



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN INVERNADERO INTELIGENTE A
ESCALA CON DIMENSIONAMIENTO FOTOVOLTAICO PARA SU POSIBLE
SOSTENIMIENTO ELÉCTRICO.**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

P R E S E N T A:

ELISA ANDREA HERNÁNDEZ SÁNCHEZ

DIRECTORES DE TESIS

Vo. Bo. DRA. SANDRA JÍMENEZ XOCHIMITL

Vo. Bo. DR. OSVALDO LÓPEZ HERNÁNDEZ

MARZO 2021

Agradecimientos

A mis asesores Dra. Sandra Jiménez Xochimiltl y Dr. Osvaldo López Hernández por el tiempo que dedicaron para guiarme y aconsejarme durante este camino, por creer en mí y motivarme a continuar durante los varios tropiezos que tuve a lo largo de este proyecto, así como por brindarme los recursos, en distintas formas, necesarios para su culminación. Agradezco de una forma muy especial su compañía y amistad en los momentos compartidos fuera del laboratorio.

Gracias a mis amigos, Andie, Ale, Temo, Lalo y Don Chucho por permanecer a mi lado a pesar de la distancia, el tiempo y los malos ratos compartidos, por apoyarme en cada momento y decisión tomada, así como alentarme a continuar cada vez que no encuentro la salida, por demostrarme que su amistad es de verdad.

Al encargado del taller del CIDS, Técnico Jorge Poblano Lima por el apoyo brindado en la construcción de la estructura del prototipo de invernadero, así como por su tiempo y paciencia brindados.

Dedicatoria

A mis papás, por ser mi inspiración para conseguir todo

lo que me he propuesto hasta ahora,

por brindarme todo su amor y confianza en cualquier momento.

Gracias por hacerme el ser humano que soy, por enseñarme

que con esfuerzo todo se puede conseguir, sin ustedes no hubiera logrado

subir un escalón más.

A mis hermanos, Pepe y Blanca por ser los mejores amigos

y compañeros de vida, por demostrarme su amor, cada uno a su tiempo y

a su manera.

Este pequeño logro, es para ustedes.

Resumen

En el siguiente trabajo de investigación se presenta el diseño e implementación del prototipo de un invernadero tipo túnel con dimensiones de 85 cm de largo, 1 m de ancho y 84.74 cm de alto, este tipo de invernadero es uno de los más económicos y sencillos de construir, dentro de sus ventajas se encuentran una buena distribución de la luz al interior de él, ya que al tener una estructura sencilla no se generan sombras sobre los cultivos, también permite la fácil instalación de sistemas mecánicos para la ventilación así como una gran resistencia a fuertes vientos, este prototipo se encuentra instalado en el estado de Puebla, dentro del laboratorio de energía solar de la Facultad de Ciencias de la Electrónica en la BUAP. El producto agrícola considerado para este proyecto fue el rábano, por poseer uno de los ciclos vegetativos más cortos. Para obtener un mejor rendimiento del cultivo se diseñó y creó un sistema de control con monitoreo de los parámetros más significativos que contribuyen al óptimo desarrollo de la planta dentro del invernadero (temperatura, humedad relativa, porcentaje de humedad del suelo y luz), todo esto se lleva a cabo a través del microcontrolador Arduino MEGA, así como de sensores y actuadores que mantendrán el microclima ideal dentro del invernadero para el rábano. Automatizar el prototipo brinda alternativas de solución a los problemas que comúnmente enfrentan las personas que forman parte del sector agrícola, tales como; el daño a los cultivos por climas extremos o plagas descontroladas, resultando en costosas pérdidas monetarias, así como también se puede disminuir el trabajo y tiempo dedicado al cuidado de la siembra, ya que el sistema de control implementado es el encargado de que la planta que se encuentra dentro del invernadero se desarrolle bajo, las condiciones ideales para su óptimo desarrollo.

