia y así poder tener una mejor estabilidad.



**Figura 5.2.9 Curva de control del Led.**

Y por último en la parte de iluminación el sensor que se usó para este modelo, toma mediciones hasta los 30,000 [lux] pero para nuestros propósitos solo se requiere que el led trabaje dentro del rango de 100 a 500 [lux].

Para el diseño del control difuso primero se requiere convertir las entradas de nuestro sistema a entradas difusas, por lo cual se definen las siguientes funciones:

- Trapezoidal la cual se define mediante cuatro parámetros los cuales son las variables a, b, c y d; los cuales definen los valores mínimos y máximos de la función, a representa el límite mínimo e inferior de la función, en el intervalo comprendido entre b y c se encuentra la máxima pertenencia del sistema difuso y por último el parámetro d es donde termina la función con el valor mínimo de pertenencia.
- Triangular la cual se define solamente con tres parámetros a, b y c, en este caso se tiene solo un punto de máximo grado de pertenencia y este está definido por b, los parámetros a y c limitan nuestra función y a su vez son los valores mínimos de pertenencia.

Como se muestra a continuación (Figura 5.2.10) se programaron las funciones siguiendo estas características, también se evalúan las funciones y se obtienen los máximos y mínimos para las operaciones que se realizarán después en la obtención de la salida difusa del sistema.

```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Subir
fiscontrolef$ fis_header.h
}
// Funcion Trapezoidal
FIS_TYPE fis_trapmf(FIS_TYPE x, FIS_TYPE* p)
{
    FIS_TYPE a = p[0], b = p[1], c = p[2], d = p[3];
    FIS_TYPE t1 = ((x <= c) ? 1 : ((d < x) ? 0 : ((c != d) ? ((d - x) / (d - c)) : 0)));
    FIS_TYPE t2 = ((b <= x) ? 1 : ((x < a) ? 0 : ((a != b) ? ((x - a) / (b - a)) : 0)));
    return (FIS_TYPE) min(t1, t2);
}

// Funcion Triangular
FIS_TYPE fis_trimf(FIS_TYPE x, FIS_TYPE* p)
{
    FIS_TYPE a = p[0], b = p[1], c = p[2];
    FIS_TYPE t1 = (x - a) / (b - a);
    FIS_TYPE t2 = (c - x) / (c - b);
    if ((a == b) && (b == c)) return (FIS_TYPE) (x == a);
    if (a == b) return (FIS_TYPE) (t2*(b <= x)*(x <= c));
    if (b == c) return (FIS_TYPE) (t1*(a <= x)*(x <= b));
    t1 = min(t1, t2);
    return (FIS_TYPE) max(t1, 0);
}

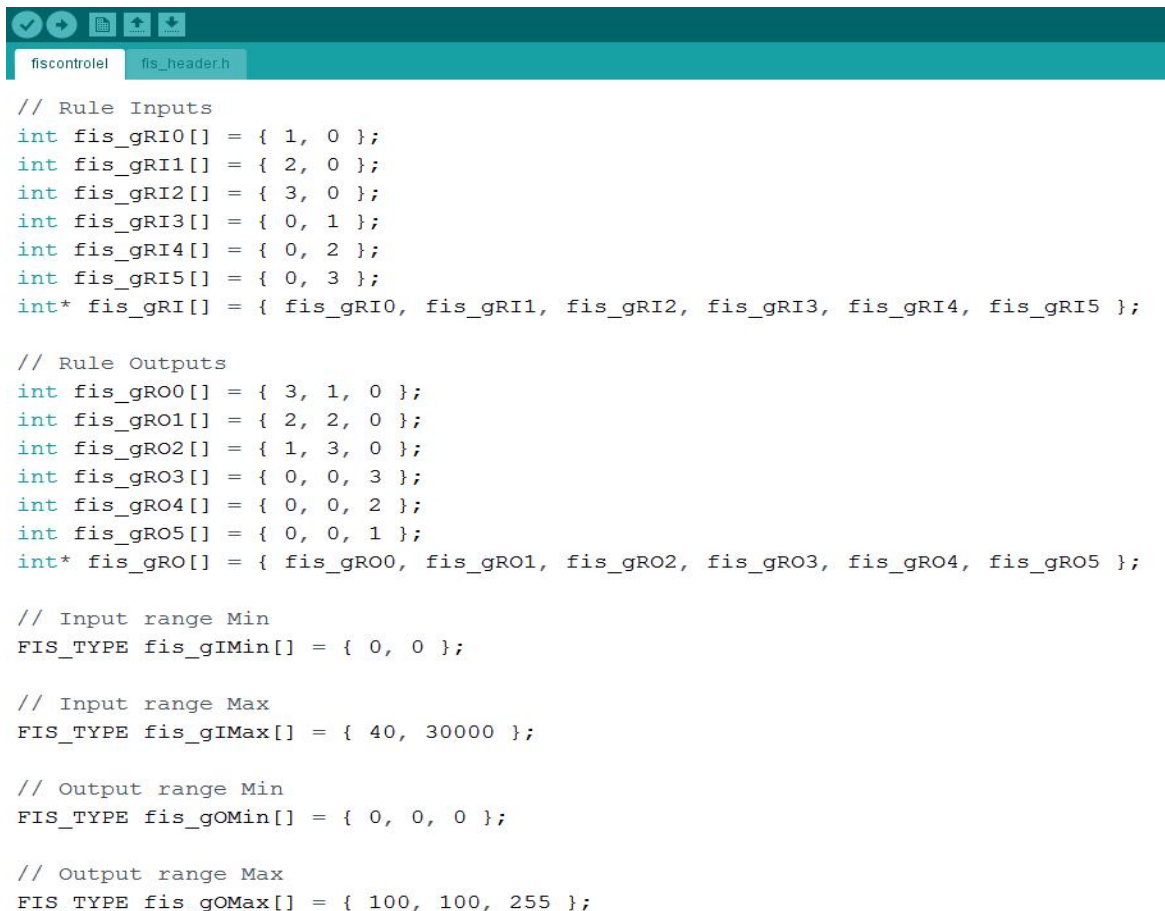
FIS_TYPE fis_min(FIS_TYPE a, FIS_TYPE b)
{
    return min(a, b);
}

FIS_TYPE fis_max(FIS_TYPE a, FIS_TYPE b)
{
    return max(a, b);
}

```

**Figura 5.2.10. Definición de funciones difusas**

A continuación, se realiza la definición de las reglas y los parámetros de las entradas y salidas difusas (Figura 5.2.11), donde se establece la relación entre las entradas y salidas que se deben de cumplir según las reglas propuestas, también se declaran los límites inferiores y superiores para cada caso, en las entradas y salidas del sistema.



```

fiscontrole1  fis_header.h

// Rule Inputs
int fis_gRI0[] = { 1, 0 };
int fis_gRI1[] = { 2, 0 };
int fis_gRI2[] = { 3, 0 };
int fis_gRI3[] = { 0, 1 };
int fis_gRI4[] = { 0, 2 };
int fis_gRI5[] = { 0, 3 };
int* fis_gRI[] = { fis_gRI0, fis_gRI1, fis_gRI2, fis_gRI3, fis_gRI4, fis_gRI5 };

// Rule Outputs
int fis_gRO0[] = { 3, 1, 0 };
int fis_gRO1[] = { 2, 2, 0 };
int fis_gRO2[] = { 1, 3, 0 };
int fis_gRO3[] = { 0, 0, 3 };
int fis_gRO4[] = { 0, 0, 2 };
int fis_gRO5[] = { 0, 0, 1 };
int* fis_gRO[] = { fis_gRO0, fis_gRO1, fis_gRO2, fis_gRO3, fis_gRO4, fis_gRO5 };

// Input range Min
FIS_TYPE fis_gIMin[] = { 0, 0 };

// Input range Max
FIS_TYPE fis_gIMax[] = { 40, 30000 };

// Output range Min
FIS_TYPE fis_gOMin[] = { 0, 0, 0 };

// Output range Max
FIS_TYPE fis_gOMax[] = { 100, 100, 255 };

```

**Figura 5.2.11. Reglas del control y límites de las entradas y salidas**

Seguido de esto se procede a la evaluación de las reglas por medio del siguiente código (Figura 5.2.12), donde se evalúa para los tres casos posibles, el primero de ellos es que la entrada sea negativa se evaluará en las reglas que aplique y nos dará los valores de cada regla, el segundo es cuando la entrada es positiva de la misma manera se evalúa y nos da una salida difusa, y para el último caso es cuando no hay entrada por lo cual la salida será cero.

```
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
fiscontroler$ fis_header.h
//*****
FIS_TYPE fis_MF_out(FIS_TYPE** fuzzyRuleSet, FIS_TYPE x, int o)
{
    FIS_TYPE mfOut;
    int r;

    for (r = 0; r < fis_gcR; ++r)
    {
        int index = fis_gRO[r][o];
        if (index > 0)
        {
            index = index - 1;
            mfOut = (fis_gMF[fis_gMFO[o][index]])(x, fis_gMFOcoeff[o][index]);
        }
        else if (index < 0)
        {
            index = -index - 1;
            mfOut = 1 - (fis_gMF[fis_gMFO[o][index]])(x, fis_gMFOcoeff[o][index]);
        }
        else
        {
            mfOut = 0;
        }

        fuzzyRuleSet[0][r] = fis_min(mfOut, fuzzyRuleSet[1][r]);
    }
    return fis_array_operation(fuzzyRuleSet[0], fis_gcR, fis_max);
}
```

**Figura 5.2.12. Evaluación de reglas con salida difusa**

Al tener todas las salidas difusas se procede a obtener el centro de masa del trapecioide que se forma al evaluar las reglas (Figura 5.2.13), una vez que se tiene el centro de masa se tiene un valor difuso el cual después se procederá a defusificarlo para obtener la salida que nuestro sistema requiere para el control de las diferentes salidas (Figura 5.2.14).

```

fiscontrolel  fis_header.h
FIS_TYPE step = (fis_gOMax[o] - fis_gOMin[o]) / (FIS_RESOLUTION - 1);
FIS_TYPE area = 0;
FIS_TYPE momentum = 0;
FIS_TYPE dist, slice;
int i;

// calculate the area under the curve formed by the MF outputs
for (i = 0; i < FIS_RESOLUTION; ++i){
    dist = fis_gOMin[o] + (step * i);
    slice = step * fis_MF_out(fuzzyRuleSet, dist, o);
    area += slice;
    momentum += slice*dist;
}

return ((area == 0) ? ((fis_gOMax[o] + fis_gOMin[o]) / 2) : (momentum / area));
}

```

Figura 5.2.13. Obtención del centroide

```

fiscontrolel  fis_header.h
    fuzzyFires[r] = fis_min(fuzzyFires[r], fuzzyInput[i][index - 1]);
    else if (index < 0)
        fuzzyFires[r] = fis_min(fuzzyFires[r], 1 - fuzzyInput[i][-index - 1]);
    else
        fuzzyFires[r] = fis_min(fuzzyFires[r], 1);
}
}
else
{
    fuzzyFires[r] = FIS_MIN;
    for (i = 0; i < fis_gcI; ++i)
    {
        index = fis_gRI[r][i];
        if (index > 0)
            fuzzyFires[r] = fis_max(fuzzyFires[r], fuzzyInput[i][index - 1]);
        else if (index < 0)
            fuzzyFires[r] = fis_max(fuzzyFires[r], 1 - fuzzyInput[i][-index - 1]);
        else
            fuzzyFires[r] = fis_max(fuzzyFires[r], 0);
    }
}

fuzzyFires[r] = fis_gRWeight[r] * fuzzyFires[r];
sW += fuzzyFires[r];
}

if (sW == 0)
{
    for (o = 0; o < fis_gcO; ++o)
    {
        g_fisOutput[o] = ((fis_gOMax[o] + fis_gOMin[o]) / 2);
    }
}
else
{
    for (o = 0; o < fis_gcO; ++o)
    {
        g_fisOutput[o] = fis_defuzz_centroid(fuzzyRuleSet, o);
    }
}

```

Figura 5.2.14. Defusificación de la salida.