Los datos obtenidos de los sensores, son monitoreados y capturados gracias al Internet of Things (IoT) y a la plataforma Thinkspeak, por lo que, la visualización del estado de estos parámetros dentro del invernadero se realiza de forma remota y en tiempo real. También se utiliza un almacenamiento de datos a través de una memoria SD para diversificar la obtención de las mediciones sensadas. Se presenta el dimensionamiento y diseño de un sistema solar fotovoltaico autónomo para el sustento energético del invernadero como propuesta para disminuir el consumo de energía eléctrica utilizado por la automatización y de esta forma, evitar un gasto económico innecesario.

Índice

Agradecimientos	2
Dedicatoria.....	3
Resumen	4
Índice de Figuras	8
Índice de tablas.....	11
Capítulo 1. Introducción y Marco Teórico	12
1.1 Introducción.....	12
1.2 Justificación	14
1.3 Objetivos	15
<i>1.3.1 Objetivo general.....</i>	<i>15</i>
<i>1.3.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>15</i>
1.4 Capitulado.....	16
1.5 Marco teórico.....	17
<i>1.5.1 Antecedentes</i>	<i>17</i>
<i>1.5.2 Definición de invernadero.....</i>	<i>20</i>
<i>1.5.3 Tipos de invernaderos</i>	<i>20</i>
<i>1.5.4 Tipos de cubiertas</i>	<i>28</i>
<i>1.5.5 Microclima.....</i>	<i>29</i>
1.6 Parámetros de control.....	29
<i>1.6.1 Temperatura</i>	<i>29</i>
<i>1.6.2 Humedad y suelo</i>	<i>30</i>
<i>1.6.3 Luz.....</i>	<i>32</i>
1.7 Rábano	36
<i>1.7.1 Taxonomía y morfología</i>	<i>37</i>
<i>1.7.2 Temperatura</i>	<i>38</i>
<i>1.7.3 Humedad del suelo</i>	<i>38</i>
<i>1.7.4 Germinación</i>	<i>38</i>
<i>1.7.5 Fotoperiodo.....</i>	<i>38</i>
<i>1.7.6 Plagas, enfermedades y fisiopatías del rábano.....</i>	<i>39</i>
1.8 Control ON/OFF	40
Capítulo 2. Diseño, Implementación y Construcción del Invernadero.....	42
2.1 Estructura	42

2.1.1	<i>Diseño de la estructura del prototipo de invernadero.</i>	42
2.1.2	<i>Dimensiones.</i>	43
2.1.3	<i>Construcción del prototipo de invernadero</i>	44
2.2	Etapa de control	51
2.2.1	<i>Selección de microcontrolador</i>	51
2.2.2	<i>Control de temperatura</i>	53
2.2.3	<i>Control de humedad del suelo.</i>	63
2.2.4	<i>Control de luz.</i>	69
2.3.1	<i>Control de potencia con relevadores</i>	73
2.3.2	<i>Diseño del circuito</i>	77
2.3.3	<i>Diagrama de Flujo.</i>	83
2.3.4	<i>Almacenamiento y monitoreo de datos</i>	84
2.4	Materiales.	87
Capítulo 3. Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFA).		89
3.1	Elementos de un SFA	89
3.1.1	<i>Radiación e Irradiancia Solar</i>	89
3.1.2	<i>Módulo fotovoltaico</i>	92
3.1.3	<i>Regulador de carga</i>	96
3.1.4	<i>Acumuladores</i>	97
3.1.5	<i>Inversor</i>	98
3.1.6	<i>Elementos de Protección</i>	99
3.1.7	<i>Método de dimensionamiento del mes crítico</i>	100
3.2	Dimensionamiento del SFA	102
3.2.1	<i>Ubicación</i>	102
3.2.2	<i>Recurso solar</i>	103
3.2.3	<i>Estimación de consumos</i>	105
3.2.4	<i>Cálculo del consumo medio diario</i>	106
3.2.5	<i>Dimensionamiento de los paneles fotovoltaicos</i>	106
3.2.6	<i>Dimensionamiento del sistema de acumulación</i>	109
3.2.7	<i>Dimensionamiento del regulador</i>	113
3.2.8	<i>Dimensionamiento del cableado</i>	115
3.2.9	<i>Elementos de protección</i>	122
3.2.10	<i>Diagrama de conexión del sistema</i>	123

Capítulo 4. Implementación, Resultados y Análisis del Invernadero.....	124
4.1 Control de temperatura y humedad relativa	124
<i>4.1.2 Etapas de diseño y ajuste de mediciones</i>	<i>126</i>
4.2 Control de riego.....	131
4.3 Control de Luz.....	134
Conclusiones	142
Recomendaciones	144
Bibliografía	146
Anexos	153
Anexo 1. Código de programación en Arduino	153

Índice de Figuras

Fig 1.1. Orangerie.	18
Fig 1.2 Invernadero tipo Venlo	18
Fig. 1.3. Invernadero tipo plano o parral.....	21
Fig. 1.4 Invernadero tipo raspa y amago.....	22
Fig. 1.5. Invernadero tipo capilla	23
Fig. 1.6. Invernadero gótico	24
Fig. 1.7 Invernadero asimétrico.....	25
Fig. 1.8 Invernadero tipo túnel.....	26
Fig. 1.9. Invernadero tipo venlo	27
Fig. 1.10. Relación general entre el agua disponible para la planta, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, el agua no disponible y la clase de textura del suelo.....	31
Fig. 1.11. Espectro electromagnético	32
Fig. 1.12. Reacción fotosintética de la planta.....	33
Fig. 1.13 Gráfica del punto de compensación de la luz y del punto de saturación de la luz.....	35
Fig. 1.14. Rábano (<i>Raphanus sativus</i> var <i>sativus</i>).....	36
Fig. 1.15. Esquema general de un sistema de control	40
Fig. 2.1 Diseño de estructura realizado en SolidWorks.	43
Fig. 2.2 Dimensiones de la estructura del prototipo de invernadero	43
Fig. 2.3. Dimensiones de maceta.....	44
Fig. 2.4 Corte de barras de acero para la estructura del prototipo.	45
Fig. 2.5. Soldado de todas las piezas de metal.	46
Fig. 2.6. Estructura del prototipo de invernadero terminada.	46
Fig. 2.7. Recubrimiento del prototipo con pintura anticorrosión	47
Fig. 2.8. Membrana plástica flexible de polietileno de color verde	48
Fig. 2.9. Sujeción de plástico con perfil de aluminio y alambre zigzag.....	49
Fig. 2.10. Colocación de remaches.....	39
Fig. 2.11. Perfiles sujetadores de aluminio.	50
Fig. 2.12. Vista lateral del prototipo de invernadero con el recubrimiento plástico.	50
Fig. 2.13. Vista frontal del prototipo de invernadero con el recubrimiento plástico.....	51
Fig. 2.14. Arduino ATmega2560	52
Fig. 2.15. Sensor de temperatura y humedad DHT11	54
Fig. 2.16 Aplicación típica del sensor DHT11	55
Fig. 2.17. Moléculas de aire frío y aire caliente	57
Fig. 2.18. Extractor de aire caliente.	58
Fig. 2.19 Estructura interna de una Celda Peltier.....	60
Fig. 2.20. Celda Peltier utilizada.....	61
Fig. 2.21. Montaje de Celda Peltier.....	62
Fig. 2.22. Montaje de Celda Peltier lado caliente.....	51
Fig. 2.23. Montaje de Celda Peltier lado frío	62
Fig. 2.24. Sensor de humedad del suelo HL-69	63
Fig. 2.25. Conexión típica del sensor de temperatura del suelo HL-69	64
Fig. 2.26. Tubo PVC ½ pulgada.....	66
Fig. 2.27. Distribución de los tubos PVC.....	66