### 5.3 Desarrollo del hardware necesario para la aplicación.

Para el correcto funcionamiento de los actuadores de nuestro sistema, es necesario implementar etapas que permitan al microcontrolador tener el control sobre voltajes y corrientes que por sus características no son compatibles con la tarjeta que ocuparemos. El primer problema al que nos enfrentamos es que requerimos tener control sobre actuadores que se alimentan con corriente alterna (AC) y un voltaje de 127 [V]. Por seguridad es necesario que exista aislamiento entre la alimentación y el elemento de control de esta etapa y nuestra tarjeta para evitar posibles daños. Los optoacopladores representan una buena opción para la dar solución al sistema de aislamiento, tanto por su tiempo de respuesta, tamaño y precio. En el caso específico de una etapa de AC, requeriremos una variante de esta familia llamada fototriac (Figura 5.3.1). La función de este dispositivo es la de poder conectar uno de sus extremos a la línea de AC y activar los respectivos elementos de control que funcionan con ese mismo tipo de corriente eléctrica pudiendo así acoplar al otro extremo la salida de DC proveniente del microcontrolador sin que ambas partes tengan contacto eléctrico.

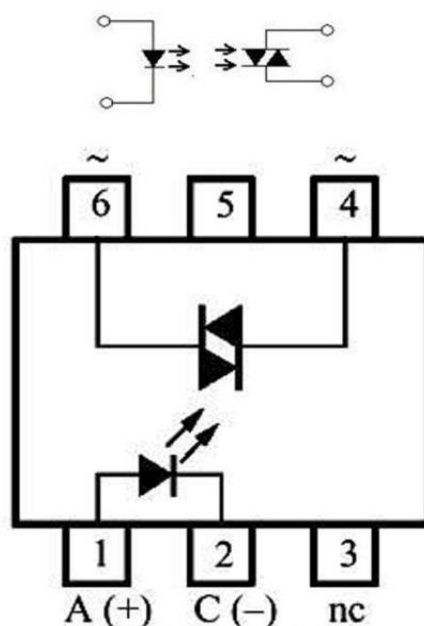


Figura 5.3.1. Diagrama básico de un fototriac.



De este modo la conexión microcontrolador se reduce a conectar el pin 5 y 6 de la tarjeta a un fototriac, para el control de las etapas de potencia de AC.

Se utilizará el moc3011 (Figura 5.3.2) que de acuerdo a la hoja de especificaciones para el dispositivo, el valor del resistor requerido para Rin se calcula a partir de los datos proporcionados (Figura5.3.3).

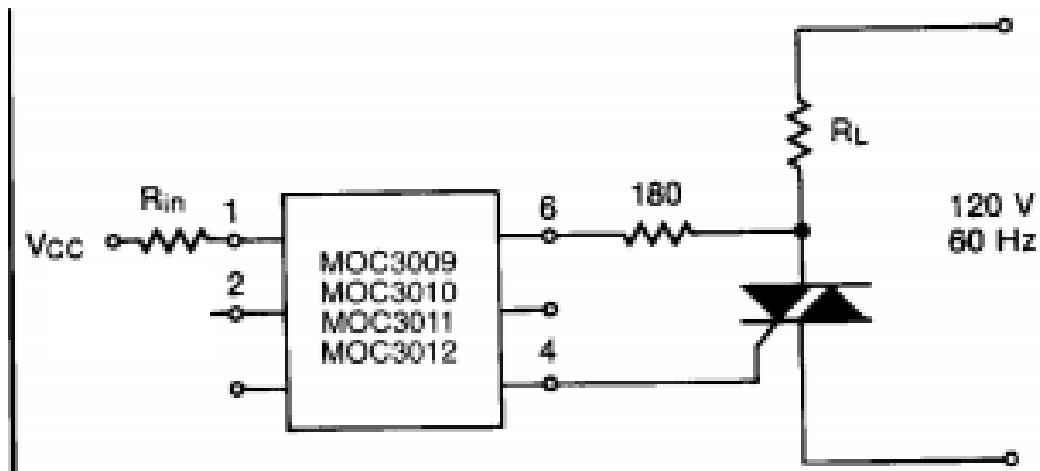


Figura 5.3.2. Configuración básica que proporciona el fabricante

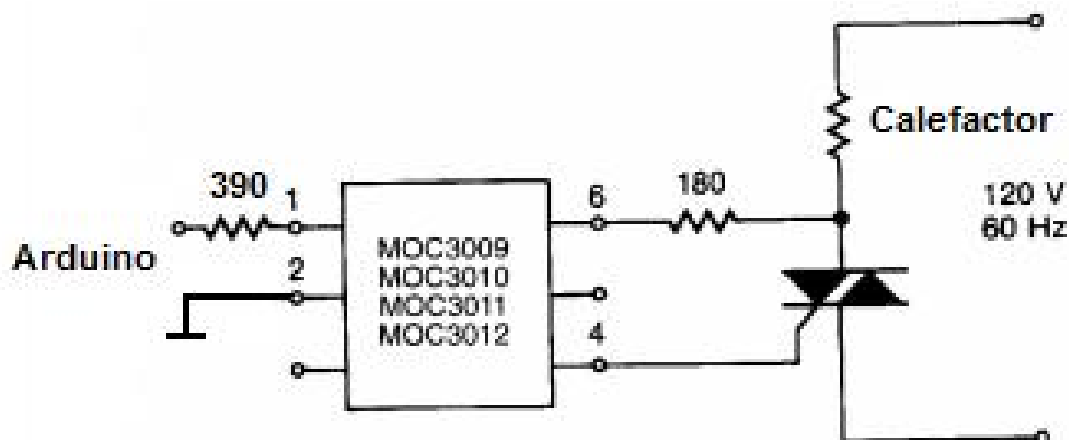
| INDIVIDUAL COMPONENT CHARACTERISTICS |        |      |      |      |       |                    |
|--------------------------------------|--------|------|------|------|-------|--------------------|
| CHARACTERISTIC                       | SYMBOL | MIN. | TYP. | MAX. | UNITS | TEST CONDITIONS    |
| <b>INPUT DIODE</b>                   |        |      |      |      |       |                    |
| Forward voltage                      | $V_f$  |      | 1.2  | 1.50 | V     | $I_f=10\text{ mA}$ |

Tabla 5.3.3. Valores de corriente y voltaje para la sección de entrada del MOC3011.

Para calcular Rin por ley de Ohm del diagrama mostrado en la figura 5.3.4.

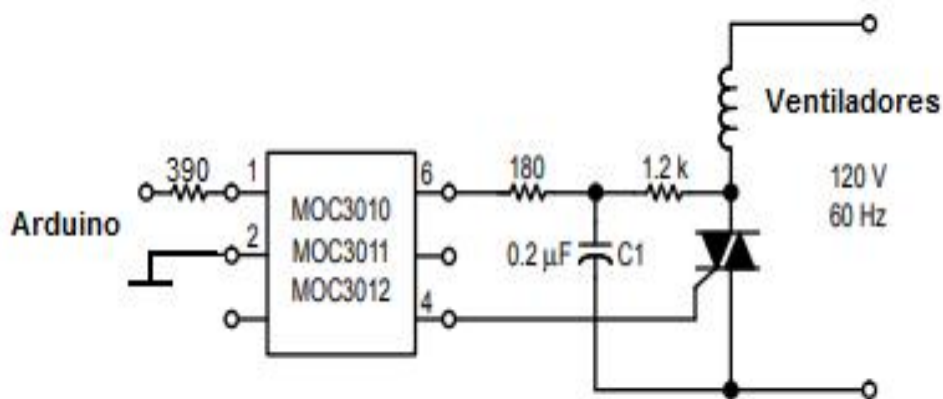
$$R_{in} = \frac{V_{cc} - V_d}{I} = \frac{5V - 1.2V}{0.01A} = 380 [\Omega]$$

El valor tomado que se acerca más es de 390  $[\Omega]$ , valor comercial.



**Figura. 5.3.3. Diagrama de la etapa de control de AC con carga resistiva**

En el caso de una carga inductiva, el fabricante del fototriac proporciona un diagrama que compensa lo efectos que puede tener esta carga en la compuerta y evitar falsos disparos (Figura 5.3.5).

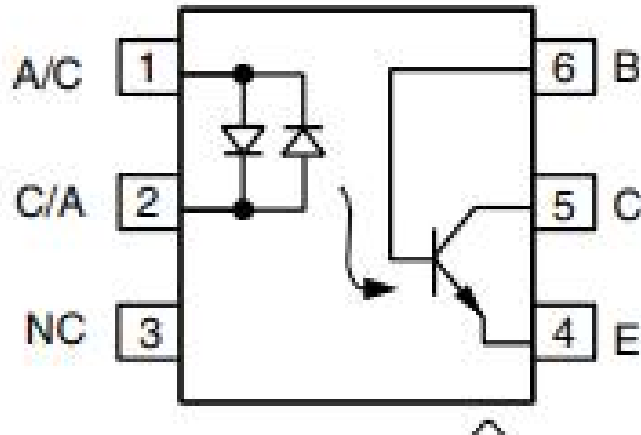


**Figura 5.3.4. Diagrama de la etapa de control de AC con carga inductiva**

Para la sincronía con estas dos etapas y el correcto funcionamiento del sistema, requerimos un dispositivo que tenga la capacidad de monitorear señales de AC y que nos ofrezca al igual que los optotriac un aislamiento efectivo a esa señal de AC a monitorear.

El integrado H11AA1 (Figura 5.3.6) es una entrada bidireccional aislada de manera óptica que se compone de dos diodos LED infrarrojos paralelos inversos acoplados a un

fototransistor y específicamente diseñado para aplicaciones que requieren detección o monitoreo de señales de AC.



**Figura. 5.3.5. Optoacoplador H11AA1**

El fabricante prueba la conexión de entrada con una corriente de 10 [mA], a 1.2 [V]. El cálculo para el resistor el resistor adecuado:

$$R = \frac{127V_{rms} - 1.2V_{led}}{0.01A} = 12.5 [k\Omega]$$

El valor comercial es de 12 kΩ. El programa recibirá un pulso a cada cruce por cero, por lo que es necesario colocar un resistor de pull-up en la configuración de salida (Figura 5.3.7) para poder tener una salida como se muestra en la figura 5.3.8.

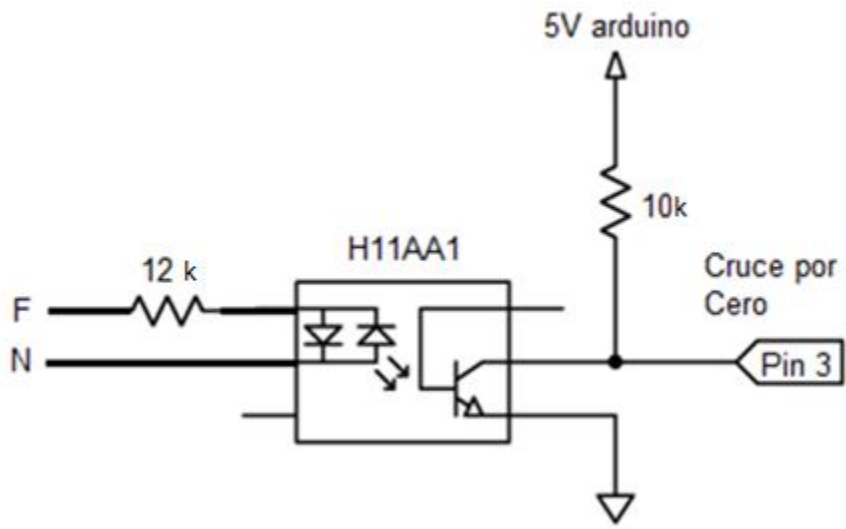


Figura 5.3.6. Diagrama del Detector de cruce por cero.

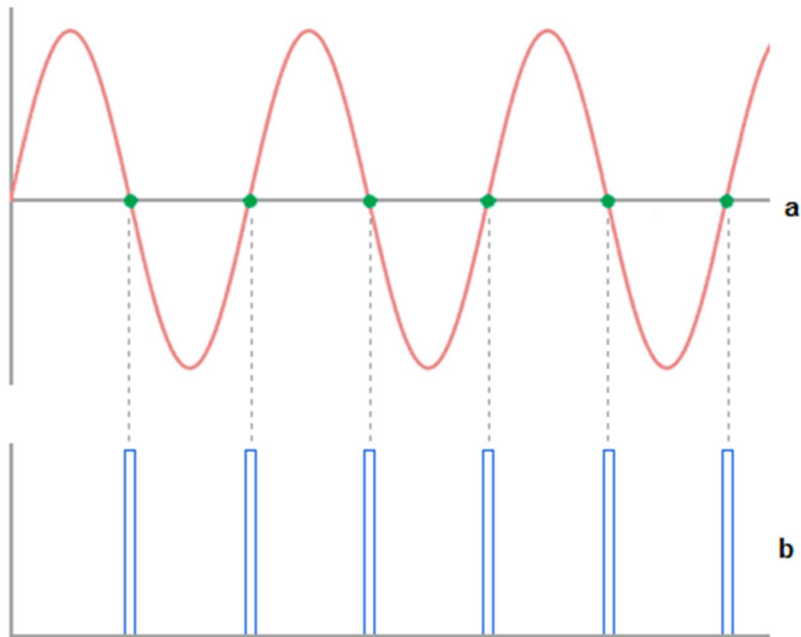
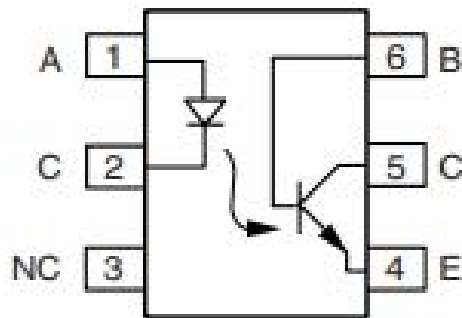


Figura 5.3.7. (a). Señal sinusoidal que alimenta al sistema. (b). Señal proporcionada por la etapa de detección de cruce por cero.

Para la etapa de potencia de DC, es necesario recurrir a un aislamiento similar, pero en este caso de una etapa de DC a DC. Es importante aislar para proteger las salidas de la tarjeta, ya que sólo tienen capacidad de proporcionar un máximo de 50 [mA] y un máximo de 5 [V]. En el caso de la etapa de potencia se manejará un voltaje de 12 [V] y más de 3 [A] para la alimentación de los diodos LED, voltajes y corrientes que podrían dañar a la tarjeta. El Optoacoplador 4n25 (Figura 5.3.9), es el dispositivo que se utilizará para este propósito.



**Figura 5.3.8. Optoacoplador 4N25.**

Para la conexión a la tarjeta, la hoja de especificaciones indica un voltaje de funcionamiento de 1.2 a 1.5 [V] y una corriente de 60 [mA] como máxima, corriente que tomaremos de 10 [mA] para no dañar el puerto.

$$R_{in} = \frac{V_{cc} - V_d}{I} = \frac{5 [V] - 1.2 [V]}{0.01 [A]} = 380 [\Omega]; \quad 390 [\Omega] \text{ valor comercial}$$

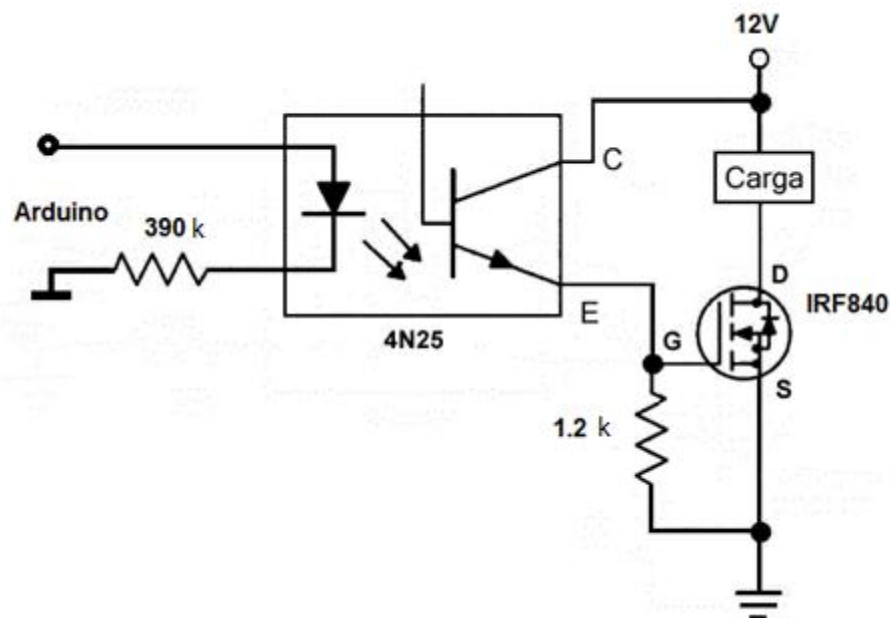
Para la etapa de salida del Optoacoplador se maneja un transistor MOSFET IRF840, que tendrá la función de conmutar la carga, con la ventaja de que este tipo de dispositivos tienen la característica de manejar grandes corrientes. El diodo LED que se utiliza requiere una corriente de 1 [A], pero limitaremos la corriente a 900 [mA] para no llevar al LED al máximo de su capacidad.

Según las especificaciones del fabricante podemos mandar a saturación al MOSFET con los 12 [V] de la fuente de alimentación, por lo que podemos conectar la compuerta del dispositivo directamente a la salida del Optoacoplador. Es necesario un resistor conectado a GND conectado en esta configuración, este resistor tiene como función la

de dejar a la compuerta con un potencial bajo, además de limitar el máximo de corriente que proporcionará el Optoacoplador. El Optoacoplador soporta un máximo de 50mA de corriente de colector en su salida, pero nosotros manejaremos 10mA, que es más que suficiente para usar al MOSFET como elemento de conmutación, por lo que por ley de Ohm:

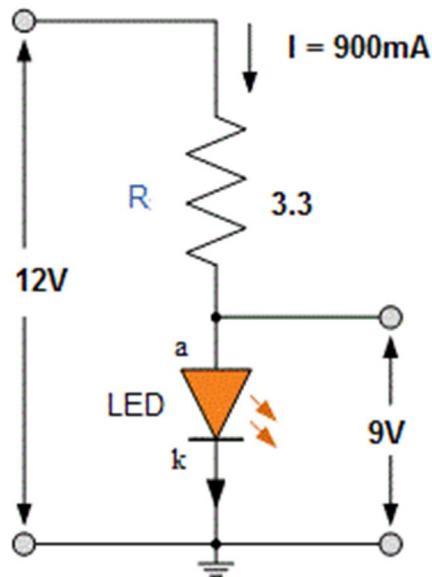
$$R = \frac{12 [V]}{0.01 [A]} = 1200 [\Omega]; \quad 1.2 [k\Omega], \text{ valor comercial.}$$

De este modo la etapa de potencia de DC queda de la siguiente manera Figura 5.3.9):



**Figura 5.3.9. Etapa de potencia de DC.**

El bloque de Carga en la figura anterior representa el LED, que requerirá un resistor para limitar la corriente de alimentación. Las especificaciones del fabricante nos indican un valor de 9 [V] a 12 [V] de tensión de alimentación, y nosotros fijaremos el valor de corriente a 900 [mA], teniendo como resultado el circuito mostrado en la Figura 5.3.10.



**Figura 5.3.10. Diagrama del circuito para el LED**

Por ley de Ohm:

$$R = \frac{12 [V] - 9[V]}{0.9 [A]} = 3.3 [\Omega] \quad a \quad P = V_R I = (3 [V])(0.9 [A]) = 2.7 [W]; \quad 5[W] \text{ valor comercial}$$

#### 5.4 Integración de los elementos del sistema.

Protocolo I2C

El protocolo I2C fue desarrollado originalmente en el año de 1982 por Phillips para varios de sus chips. La especificación original permitía para 100 [kHz], y proporcionando 7 bits para direcciones, limitando el número de dispositivos conectados al bus a 112 (de las cuales algunas direcciones eran reservadas, por lo que nunca podrían usarse como direcciones I2C válidas). Para el año de 1992, se publica una especificación que agregaba un modo rápido de 400 [kHz] y un espacio para direcciones de 10 bits. Para los dispositivos de Arduino con el microcontrolador ATmega 328 tienen soporte para estas especificaciones.

Cada bus I2C consta de dos señales: **SCL (Structured Control Language o Lenguaje de control estructurado)** y **SDA (Synchronous Data Adapter o Adaptador de datos)**

**síncrono**). SCL es la señal de reloj, y SDA es la señal de datos. La señal de reloj siempre la genera el maestro del bus. La comunicación I2C es bastante compleja. La señalización debe cumplir con cierto protocolo para que los dispositivos en el bus lo reconozcan como comunicaciones I2C válidas. Afortunadamente, la mayoría de los dispositivos se encargan de todos los detalles complicados, lo que permite centrarse específicamente en los datos que se desea intercambiar.

Los paquetes se dividen en dos tipos de paquetes: un paquete de direcciones, donde el maestro indica a qué esclavo se dirige y uno o más paquetes de datos, que son los mensajes de 8 bits que pasa el maestro al esclavo o viceversa. Los datos se colocan en la línea SDA después de que SCL pasa a nivel bajo, y se muestrea después de que la línea SCL pasa a nivel alto. El tiempo entre el flanco de reloj y los datos de lectura/escritura se define por los dispositivos en el bus y variará de un chip a otro. A grandes rasgos, el funcionamiento de comunicación I2C se explica a continuación.

#### *Condición de inicio.*

Para iniciar el paquete de dirección, el dispositivo maestro deja la línea SCL en estado alto y luego pone a SDA en un estado bajo. Esto pone a todos los dispositivos en aviso de que una transmisión está a punto de comenzar.

#### *Paquete de dirección.*

El paquete de dirección siempre es el primero en cualquier nueva secuencia de comunicación. Para una dirección de 7 bits, primero se indica la salida del **MSB (More Significant Bit o bit más significativo)**, seguido por un bit R / W que indica si se trata de una operación de lectura (1) o de escritura (0).

El noveno bit del paquete se refiere al bit **ACK/NACK (Acknowledge/Non-Acknowledge o Reconocimiento/No-reconocimiento)**. Esto aplica para todos los paquetes sean de direcciones o datos. Una vez que se envían los primeros 8 bits del paquete, el dispositivo receptor tiene control de SDA. Si el dispositivo que recibe no pone en nivel bajo la línea SDA antes del noveno pulso de reloj, se puede inferir que el dispositivo en cuestión no recibió los datos o no supo cómo analizar el mensaje. En este caso el intercambio se detiene y le corresponde al maestro del sistema decidir cómo proceder.

#### *Paquete de datos.*

Después de que se haya enviado el paquete de dirección, los datos pueden comenzar a transmitirse. El maestro simplemente continuará generando pulsos de reloj a intervalos regulares, los datos serán colocados en la línea SDA por el maestro o el esclavo,

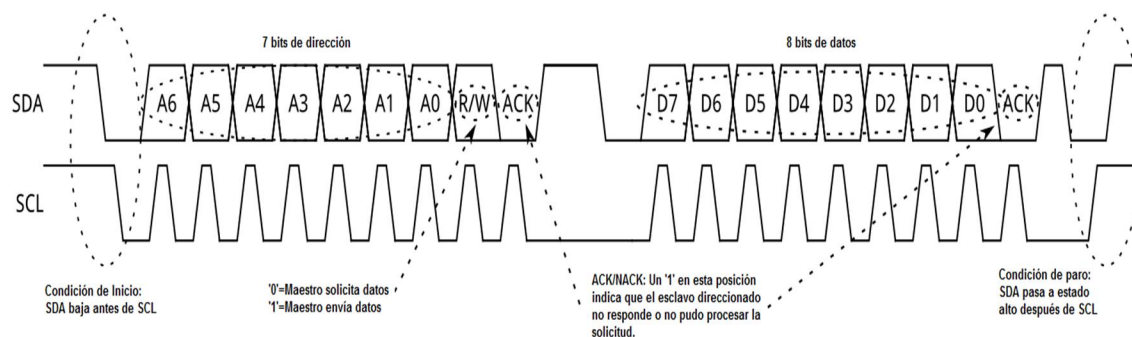


dependiendo si el bit R / W indicó una operación de lectura o escritura. El número de paquetes de datos es arbitrario.

### Condición de paro.

Una vez que se hayan enviado los paquetes de datos, el maestro generará una condición de paro. Las condiciones de paro se definen por una transición de un estado bajo a un estado alto de SCL seguida de una transición de un estado bajo a un estado alto de SDA. Durante la operación normal de escritura de datos, el valor de SDA no debe cambiar cuando SCL está en alto, para evitar condiciones de paro en falso.

A continuación, se muestra el esquema del funcionamiento básico del protocolo I2C en la Figura 5.4.1.



**Figura. 5.4.1. Funcionamiento básico de la comunicación I2C.**

La implementación de este protocolo de comunicación en Arduino se activa con las siguientes instrucciones:

```
#include <Wire.h>
```

La librería Wire permite la comunicación con dispositivos I2C. Sólo como referencia, la siguiente tabla muestra dónde se encuentran los pines I2C en algunas placas de Arduino.