Fig. 2.28. Electroválvula	67
Fig. 2.29. Tubería para el riego	68
Fig. 2.30. Adaptación de tubería a vote con capacidad de 20 litros	69
Fig. 2.31 Fotorresistor	69
Fig. 2.32. Conexión tipo del sensor LDR a un microcontrolador	70
Fig. 2.33. Módulos LED	71
Fig. 2.34. Arreglo de módulos LED.....	72
Fig. 2.35. Módulo RTC DS3231	72
Fig. 2.36. Módulos de LEDs encendidos con DS3231	73
Fig. 2.37. Diagrama de un relevador	74
Fig. 2.38. Esquema de un relevador SPDT.	74
Fig. 2.39. Diagrama de un transistor bipolar	75
Fig. 2.40. Circuito de conexión de un transistor a un relevador SPDT	75
Fig. 2.41. Transistor BC547	76
Fig. 2.42. Esquema electrónico primera parte del circuito.....	79
Fig. 2.43. Esquema electrónico segunda parte del circuito.....	79
Fig. 2.44. Montaje del circuito en protoboard.....	80
Fig. 2.45. Diseño de PCB.....	81
Fig. 2.46. Elementos de control y monitoreo ensamblados en caja de acrílico.....	81
Fig. 2.47. Módulo ESP-01.....	84
Fig. 2.48. Canal hecho en Thinspeak para el almacenamiento y monitoreo de datos	86
Fig. 2.49. Módulo microSD	86
Fig. 3.1. Sistema Fotovoltaico Aislado (SFA)	89
Fig. 3.2. Mapa recurso solar en México	90
Fig. 3.3. Tipos de radiación solar	91
Fig. 3.4. Curva típica de la Irradiancia Solar durante un día.....	92
Fig. 3.5. Celda fotovoltaica	94
Fig. 3.6. Panel solar fotovoltaico.....	94
Fig. 3.7. Regulador de carga	96
Fig. 3.8. Fusible.....	99
Fig. 3.9. Pastilla magneto-térmica.....	100
Fig. 3.10. Edificio FCE5	102
Fig. 3.11. Características panel SW130 poly R6A.....	107
Fig. 3.12. Curva I-V panel fotovoltaico SW130 poly R6A.....	108
Fig. 3.13. Conexión en paralelo de los paneles fotovoltaicos.	109
Fig. 3.14. Batería Hoppecke Power 6 OPzS 600.....	113
Fig. 3.15. Controlador VS3024AU	115
Fig. 3.16. HP10M30 Mersen.....	122
Fig. 3.17. Diagrama Unifilar del Sistema Fotovoltaico.....	122
Fig. 4.1 Análisis de distribución de frecuencias de temperaturas altas durante las horas diurnas....	125
Fig. 4.2 Peor día del período 11/Feb/2020-25/Feb/2020 en horas diurnas.....	127
Fig. 4.3. Mejor día del período 11/Feb/2020-25/Feb/2020 en horas diurnas.....	128
Fig. 4.4. Peor día del período 03/Mar/2020-15/Mar/2020 en horas diurnas.....	129
Fig. 4.5. Mejor día del período 03/Mar/2020-15/Mar/2020 en horas diurnas.....	130

Fig. 4.6. Gráfica humedad del suelo del periodo 11/feb/2020 al 24/feb/ 2020	132
Fig. 4.7. Gráfica humedad del suelo del periodo 03/mar/2020 al 15/mar/ 2020	133
Fig. 4.8. Diagrama del circuito eléctrico utilizado para el control de luz	134
Fig. 4.9. Sistema de iluminación encendido.....	135
Fig. 4.10. Vista frontal del invernadero.....	136
Fig. 4.11. Semillas germinadas de la maceta R1.....	126
Fig. 4.12. Semillas germinadas de la maceta R2.....	137
Fig. 4.13. Semillas germinadas de la maceta R3.....	127
Fig. 4.14. Semillas germinadas de la maceta RE	138
Fig. 4.15. Crecimiento del rábano dos semanas después de plantarlos. En la imagen izquierda se puede observar las macetas dentro del invernadero y del lado derecho la maceta exterior.	139
Fig. 4.16. Comparación de producto final.....	140
Fig. 4.7. Características dadas por el proveedor.....	142