**Tabla. 5.4.1. Pines de salida para comunicación I2C en tarjetas de Arduino**

| Tarjeta             | I2C pines                    |
|---------------------|------------------------------|
| Uno, Ethernet, Nano | A4 (SDA), A5(SCL)            |
| Mega2560            | 20(SDA), 21(SCL)             |
| Leonardo            | 2(SDA), 3(SCL)               |
| Due                 | 20(SDA), 21(SCL), SDA1, SCL1 |

Para inicializar la librería Wire se hace uso de la función *Wire.begin()*. Figura 5.4.2



```
sketch_jan31a Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_jan31a $
#include <Wire.h>

void setup() {
  Wire.begin();
}

void loop() {
}
```

**Figura. 5.4.2. Inicialización del bus I2C en Arduino.**

#### *Configuración del sensor de temperatura y humedad SHT31.*

En la configuración del sensor de temperatura y humedad es necesario recurrir a la librería *Wire.h* ya que este sensor está adaptado para trabajar en protocolo I2C. La librería *Adafruit\_SHT31.h*, tiene las instrucciones y operaciones que debe llevar a cabo el sensor para obtener las lecturas de temperatura y humedad.

Posteriormente se crea un Objeto *Adafruit\_SHT31* llamado *sht31*, no hay pines a establecer ya que se utiliza el Bus I2C. El sensor se inicializa con *sht31.begin(0x44)*, esta dirección es con la que cuenta el dispositivo por defecto, es posible obtener otra dirección y tener conectados dos sensores de este tipo dentro del bus, en cuyo caso dentro de los paréntesis deberá ir indicada la otra dirección (0x45). La función *sht.begin(0x44)* regresa un True si el sensor se encontró y respondió correctamente, en su defecto regresará un False.

Una vez inicializado es posible consultar la temperatura en °C con *sht31.readTemperature()*, esta función devolverá la temperatura en punto flotante (decimal +fraccionario). En caso de requerirse la temperatura en grados Fahrenheit

bastará con multiplicar el resultado por 1.8 y sumando 32. La lectura de la humedad es igualmente simple, se llama a la función `sht31.readHumidity()`, esta función de igual manera regresa el valor de humedad en punto flotante entre 0 y 100, en % de humedad.

Es posible reiniciar el sensor con la función `sht31.reset()`. Además, el sensor cuenta con un calentador integrado que se utiliza para calentar/evaporar cualquier condensación o escarcha que se pueda formar. Es posible activarlo o desactivarlo con `sht31.heater(true)` y `sht31.heater(false)` respectivamente. Figura 5.4.4.

```
#include <Wire.h>
#include "Adafruit_SHT31.h"
Adafruit_SHT31 sht31 = Adafruit_SHT31();

void setup() {

  Wire.begin();
  sht31.begin(0x44);

}

void loop() {

  float t = sht31.readTemperature();
  float h = sht31.readHumidity();

}
```

**Figura. 5.4.3. Utilización del sensor de temperatura y humedad SHT31**

Configuración del sensor de iluminación TSL2561.

El protocolo de comunicación en este sensor es de igual manera I2C, por lo que la librería `Wire.h` es integrada. La librería que controla el funcionamiento del sensor es la `SparkFunTSL2561.h`. Es necesario crear un Objeto `SFE_TSL2561` llamado "light" con la expresión `SFE_TSL2561 light`; de este modo la librería reconoce que habrá un sensor conectado.

Este dispositivo permite configurar la ganancia y los tiempos de integración para las lecturas, configuraciones que determinaremos por medio de las variables `gain` y `ms`. La función `light.begin()`; Inicializa el sensor pero en este momento no hace ninguna lectura. El sensor tiene disponibles 2 modos de ganancia `1X` y `16X`, en este caso se activa la que

el fabricante determina por defecto que es  $1X$ , por lo que se le asigna a la variable *gain* el valor de  $0$ , para ganancia  $16X$  bastará asignar a esta variable el valor  $1$ . El tiempo de integración tiene 4 modos de ajuste, la variable *time* se encarga de configurar esos tiempos dentro la función *setTiming()*;

Si *time* =  $0$ , la integración será de  $13.7$  [ms].

Si *time* =  $1$ , la integración será de  $101$  [ms].

Si *time* =  $2$ , la integración será de  $402$  [ms].

Si *time* =  $3$ , Se utiliza inicialización/paro manual para realizar nuestro propio tiempo de integración.

Si el valor de **time** es  $3$ , se tendrá que asignar un valor a *ms*, valor que determinaremos según el tiempo de integración que deseemos.

Los datos de configuración son recibidos por la función *light.setTiming(gain, time, ms)*;. Para comenzar a tomar mediciones se utiliza la función *light.setPowerUp()*;

El sensor cuenta con dos sensores de luz, uno para luz visible y otro para luz infrarroja ambos son indispensables para hacer el cálculo de lux, para obtener esa información se declaran las variables *data0* y *data1*. La función *light.getData(data0, data1)*; recupera la información de ambos sensores. Para calcular los lux, se pasan todas las configuraciones y lecturas a la función *getLux()*;. La función *getLux()*; regresará  $1$  si el cálculo fue exitoso, y  $0$  si uno o ambos sensores están saturados, si esto ocurre se puede reducir el tiempo de integración y/o la ganancia. La expresión *good = light.getLux(gain, ms, data0, data1, lux)*; regresa la medición de lux en la variable del mismo nombre y un  $1$  a la variable *good* si el cálculo fue exitoso. Figura 5.4.5.

```

#include <SparkFunTSL2561.h>
#include <Wire.h>
SFE_TSL2561 light;

boolean gain;
unsigned int ms;
void setup() {
    Wire.begin();
    light.begin();
    gain = 0;
    unsigned char time = 2;
    light.setTiming(gain, time, ms);
    light.setPowerUp();
}
void loop() {
    unsigned int data0, data1;
    double lux;
    boolean good;
    good = Light.getLux(gain, ms, data0, data1, lux);
}

```

**Figura. 5.4.4. Utilización del sensor de iluminación TSL2561.**

#### *Configuración del display LCD 20X4.*

Los LCD alfanuméricos 20X4 más utilizados en el mercado son los *LCD204*. Estos displays están basados en el controlador *HD44780U* de HITACHI, que cuenta con una memoria ROM que le permite tener un total de 240 diferentes caracteres. Para su control se requieren de 7 a 11 pines del microcontrolador, lo que es una desventaja para microcontroladores con un número de puertos limitados. La solución a este inconveniente es la utilización de un módulo adaptador LCD a I2C, un módulo basado en el controlador *PCF8574*, que no es más que un dispositivo que nos permite expandir entradas y salidas digitales controlado por medio de un bus I2C, pero el diseño del módulo está especialmente enfocado para controlar un LCD alfanumérico.

La librería que controla el módulo es *LiquidCrystal\_I2C.h*, la cual crea un objeto llamado *lcd*, y en donde se introducen los parámetros internos para la conexión del display, dependiendo del controlador, esos parámetros cambiarán, para el caso del *PCF8574*, son los siguientes (Figura 5.4.6):

*LiquidCrystal\_I2C lcd (0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);*

Posteriormente se inicializa el display con la función *lcd.begin()*; donde el parámetro que recibe son las menciones del display, en este caso 20X4.

Otras funciones con las que es compatible la librería:

*lcd.clear()*; Borra la pantalla LCD y posiciona el cursor en la esquina superior izquierda (0,0).

*lcd.print()*; Escribe un texto o mensaje en el LCD.

*lcd.setCursor(col, row)*; Posiciona el cursor del LCD en la posición indicada por (col, row).

*lcd.scrollDisplayLeft()*; Desplaza el texto y cursor un espacio a la izquierda.

*lcd.scrollDisplayRight()*; Desplaza el texto y cursor un espacio a la derecha.

*lcd.backlight()*; Enciende la luz de fondo del LCD.

*lcd.noBacklight()*; Apaga la luz de fondo del LCD.

*lcd.createChar(núm, datos)*; Crea un carácter personalizado para su uso en la pantalla LCD. Se admiten hasta 8 caracteres de 5X8 pixeles, donde *núm* es el número de carácter y *datos* es una matriz que contiene los pixeles del carácter.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

void setup() {
  Wire.begin();
  lcd.begin(20, 4);
}

void loop() {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("LCD por I2C");
}
```

**Figura. 5.4.5. Utilización del display LCD con interfaz I2C**

Cruce por cero y control de etapa AC.

El programa está preparado para recibir un pulso de la etapa detectora de cruce por cero, este pulso se utiliza para garantizar el correcto funcionamiento de las etapas de potencia que controlan al ventilador y al calefactor. Para este efecto el programa adjunta una interrupción al microcontrolador. Cuando un evento dispara una interrupción, la ejecución normal del microcontrolador se suspende (ordenadamente para poder volver) y salta a ejecutar una función especial. Cuando la función finaliza, el procesador vuelve tranquilamente al punto donde lo dejó y sigue con lo que estaba como si no hubiese pasado nada. En el programa se declara el pin 3 de la placa como entrada de la señal de cruce por cero, que se asigna a la función *detec\_cruce* con una condición de disparo *HIGH*. La función adjunta tiene como función alertar de que se ha detectado un cruce por cero volviendo verdadera la variable *cruce\_cero*, reiniciando el contador e igualando a cero el contador para la señal de salida y dejando en estado bajo a la señal de salida *AC\_pin1*. Figura 5.4.6.

```
volatile int i=0;
volatile boolean cruce_cero = false;
int AC_pin1 = 5;

void setup()
{

pinMode(AC_pin1, OUTPUT);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), detec_cruce, HIGH);

}

void detec_cruce(){
  cruce_cero = true;
  i=0;
  digitalWrite(AC_pin1, LOW);
}
```

**Figura 5.4.6. Implementación de la función de cruce por cero.**

Una vez que se ha detectado un cruce por cero, la condición se vuelve positiva y otra función entra en acción. Su función es proporcionar en el momento adecuado una señal para que la etapa de potencia pueda variar la velocidad de los ventiladores y la

temperatura en el caso del calefactor. Se adjunta una interrupción a un contador, que dependerá del valor que el sistema asigne a la variable **dim1**, cuando esta condición se cumpla la salida tendrá un estado alto, se reiniciará la variable **i** y se pondrá la condición de cruce por cero en falso hasta el próximo cruce por cero. Figura 5.4.7.

```
#include <TimerOne.h>
int Paso = 83;

void setup()
{
  Timer1.initialize(freqStep);
  Timer1.attachInterrupt(dim_check1, freqStep);
}

void AC_salida() {
  if(cruce_cero == true) {
    if(i>=dim1) {
      digitalWrite(AC_pin1, HIGH);
      zero_cross1 = false;
      i=0;}
    else i++;}
}
```

**Figura 5.4.7. Implementación del mecanismo de control para etapa de AC.**

## **5.5 Desarrollo del sistema de seguridad.**

La temperatura representa un factor determinante en las plantas para que presenten y manifiesten adecuadamente procesos como división celular, fotosíntesis, respiración, acumulación de azúcares, absorción de nutrientes entre otros. Así mismo la temperatura puede ser en determinados casos una barrera para el adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas.

Es necesario generar dentro del programa un mecanismo para la protección de las plantas por si el sistema o algún elemento fuera del microcontrolador llegase a fallar, evitando de ese modo que las plantas dentro del invernadero puedan sufrir estrés o daño celular.

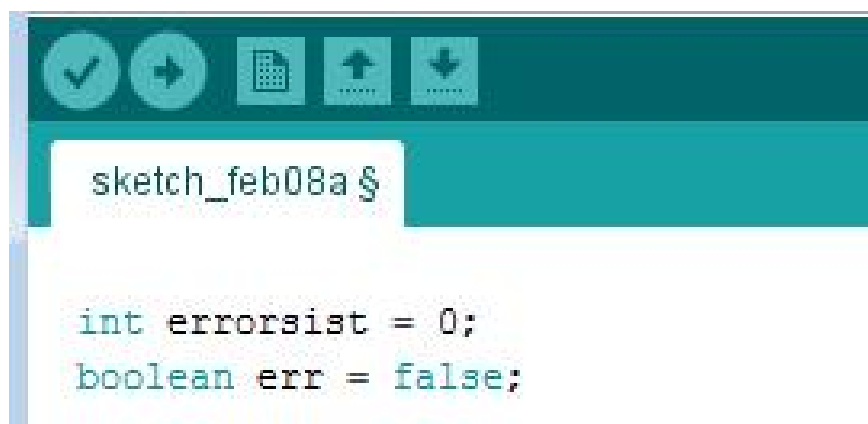


La máxima temperatura que se fijará es de 30°C, mientras que la mínima será de 10°C. Para estos límites las plantas aún no sufren daño celular, pero los procesos metabólicos de la planta comienzan a verse afectados.

Dentro del código la forma de evitar que los actuadores continúen elevando o disminuyendo la temperatura es teniendo el control sobre las variables de salida que controlan directamente a las etapas de potencia de cada actuador. La variable que controla los ventiladores está definida como *dim1*, que puede tener un valor de 0 – 100 (0 encendido, 100 apagado). La variable que controla al calefactor está definida como *dim2* y posee el mismo intervalo que *dim1*. El valor que tendrán estas variables es determinado por el sistema a través de *g\_fisOutput[1]* y *g\_fisOutput[2]*. Mientras estos límites no se sobrepasen, la asignación de valores no tendrá modificación y el sistema tendrá el control, de lo contrario se asignarán valores predeterminados para contrarrestar un máximo o un mínimo de temperatura. Mientras este mecanismo actúa, el sistema aún tendrá el control de la variable que modifica la intensidad luminosa del LED.

Si la falla persiste en más de tres ocasiones, significará que el sistema no es capaz de funcionar adecuadamente y los valores *dim1* y *dim2* tendrán un valor equivalente a apagado.

Para poder implementar el sistema de seguridad, primero se requiere declarar la variable que lleve la cuenta de las veces que el error ocurre en el sistema. Figura 5.5.1.

A screenshot of an IDE's code editor window. The window title is "sketch\_feb08a \$". The code contains two lines of C++ declarations: "int errorsist = 0;" and "boolean err = false;". The editor has a dark teal background with a toolbar at the top containing icons for check, back, search, forward, and refresh. The code is displayed in a light blue font on a white background within the editor area.

```
int errorsist = 0;
boolean err = false;
```

**Figura 5.5.1. Declaración de variables para la detección de persistencia de error.**

El sistema de seguridad deshabilitara el control cuando la temperatura sea menor de 15°C y mayor a 30°C, en el primer caso cuando la temperatura está por debajo de los 15°C, se apagaran los ventiladores y se pondrá a trabajar al 40% de su capacidad a la resistencia, para de esta forma elevar la temperatura y una vez que esta esté dentro del rango de seguridad, el control volverá a tomar el control; en el segundo caso cuando la temperatura es mayor se realiza el procedimiento inverso, el cual consta en deshabilitar la resistencia y poner a trabajar a su máxima capacidad a los ventiladores, de esta forma obtendremos un flujo de aire fresco dentro del invernadero, así se lograra reducir la temperatura hasta que el control tome el mando del invernadero. Figura 5.5.2

```
if(t>=30){
    dim1=0;
    dim2=100;
    pwm1 = g_fisOutput[2];
    err = true;
}
if(t<=15){
    dim1=100;
    dim2=60;
    pwm1 = g_fisOutput[2];
    err = true;
}
dim1 = 100 - g_fisOutput[1];
dim2 = 100- g_fisOutput[0];
pwm1 = g_fisOutput[2];
```

### Figura 5.5.2. Implementación de mecanismo de seguridad

Si el error es persistente se mandará un error de sistema cuando se presente el tercer error, esto como medida de prevención de daños al cultivo, de esta forma el usuario podrá revisar si es que existe algo que pudiera estar afectando los sensores. Figura 5.5.3.

```

if (err = true){
  errorsist++;
  err = false;
}
if (errorsist = 3){
  dim1=100;
  dim2=100;
  pwm1 = 0;
  lcd.setCursor(7,3);
  lcd.print("Error Sist.");
}
}

```

**Figura 5.5.3. Mensaje de error.**

La Humedad Relativa (HR) es otro factor importante para el buen desarrollo de una planta, si la humedad es alta el uso del agua por la planta es lenta, existe una deficiencia de nutrientes y la proliferación de enfermedades. Así como para el control de la temperatura, es necesario desarrollar un sistema que permita controlar un exceso de humedad dentro del invernadero. Un aumento de más del 60% de HR, compromete el correcto desarrollo de la planta, por lo que el sistema alertará de este aumento y trabajará en disminuirla hasta un 40% de HR, luego de lo cual el sistema volverá a retomar el control de los actuadores. Cuando la HR llegue a nivel de 60% los ventiladores del invernadero funcionaran a toda su capacidad y el resistor se apagará hasta que la HR llegue a un 40%. Figura 5.5.4.

```

if(h>=60 && h<=40){
  dim1=0;
  dim2=100;
  pwm1 = g_fisOutput[2];
  lcd.setCursor(7,3);
  lcd.print("HR Alta");
}
}

```

**Figura 5.5.4. Mecanismo de alarma para HR mayor a 60%.**

En el diseño del programa, es necesario incluir un mecanismo de apagado y encendido de la iluminación LED, ya que en determinado momento la planta requiere cambiar de funciones metabólicas, y el responsable de este cambio es el fotoperiodo. A pesar de que el LED que elegimos está diseñado para aportar la radiación que la planta requiere para su crecimiento, no deja de ser radiación suplementaria y es necesario que la planta esté expuesta por lo menos 14hrs a esta luz para que la planta pueda realizar todas sus funciones dentro del fotoperiodo.

Para poder llevar una cuenta del tiempo sin retrasos generados por desfases dentro del programa, la solución es implementar un **RTC (Real Time Counter o contador de tiempo real)**. Es un circuito electrónico especializado cuya función es mantener la hora y fecha actual en un sistema informático (ya sea con microcontrolador u otro tipo de CPU). Se caracteriza por tener un bajo consumo de energía y una fuente propia de alimentación auxiliar. Al recurrir a este tipo de circuitos integrados es de esperar que se obtenga una mejor precisión en la cuenta del tiempo. La librería ocupada para el manejo de este RTC es *RTClib.h* y como en otras librerías es necesario crear un objeto *RTClib* del tipo *RTC\_DS1307* llamado *RTC*, para luego tomar esa información con la función *DateTime now = RTC.now()*, que nos proporcionará la fecha y hora en ese momento, y de los cuales sólo necesitaremos la información de la hora, que es almacenada en la variable *tiempo*. El margen fijado en el programa para abarcar las 14 horas es de 6am a 8pm. Mientras el programa esté entre estos límites el sistema tendrá el control de la variable *pwm1* mediante *g\_fisOutput[2]*, si está fuera el LED se apagará asignando 0 a *pwm1*. Figura 5.5.5.

```
-  
#include "RTClib.h"  
RTC_DS1307 RTC;  
  
int tiempo = 0;  
  