Índice de tablas

Tabla 1.1 Ventajas y desventajas del invernadero tipo plano o parral	22
Tabla 1.2 Ventajas y desventajas del invernadero tipo amago.....	23
Tabla 1.3 Ventajas y desventajas del invernadero tipo capilla.....	24
Tabla 1.4 Ventajas y desventajas del invernadero tipo gótico	25
Tabla 1.5 Ventajas y desventajas del invernadero tipo asimétrico.....	26
Tabla 1.6 Ventajas y desventajas del invernadero tipo túnel	27
Tabla 1.7 Ventajas y desventajas del invernadero tipo venlo	28
Tabla 1.8 Taxonomía y morfología del rábano	37
Tabla 1.9 Ventajas y desventajas del control ON-OFF	41
Tabla 2.1 Características de la membrana plástica flexible de polietileno color verde.....	48
Tabla 2.2 Especificaciones de Arduino ATmega 2560.....	52
Tabla 2.3 Características técnicas DHT11	55
Tabla 2.4 Características eléctricas DHT11	56
Tabla 2.5 Características técnicas HL-69.....	64
Tabla. 2.6 Características eléctricas HL-69.....	65
Tabla 2.7 Características técnicas Fotorresistor	70
Tabla 2.8 Características eléctricas sensor LDR.....	70
Tabla 2.9 Características técnicas ESP-01	85
Tabla 3.1 Tipos de paneles solares fotovoltaicos	95
Tabla 3.2 Datos de irradiancia solar para el estado de Puebla	103
Tabla 3.3 Horas Solares Pico en el estado de Puebla	104
Tabla 3.4 Tabla de consumos eléctricos diarios.....	105
Tabla 3.5 Caídas de tensión por cada tramo de línea en un SFA	116
Tabla 3.6 Tabla de conductividad para el cobre	118
Tabla 3.7 Resumen de los cálculos realizados apar el cableado del SFA	121
Tabla 4.1 Características físicas de las muestras de rábano	141
Tabla 4.1a Fenología del rábano.....	141

Capítulo 1. Introducción y Marco Teórico

1.1 Introducción

Se conoce como agricultura protegida a la práctica que se realiza para controlar de forma total o parcial el microclima en el que una planta o cultivo crece, así como brindarle protecciones de factores externos que afecten su desarrollo como son algunos elementos biológicos, ambientales y climatológicos con el objetivo de garantizar una mejor producción. De acuerdo a cifras de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en México existen más de 40 mil 682 hectáreas con cultivos que utilizan la agricultura protegida, lo que quiere decir, que en los últimos años, esta modalidad de cuidado para los cultivos, ha crecido, aproximadamente, casi siete veces el número de hectáreas, ya que en 2010 eran alrededor de 6 mil 328 hectáreas bajo esta práctica (Moderna, 2018) .

Algunos de los factores comerciales que impulsan el desarrollo de la agricultura protegida en México son (Ortega, 2019):

- Reducción de la vulnerabilidad y del riesgo asociado a condiciones meteorológicas adversas que afectan de forma negativa a los cultivos.
- Mayor productividad y de forma constante.
- Mejor control de las condiciones sanitarias y fitosanitarias para cumplir con los requisitos del mercado y reducir el riesgo y los daños a los cultivos.
- Capacidad para satisfacer la demanda de manera rentable durante los meses más fríos en México.
- Mayor eficiencia en la utilización de recursos, como el uso de tierra, el agua, los fertilizantes, la mano de obra y la energía.

Actualmente, el uso de invernaderos es visto como una práctica que favorece el óptimo crecimiento de cultivos teniendo la supervisión de los factores que influyen en el desarrollo de estos. Estos factores se pueden controlar manualmente, siendo poco precisos e

inadecuados para proporcionar a los cultivos un crecimiento satisfactorio, ya que generan incertidumbre en el control de las variables importantes para el desarrollo de la planta tales como, temperatura y humedad. Este problema ha sido solucionado, desde hace algunos años, con la ayuda de la automatización.

Este trabajo tiene como finalidad desarrollar un invernadero inteligente a escala con un sistema de control que garantice el desarrollo y crecimiento óptimo de cultivos en cualquier época del año sin riesgo a la pérdida de este y que a su vez esté sustentado por energía solar. Dicho sistema busca el cumplimiento de las condiciones adecuadas de operación dentro de un ambiente controlado para el correcto crecimiento y desarrollo de plantaciones, reduciendo de esta forma el error humano, dando solución a uno de los problemas más comunes en el sector agropecuario hoy en día. La generación de alimentos en invernaderos actualmente es y seguirá siendo la fuente de alimentos más eficiente, eficaz, sustentable y económica.