void setup() {  
  RTC.begin();  
}  
  
void loop() {  
  DateTime now = RTC.now();  
  tiempo = now.hour();  
  if (tiempo >= 6 && tiempo <= 20) pwm1 = g_fisOutput[2];  
  else pwm1 = 0;  
}
```

**Figura 5.5.5.** Implementación del mecanismo de apagado y encendido de la luz LED.

## 5.6 Pruebas y resultados.

Una vez implementado todo el sistema se realizaron pruebas del funcionamiento del sistema completo, teniendo como referencia un termómetro digital como valor patrón, para poder asegurar que nuestro sistema nos de mediciones dentro de un rango menor del 5% de error, una vez corroborado esto, se procedió a realizar lo mismo con las demás variables con otros analizadores, ya que sabemos que nuestro sistema censa bien las entradas podemos iniciar las mediciones desde una temperatura menor y mayor del valor óptimo, se tomaron las siguientes mediciones, las cuales se compararon contra los valores en simulaciones en Matlab.

**Tabla 5.6.1. Valores del sistema vs valores simulados**

| T     | % V | % R | % Vt | % Rt | % Ea V | % Ea R |
|-------|-----|-----|------|------|--------|--------|
| 5.98  | 20  | 31  | 22.6 | 31   | 2.6    | 0      |
| 7.04  | 20  | 31  | 22.6 | 31   | 2.6    | 0      |
| 8.48  | 20  | 31  | 22.6 | 31   | 2.6    | 0      |
| 9.16  | 20  | 31  | 22.6 | 31   | 2.6    | 0      |
| 10.32 | 20  | 31  | 23.3 | 30.3 | 3.3    | -0.7   |
| 10.83 | 21  | 31  | 24.5 | 29.2 | 3.5    | -1.8   |
| 11.32 | 22  | 30  | 25.6 | 28.3 | 3.6    | -1.7   |
| 11.83 | 24  | 29  | 26.8 | 27.3 | 2.8    | -1.7   |
| 12.27 | 25  | 28  | 27.9 | 26.5 | 2.9    | -1.5   |
| 12.68 | 26  | 27  | 28.9 | 25.8 | 2.9    | -1.2   |
| 13.06 | 28  | 26  | 29.8 | 25.1 | 1.8    | -0.9   |
| 13.45 | 29  | 26  | 30.7 | 24.5 | 1.7    | -1.5   |
| 13.85 | 30  | 25  | 31.8 | 23.8 | 1.8    | -1.2   |
| 14.23 | 31  | 24  | 32.7 | 23.2 | 1.7    | -0.8   |
| 14.59 | 32  | 24  | 33.4 | 22.8 | 1.4    | -1.2   |
| 14.88 | 33  | 23  | 34.5 | 22.2 | 1.5    | -0.8   |

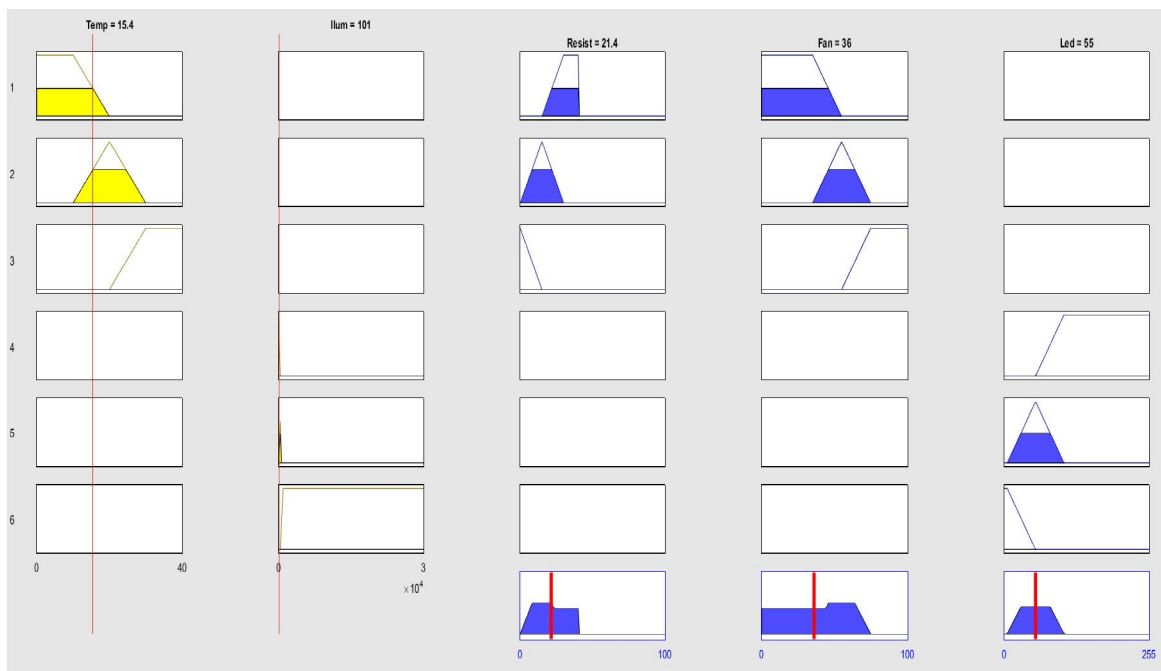
|       |    |    |      |      |      |      |
|-------|----|----|------|------|------|------|
| 15.17 | 34 | 23 | 35.3 | 21.8 | 1.3  | -1.2 |
| 15.44 | 35 | 22 | 36   | 21.4 | 1    | -0.6 |
| 15.72 | 36 | 22 | 36.9 | 21   | 0.9  | -1   |
| 15.97 | 36 | 22 | 37.6 | 20.6 | 1.6  | -1.4 |
| 16.26 | 37 | 21 | 38.5 | 20.2 | 1.5  | -0.8 |
| 16.5  | 38 | 21 | 39.3 | 19.9 | 1.3  | -1.1 |
| 16.74 | 39 | 20 | 40.1 | 19.5 | 1.1  | -0.5 |
| 16.98 | 40 | 20 | 40.9 | 19.2 | 0.9  | -0.8 |
| 17.22 | 41 | 20 | 41.7 | 18.9 | 0.7  | -1.1 |
| 17.44 | 42 | 19 | 42.5 | 18.6 | 0.5  | -0.4 |
| 17.65 | 43 | 19 | 43.3 | 18.3 | 0.3  | -0.7 |
| 17.86 | 44 | 19 | 44.1 | 18   | 0.1  | -1   |
| 18.05 | 44 | 18 | 44.9 | 17.7 | 0.9  | -0.3 |
| 19.03 | 50 | 17 | 49.4 | 16.4 | -0.6 | -0.6 |
| 20.01 | 56 | 16 | 55   | 15   | -1   | -1   |
| 21.01 | 61 | 15 | 58.8 | 14.9 | -2.2 | -0.1 |
| 22.01 | 64 | 15 | 62.1 | 14.6 | -1.9 | -0.4 |
| 22.8  | 67 | 15 | 64.4 | 14.3 | -2.6 | -0.7 |
| 24    | 70 | 14 | 67.7 | 13.7 | -2.3 | -0.3 |
| 25.03 | 72 | 13 | 70.3 | 12.9 | -1.7 | -0.1 |
| 26.01 | 75 | 12 | 72.6 | 12.1 | -2.4 | 0.1  |
| 27.01 | 78 | 11 | 75   | 10.9 | -3   | -0.1 |
| 28.07 | 81 | 9  | 77.6 | 9.32 | -3.4 | 0.32 |
| 28.59 | 84 | 8  | 78.8 | 8.34 | -5.2 | 0.34 |
| 28.87 | 85 | 7  | 79.5 | 7.75 | -5.5 | 0.75 |
| 29.3  | 87 | 6  | 80.6 | 6.73 | -6.4 | 0.73 |

Donde:

- T es la temperatura medida.
- % V es el porcentaje de trabajo del ventilador.

- % R es el porcentaje de trabajo del resistor.
- % Vt es el porcentaje de trabajo teórico del ventilador.
- % Vr es el porcentaje de trabajo teórico del resistor.
- % Ea V es el porcentaje del error absoluto del ventilador.
- % Ea R es el porcentaje del error absoluto del resistor.

Para las simulaciones del sistema del control difuso se utilizó el programa Matlab, con el cual se pudo hacer la evaluación en diferentes valores de temperatura e iluminación como se muestra en la figura 5.6.2, el cual se comparó con los valores obtenidos con el prototipo del sistema (Figura 5.6.3.), con lo cual se puede observar que los valores no difieren mucho de los obtenidos en las simulaciones.



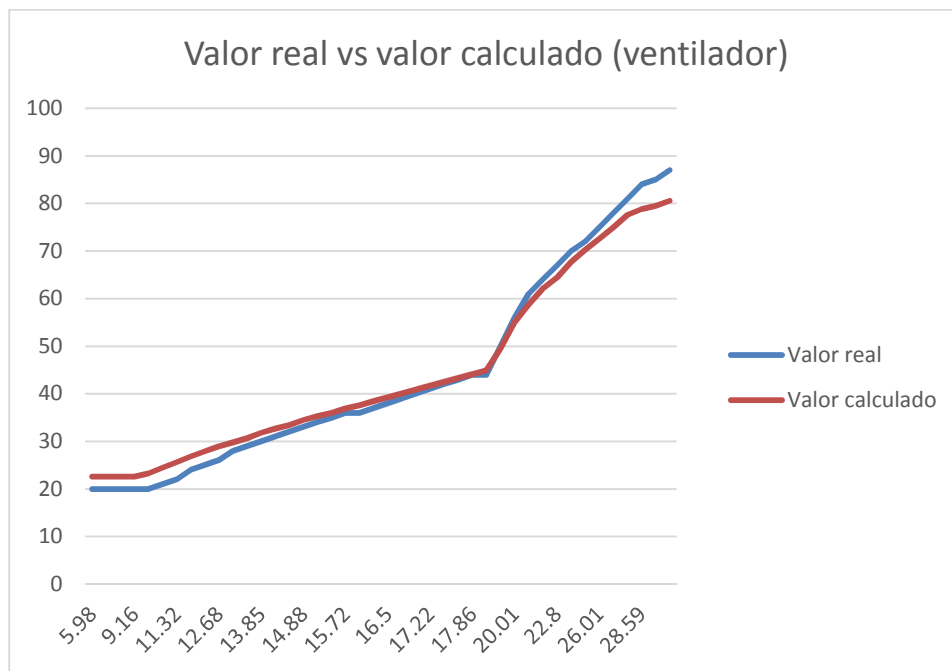
**Figura 5.6.1. Evaluación de reglas en Matlab.**



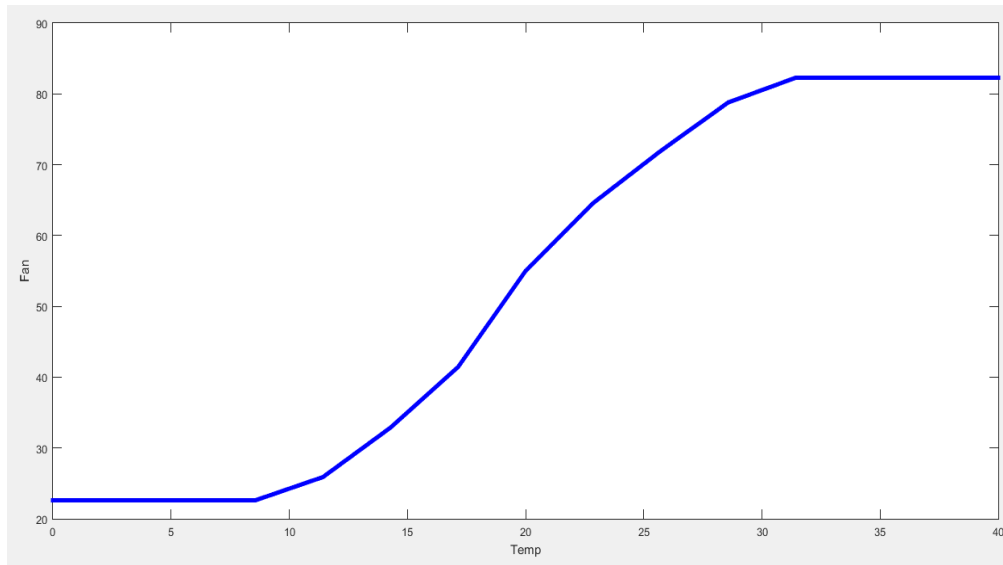


**Figura 5.6.2. Resultados obtenidos por el sistema.**

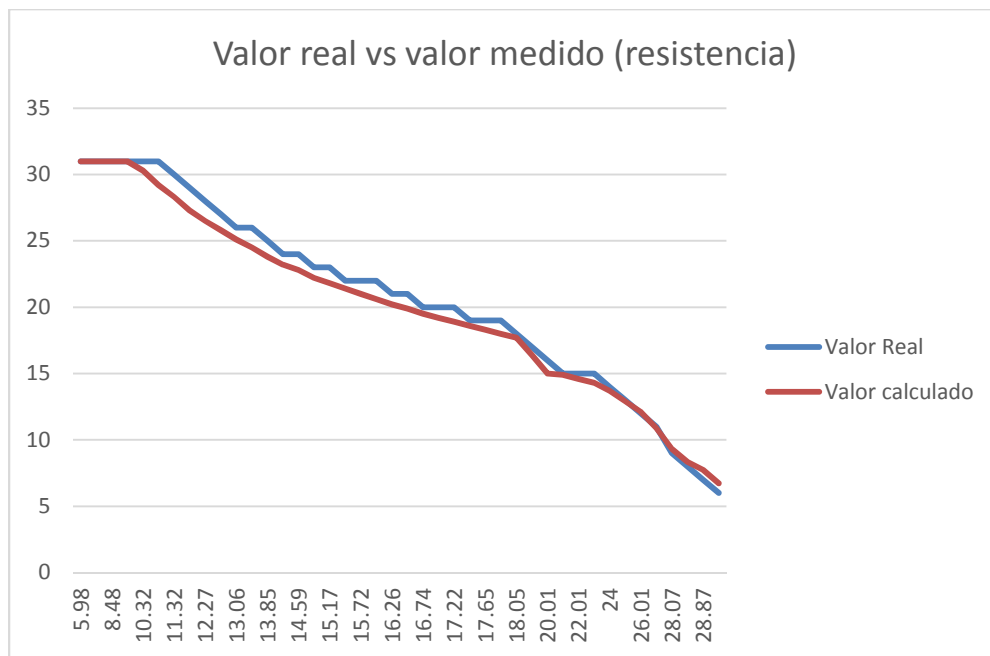
Por lo que se puede apreciar los valores obtenidos se asemejan mucho a los valores teóricos, por lo que podemos decir que nuestro sistema cumple con las características especificadas, al momento de comparar el comportamiento del sistema con las simulaciones se tienen las siguientes graficas (Figura 5.6.4, 5.6.5, 5.6.7 y 5.6.8):



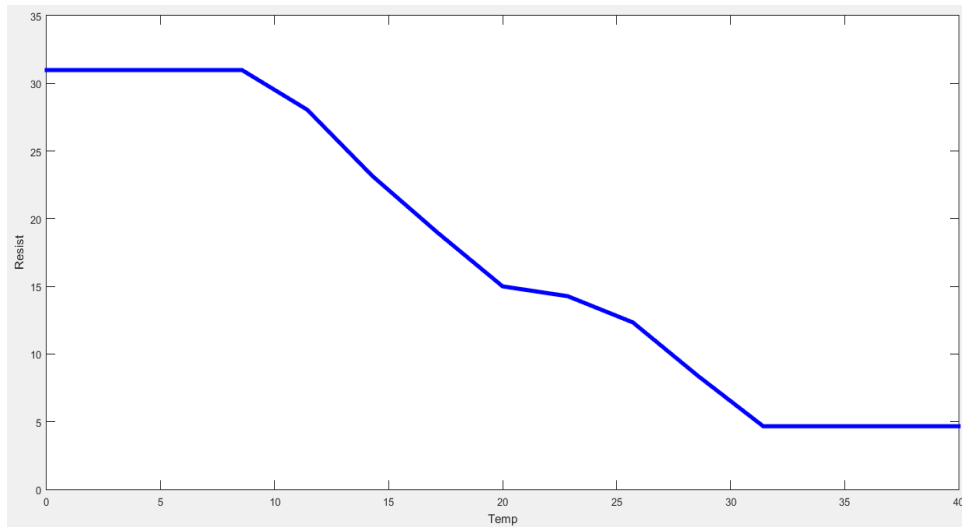
**Figura 5.6.3. Comparación de la respuesta del ventilador**



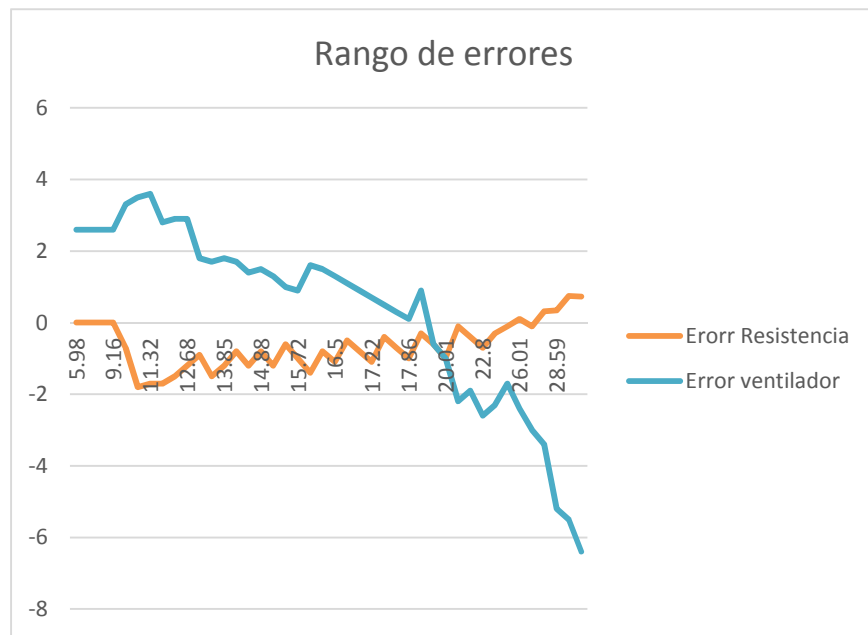
**Figura 5.6.4. Curva de salida del sistema en simulación con Matlab para ventiladores.**



**Figura 5.6.5. Comparación de la respuesta del resistor.**



**Figura 5.6.6. Curva de salida del sistema en simulación con Matlab para resistor.**

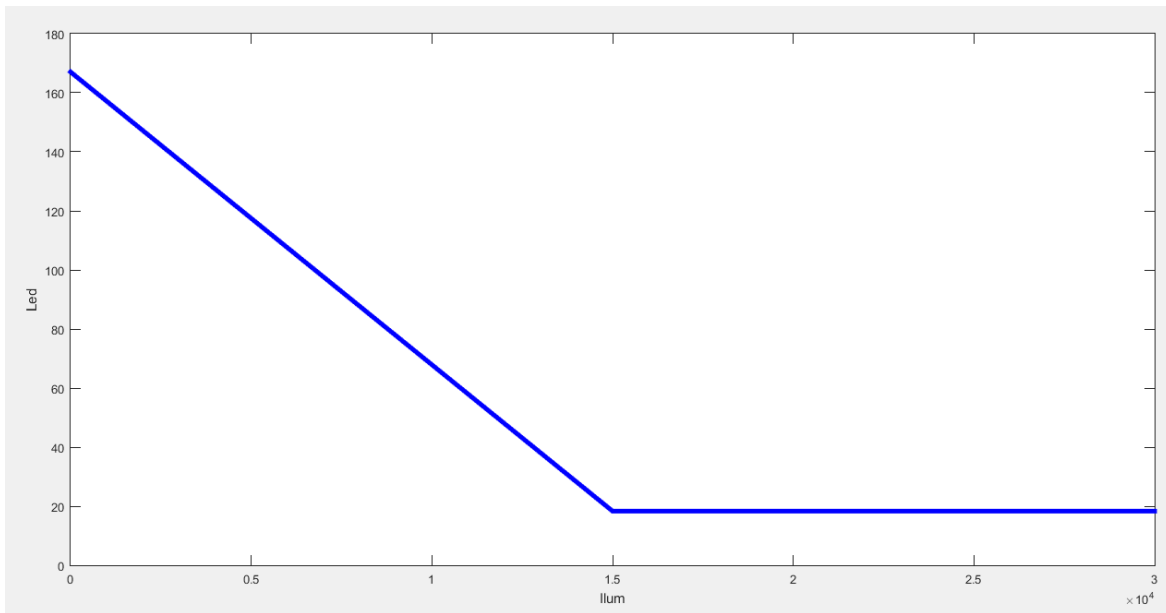


**Figura 5.6.7. Rango de errores.**

Como se puede observar de las gráficas la aproximación del sistema resistivo es una mejor aproximación que el sistema con carga inductiva, como lo es en el caso de los ventiladores, con lo que podemos asumir que su comportamiento es casi lineal como se puede ver en la gráfica generada con Matlab, a diferencia del comportamiento del

ventilador que no es lineal, es por eso que de la gráfica de errores se observa un mayor error en la parte no lineal del control, que están situados en los extremos de la gráfica.

Por otra parte, tenemos el control de iluminación en este caso el sistema por tener un rango muy amplio parece ser lineal a pedazos como se puede apreciar en la Figura 5.6.8.



**Figura 5.6.8. Gráfica del control de iluminación.**

Pero en el momento de realizar las mediciones se obtuvieron que en intervalos grandes no varían los valores del PWM por lo cual solo se mencionan los intervalos donde se pueden observar los cambios.

**Tabla 5.6.2. Rango del sensor y salida del PWM**

| Sensor      | PWM      | PWM t       |
|-------------|----------|-------------|
| 0 - 99      | 167 - 54 | 168 - 54    |
| 100 - 400   | 55       | 55          |
| 401 - 500   | 55 - 25  | 55 - 24,9   |
| 501 - 30000 | 25 - 17  | 24,9 - 17,7 |

Donde:

- PWM es el valor del PWM del sistema en un intervalo de 0 a 255
- PWM t es el valor obtenido por simulación en Matlab.

De donde podemos observar que nuestro sistema se comporta como lo establecido por el control difuso ya que el comportamiento descrito por la gráfica de Matlab nos da un comportamiento lineal, de esta forma se mantiene un rango de error reducido y en este caso el error esta dado solo por la resolución que da nuestro código, ya que no se muestran valores decimales.

### **5.7. Manual de mantenimiento.**

Las causas principales de los posibles accidentes en equipos eléctricos y electrónicos pueden ser múltiples y pueden tener orígenes diversos como son:

Fallos debido a las condiciones de trabajo a las que están sometidas y que pueden dar lugar a fenómenos de corrosión, desgaste de las partes rotativas, fatiga de los materiales, daños y deformaciones en las partes internas o ensuciamiento, desviaciones de las condiciones normales de operación, errores humanos en la identificación de materiales, componentes, injerencias de agentes externos al proceso y fallos de gestión u organización, entre otros. Antes de que estos aspectos afecten a la seguridad del equipo y a las personas es necesario llevar a cabo una atención y mantenimiento de la misma.

Así pues, es importante que se lleve a cabo un programa de mantenimiento preventivo y correctivo, esto evitara gastos innecesarios para la reparación del invernadero.

Toda la información generada como resultado de los distintos tipos de revisiones que puedan afectar a las condiciones de funcionamiento seguro del equipo, deberá ser conocidas por el servicio preventivo cuando exista y el servicio de mantenimiento o correctivo, debiendo organizar y controlar los trabajos.

Los pasos para dar mantenimiento preventivo al invernadero son:

Inspección de condiciones ambientales

Observar las condiciones del ambiente en las que se encuentra el equipo, ya sea en funcionamiento o en almacenamiento. Los aspectos que se recomienda evaluar son: Humedad (Arduino, Display y etapa de potencia), exposición a vibraciones mecánicas (Ventiladores), presencia de polvo (equipo eléctrico general), y temperatura (etapas de potencia).

#### Limpieza integral externa

Eliminar cualquier vestigio de suciedad, desechos, polvo, moho, hongos, etc., en las partes externas que componen al equipo, mediante los métodos adecuados según corresponda.

#### Inspección externa del equipo

Examinar o reconocer atentamente el equipo, partes o accesorios que se encuentran a la vista, sin necesidad de quitar partes, como son el conector de alimentación (para detectar signos de corrosión), impactos físicos, desgastes (en el caso de ventiladores), sobrecalentamiento, roturas, fugas, partes faltantes, o cualquier signo que obligue a sustituir las partes afectadas o a tomar alguna acción pertinente al mantenimiento preventivo.

#### Limpieza integral interna

Eliminar cualquier vestigio de suciedad, desechos, polvo, moho, hongos, etc., en las partes internas que componen al equipo, mediante los métodos adecuados según corresponda.

#### Inspección interna

Examinar o reconocer atentamente las partes internas del equipo y sus componentes, para detectar signos de corrosión, sobrecalentamiento, roturas, caídas de tensión, partes faltantes, o cualquier signo que obligue a sustituir las partes afectadas o a tomar alguna acción pertinente al mantenimiento preventivo.

#### Lubricación

Verificar que los ventiladores se encuentren girando a la par y sin ningún tipo de forzamiento.

#### Ajuste y verificación de sensores

Para esto deberá tomarse en cuenta lo observado anteriormente en la inspección externa e interna del equipo, y realizar mediciones de los parámetros más importantes de éste, de modo que éste sea acorde a las especificaciones del fabricante, o de tal forma confirmar que cumpla según lo establecido para el crecimiento del ecosistema dentro del invernadero de no ser así, es necesario detectar cualquier falta de ajuste y calibración

Luego de esto debe realizarse la calibración o ajuste que se estime necesaria.

Se deberán realizar las mediciones de los parámetros correspondientes, estas dos actividades serán necesarias hasta lograr que el equipo no presente signos de desajuste o falta de calibración.

Revisión de seguridad eléctrica

La realización de esta prueba dependerá del grado de protección y alimentación que se suministra al equipo en cuestión, especificadas por sus fabricantes como son los sensores, leds, ventiladores, así como las resistencias.

Pruebas funcionales completas

Confirmar que cumpla los voltajes y caídas de tensión en todas sus salidas y entradas del equipo eléctrico (como son los 12 [V] de la fuente de alimentación de directa y la entrada de 127 [Volts] de alterna en la entrada a los Dimmers) además será necesario confirmar que el sistema de alerta miento como lo es el reloj opere según lo programado en tiempo de operación

## **5.8. Costo y evaluación del proyecto**

En cualquier empresa, grande o pequeña, establecida o de reciente creación, la gestión óptima de los recursos permitirá invertir de manera inteligente, ya sea para el desarrollo de nuevos productos, la promoción de los existentes o la ejecución de los planes estratégicos de crecimiento.

Es necesario establecer que el sistema hidropónico sea atractivo en precio para justificar el gasto del proyecto. Por tal motivo damos como referencia los costos para la

fabricación de un invernadero prototipo, con las características ya mencionadas en los capítulos anteriores. En este caso omitimos los gastos de mano de obra con la finalidad de ver los beneficios en precio por materia prima, ya que estos son hechos con elementos muy baratos y amigables con el medio ambiente.

**Tabla 5.8.1. Costos del proyecto**

| <b>No.</b> | <b>MATERIAL</b>                             | <b>CANTIDAD</b>          | <b>PRECIO UNITARIO</b> | <b>PRECIO TOTAL</b> |
|------------|---|--------------------------|------------------------|---------------------|
| 1          | Tubería de PVC 1½"                          | 6 piezas de<br>3 m / Cu. | \$80                   | \$480               |
| 2          | Tubería de PVC de 4"                        | 8 piezas de<br>1 m / Cu. | \$35                   | \$280               |
| 3          | Codos de 90° de PVC de<br>1½"               | 6 piezas                 | \$5                    | \$30                |
| 4          | Tablas de madera triplay de<br>20 mm        | 3 piezas                 | \$40                   | \$120               |
| 5          | Codos tipo T de PVC de<br>1½"               | 4 piezas                 | \$3                    | \$12                |
| 6          | Codos tipo cruz de PVC de<br>1½"            | 6 piezas                 | \$3                    | \$18                |
| 7          | Soleras de acrílico de 5 mm<br>por 3 metros | 1 piezas                 | \$12                   | \$12                |
| 8          | Arduino nano                                | 1 pieza                  | \$50                   | \$50                |
| 9          | Display de 20 x 4 con<br>protocolo I2C      | 1 pieza                  | \$80                   | \$80                |
| 10         | Opto acopladores                            | 2 piezas                 | \$10                   | \$20                |
| 11         | Integrado de Cruce por cero                 | 1 pieza                  | \$10                   | \$10                |



|    |  |           |       |       |
|----|--|-----------|-------|-------|
| 12 | Triac  | 2 piezas  | \$15  | \$30  |
| 13 | Mosfet canal N                                     | 1 pieza   | \$15  | \$15  |
| 14 | Resistencias varias para acoplamiento de potencia  | 6 piezas  | \$1   | \$6   |
| 15 | Capacitores  | 1 pieza   | \$1   | \$1   |
| 16 | Conectores múltiples para potencia y protocolo I2C | 6 piezas  | \$2   | \$12  |
| 17 | Gabinete para instalación de equipo                | 1 pieza   | \$150 | \$150 |
| 18 | Reloj para Arduino (sistema de seguridad)          | 1 pieza   | \$35  | \$35  |
| 19 | Botones de manipulación                            | 2 piezas  | \$2   | \$4   |
| 20 | Ventiladores                                       | 4 piezas  | \$100 | \$400 |
| 21 | Resistencias calefactoras                          | 6 piezas  | \$10  | \$60  |
| 22 | Sensor de iluminación                              | 3 piezas  | \$50  | \$150 |
| 23 | Sensor de temperatura y humedad                    | 1 pieza   | \$30  | \$30  |
| 24 | Diodo emisor de luz                                | 12 piezas | \$20  | \$240 |
| 25 | Nutrientes para hidroponía                         | 1 lata    | \$40  | \$40  |
| 26 | Espuma de retención de nutrientes 1m x 1m          | 1 pieza   | \$15  | \$15  |
| 27 | Cable calibre 4 x 22 AWG blindado para sensores    | 6 metros  | \$20  | \$120 |
| 28 | Cable unipolar calibre 18 AWG                      | 5 metros  | \$10  | \$50  |
| 29 | Tornillos y tuercas para propósitos generales      | Bolsa     | \$10  | \$10  |
| 30 | Semillas   | Bolsa     | \$30  | \$30  |
| 31 | Recubrimiento plástico para                        | Rollo     | \$90  | \$90  |

|  |              |  |  |                |
|--|--------------|--|--|----------------|
|  | invernaderos |  |  |                |
|  | <b>Total</b> |  |  | <b>\$2,600</b> |

Estos precios están sujetos al año que se expide dicha tesis, por lo que los precios pueden variar según el año de su fabricación, la oferta y demanda en el mercado de dicho material y precio del dólar

En estos datos no se consideró el sistema de riego, ya que no es parte del estudio en cuestión.

### **Conclusiones:**

Al comienzo de este proyecto se planteó resolver las necesidades de control de iluminación y temperatura de un invernadero, así como mandar una alarma cuando la humedad sale del rango deseado, para esto se utilizó un control difuso y de esta forma simplificar el diseño; para este propósito se requiere tener un conocimiento de los rangos óptimos en las salidas de nuestro sistema en ciertas circunstancias, además es necesario realizar pruebas antes de poder diseñar un control adecuado y así tener un sistema más eficiente en contraste con un control basado en comparadores, que al momento de llegar a un límite inferior realiza una acción y en caso contrario pasando del límite superior detienen esa acción, de esta forma en el caso del manejo del calefactor tenemos el problema de la inercia térmica, que es el incremento de la temperatura después de que la fuente de calor ha sido apagada, con un sistema basado en comparadores el sistema oscilaría en cambio con el control difuso evitamos ese inconveniente por el hecho de que al acercarse al valor de temperatura requerido se irá disminuyendo la potencia en el calefactor hasta llegar al punto óptimo.

A lo largo de este proyecto pudimos observar el comportamiento de nuestro sistema el cual se aproximó según lo esperado al comportamiento deseado, aunque en la parte no lineal el control excedió un poco la tolerancia en cuanto a la respuesta del control de los ventiladores, aunque esto no afectó al control de la temperatura y éste quedó dentro del rango establecido, el cual es el objetivo principal de todo el control, por lo que podemos decir que el sistema al no dar una respuesta dentro del rango de error en el sistema de

ventilación por separado, como conjunto el sistema cumple con tener los parámetros adecuados dentro del invernadero.

En la parte de iluminación tenemos una mejor respuesta ya que es un sistema lineal y nuestra salida se comportó de la misma manera, prácticamente sin variaciones, con esto podemos decir que un sistema difuso tiene una mejor aproximación si el comportamiento es lineal.

Por ultimo podemos decir que un sistema difuso para un control es una opción más eficiente energéticamente en comparación de un sistema a base de comparadores de ventana, ya que en el caso del comparador tanto el resistor y los ventiladores trabajan a su máxima potencia cuando se activan, a diferencia del sistema difuso el cual va regulando la potencia de las salidas del sistema, por la parte de iluminación en algunos invernaderos dejan fija la intensidad lumínica para asegurar que el cultivo reciba la cantidad adecuada, pero nuestro control al tomar las mediciones de lux que llegan al cultivo, regula la intensidad que se requiere para hacer más eficiente según las caracterizas del medio y así reducir costos, por lo que los objetivos de esta tesis se cumplieron.

## BIBLIOGRAFIA

- Castellanos, J. Z. 2009. *Manual de Producción de Tomate en Invernadero*. Intagri: México. 457 p.

-FAO. 1991. Manual de sistemas de labranza para América Latina. Argentina: INTA. pp 5-11,21-39

GRANADOS, S.D. 1979. Apuntes mimeografiados de las zonas áridas, Depto. De zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo México. Pág 125.

- Heinrich, C. (1976). *Manual de técnica agrícola*. España: Gráficas Instar, S. A. pp. 361-364

-Iglesias, N (2006, septiembre). *Producción de hortalizas bajo cubierta: Estructuras y manejo de cultivo para la Patagonia Norte*. Boletín de Divulgación Técnica, N° 49, 89 p.

-Martínes, E & García M. (1993, julio). *Cultivo sin suelo: Hortalizas en clima mediterráneo*. España: Ediciones de Horticultura, S.L. pp. 13-61

MOLINA, G.J. 1991. Recursos Agrícolas de Zonas Áridas y Semiáridas de México. 2da Ed. Editorial Galves. México. 86-87.

Moreno Vega Alberto. (2014). Mantenimiento y manejos de invernaderos. España: Paraninfo.

- Phillips, R & Phillips S. (1986). *Agricultura sin laboreo: Principios y aplicaciones*. España: Ediciones Bellaterra, S.A.

PHILIPS. (1981). Irradiación de plantas. En Manual de alumbrado (15.1, 15.2, 15.3, 15.4). España: PARANINFO.

PHILLIPS. (2014). City farms that grow with LED lighting. 09152017, de PHILIPS <https://www.philips.com/a-w/innovationandyou/article/article/city-farm.html>

GIDEON E. NELSON, GERALD G. ROBINSON, RICHARD A. BOOLOOTIAN. (1975). FUNDAMENTOS DE BIOLOGIA. MEXICO: LIMUSA.

University of Florida. (1947). Miscellaneous Applications of Radiant Energy. IES Lighting Handbook (Section 16). Florida, USA.: Illuminating Engineering Society.

Zoilo Serrano Cermeño. (2005). Construcción de invernaderos. México: Mundi-prensa. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/268251/Cuadros\\_tabulares\\_2016](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/268251/Cuadros_tabulares_2016) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)

WANG, L.X. (1997). *A course in fuzzy systems and control*. USA: Prentice-Hall, Inc. pp. 1-19.

IBRAHIM A. M. (1997). *Introduction to applied fuzzy electronics*. USA: Prentice-Hall, Inc. pp. 76-85.

## Bibliografía

J. P, HOLMAN. (1977). *Métodos Experimentales para Ingenieros*. USA: McGraw-Hill. <http://planetagadget.com/2008/01/29/eniac-la-primera-computadora1946/>

<http://www.metalmecanica.com/temas/Como-elegir-un-sensor+108149> 8 de nov 2017

Greenfiel - Wray. (1998). *Using Microprocessors and Microcomputers: The Motorola Family*. Estados Unidos de America: Prentice Hall.

-Bastida. A. (2013). *Los invernaderos y la agricultura protegida en México*. Chapingo, México: Universidad Autónoma de Chapingo.

-Tognoni, F. (2000). *Los cultivos protegidos: Origen y desarrollo. Memorias del Curso internacional "Ingeniería, manejo y operación de invernaderos para la producción intensiva de hortalizas*. México: Editores J. Z. Castellanos y M. Guzmán Palominos. Instituto de capacitación para la productividad agrícola, S. C.

-García S., M. D. y Serrano F., H. (2005). *Historia de los invernaderos. Desde los romanos hasta los invernaderos en Marte del siglo XXI*. Rev.Tenoagro, No. 12. Julio-Agosto. México: Editorial Elto.

Abad, B. M., Noguera, P., y Carrión, B. C. 2004. Los Sustratos en los cultivos sin suelo. En: M. G. Urrestarazu, (Ed). *Tratado de cultivo sin suelo*. 2nd ed. Mundi-Prensa. Almería, España. pp. 113-158.

Ansorena, J. 1994. *Sustratos: Propiedades y caracterización*. 1ra. edición. Mundi-Prensa. Madrid, España. 172 p.

Bunt, C. 1988. *Media and mixes for container-grown plants*. Unwin Hyman Ltd., Great Britain. 309 p.

Burés, S. 1997. *Sustratos*. Ed. Agrotécnicas, F.L. Madrid, España. 341 p.

<http://www.ecosiglos.com/2013/07/tipos-de-sustratos-para-cultivo-hidroponico.html>

Carlos Baixauli Soria, José M. Aguilar Olivert. *Cultivo sin Suelo de Hortalizas Aspectos Prácticos y Experiencias*, España Serie Divulgación Técnica

<http://www.cm.colpos.mx/montecillo/images/SUSTRATOS/09.pdf>

Z. SERRANO CERMEÑO. (2005). *CONSTRUCCIÓN DE INVERNADEROS*. MADRID, ESPAÑA: MUNDI-PRENSA LIBROS.

LESUR Y ESQUIVEL, LUIS RAFAEL. (2011). MANUAL DE INVERNADEROS AGRICOLAS. MEXICO: TRILLAS.

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS AGRÓNOMOS DE CENTRO Y CANARIAS. (2004). TECNOLOGÍA EN INVERNADEROS Y CULTIVOS PROTEGIDOS. ESPAÑA: AGRÍCOLA ESPAÑOLA.

SITTA, G. (1988). *El ABC de la horticultura protegida*. España: Ediciones Mundi-Prensa. pp. 31-88.

SHOLTO, J. (1981). *HIDROPONIA. Cómo cultivar sin tierra*. Argentina: "El Ateneo" Editorial. pp. 87-101

Turchi, A. (1995). *Guía práctica de horticultura*. España: Grupo editorial Ceac, S.A. pp. 73-223.

- Abad, B. M., Noguera, P., y Carrión, B. C. 2004. Los Sustratos en los cultivos sin suelo. En: M. G. Urrestarazu, (Ed). *Tratado de cultivo sin suelo*. 2nd ed. Mundi-Prensa. Almería, España. pp. 113-158.
- Ansorena, J. 1994. *Sustratos: Propiedades y caracterización*. 1ra. edición. Mundi-Prensa. Madrid, España. 172 p.
- Bunt, C. 1988. *Media and mixes for container-grown plants*. Unwin Hyman Ltd., Great Britain. 309 p.
- Burés, S. 1997. *Sustratos*. Ed. Agrotécnicas, F.L. Madrid, España. 341 p.
- Carlos Baixauli Soria, José M. Aguilar Olivert. *Cultivo sin Suelo de Hortalizas Aspectos Prácticos y Experiencias*, España Serie Divulgación Técnica.  
<http://www.cm.colpos.mx/montecillo/images/SUSTRATOS/09.pdf>
- Castellanos, J. Z. 2009. *Manual de Producción de Tomate en Invernadero*. Intagri: México. 457 p.
- Datasheet de Arduino Mega 2560
- FAO. 1991. *Manual de sistemas de labranza para América Latina*. Argentina: INTA. pp 5-11,21-39

- GIDEON E. NELSON, GERALD G. ROBINSON, RICHARD A. BOOLOOTIAN. (1975). FUNDAMENTOS DE BIOLOGIA. MEXICO: LIMUSA.
- GRANADOS, S.D. 1979. Apuntes mimeografiados de las zonas áridas, Depto. De zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo México. Pág 125.
- Heinrich, C. (1976). Manual de técnica agrícola. España: Gráficas Instar, S. A. pp. 361-364
- Iglesias, N (2006, septiembre). Producción de hortalizas bajo cubierta: Estructuras y manejo de cultivo para la Patagonia Norte. Boletín de Divulgación Técnica, N° 49, 89 p.
- Martínez, E & García M. (1993, julio). Cultivo sin suelo: Hortalizas en clima mediterráneo. España: Ediciones de Horticultura, S.L. pp. 13-61
- MatLab® Función FUZZY (Lenguaje de alto nivel.)
- MOLINA, G.J. 1991. Recursos Agrícolas de Zonas Áridas y Semiáridas de México. 2da Ed. Editorial Galves. México. 86-87.
- Moreno Vega Alberto. (2014). Mantenimiento y manejos de invernaderos. España: Paraninfo.
- PHILIPS. (1981). Irradiación de plantas. En Manual de alumbrado (15.1, 15.2, 15.3, 15.4). España: PARANINFO.
- PHILLIPS. (2014). City farms that grow with LED lighting. 09152017, de PHILIPS  
Sitio web:

<https://www.philips.com/a-w/innovationandyou/article/article/city-farm.html>

- SAGARPA. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.

<https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>

- Texas Advanced Optoelectronic Solutions®

TSL2560, TSL2561 Light-to-Digital Converter

- Tipos de sustratos para cultivo hidropónico

<http://www.ecosiglos.com/2013/07/tipos-de-sustratos-para-cultivo-hidroponico.html>



- University of Florida. (1947). Miscellaneous Applications of Radiant Energy. IES Lighting Handbook (Section 16). Florida, USA: Illuminating Engineering Society.
- Phillips, R & Phillips S. (1986). *Agricultura sin laboreo: Principios y aplicaciones*. España: Ediciones Bellaterra, S.A.
- Zoilo Serrano Cermeño. (2005). Construcción de invernaderos. México: Mundi-prensa.

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/268251/Cuadros\\_tabulares\\_2016](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/268251/Cuadros_tabulares_2016)