1.2 Justificación

El sector agropecuario se está viendo afectado por el cambio climático, el cual ocasiona variaciones en las temporadas y ciclos de cultivo que resultan en una pérdida significativa de este. La presente propuesta de investigación tiene la finalidad de crear un microclima controlado dentro de un invernadero a escala que ayude al desarrollo óptimo de cultivos sin que estos dependan de la temporada de siembra, provocando la disminución de pérdidas de cosechas, tiempo invertido en el cuidado y un menor riesgo a perder el dinero invertido, todo esto ocasionado por situaciones ambientales que el humano no puede prever como las heladas o sequías, por mencionar las de mayor impacto.

Existen pocos trabajos sobre este tema dentro de la Facultad de Ciencias de la Electrónica. El estado de Puebla es uno de los estados que más contribuyen a la producción agrícola del país colocándose entre los primeros lugares en el sector agropecuario, así como el quinceavo lugar en exportaciones agroalimentarias (Comisión Nacional del Agua, 2019) .

Otro punto favorable que se debe tomar en cuenta es la implementación de un sistema autónomo de energía solar fotovoltaica que sustentará los requerimientos eléctricos y térmicos dentro del prototipo, aprovechando así, el gran potencial con que cuenta el país.

La implementación de este trabajo de investigación se realiza gracias a los conocimientos de electrónica adquiridos en la licenciatura de Energías Renovables, de la Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y que al mismo tiempo sirve de motivación para llevar a cabo un proyecto que beneficiará a un sector muy importante en nuestro país, devolviendo y aplicando el conocimiento proporcionado por esta casa de estudios, más concretamente, esta facultad. De igual forma, el desarrollo de este trabajo ayudará a la adquisición de nuevas aptitudes, como resolución de problemas, paciencia, perseverancia, organización, escritura y redacción las cuales se irán adquiriendo a lo largo de la realización del proyecto y ampliando los conocimientos, complementando así, la formación personal y profesional. Estos conocimientos se podrán transmitir a la gente que forma parte del sector agropecuario en Puebla, contribuyendo así al desarrollo de nuevas ideas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un invernadero inteligente a escala, para el desarrollo óptimo del rábano, así como el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico aislado para su sostenibilidad eléctrica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un invernadero a escala que proporcione las condiciones para el desarrollo de cultivos.
- Implementar un microclima dentro del invernadero a través de sensores de humedad, temperatura, luz y de un sistema de control ON/OFF para la manipulación de los principales parámetros (humedad del suelo, temperatura e iluminación) que influyen en el correcto desarrollo de los cultivos del rábano.
- Dimensionar un sistema fotovoltaico autónomo para la sostenibilidad eléctrica del invernadero.

1.4 Capitulado

Capítulo 1: Este capítulo se refiere a la introducción, el planteamiento de los objetivos a cumplir, la justificación del trabajo de investigación, la propuesta de solución y el marco teórico. Dentro del marco teórico se describen las distintas estructuras de los invernaderos, así como los tipos de cubiertas que se utilizan en éstos, también se mencionan las condiciones necesarias para el correcto desarrollo del rábano (*Raphanus raphanistrum subsp. sativus*) y se definen las variables que serán controladas dentro del prototipo.

Capítulo 2: Se describe el diseño e implementación del invernadero, definiendo el cómo, por qué y para qué de la estructura, tamaño y materiales utilizados, también se menciona la etapa de potencia y como se realizó el control de los parámetros dentro del prototipo para el óptimo desarrollo del rábano y el almacenamiento de los datos, así como los sensores y sistemas utilizados.

Capítulo 3: En este capítulo se muestran los consumos eléctricos dentro del invernadero y el dimensionamiento fotovoltaico con base en estos consumos.

Capítulo 4: Se presenta la implementación del sistema de control de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y luz, así como el análisis y el resultado de los datos obtenidos para cada etapa de control.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Antecedentes

En la antigüedad, los primeros indicios de cultivos intensivos se dieron en Atenas y Roma en el 372-287 A.C, donde el suelo en el que estaban plantados los cultivos eran preparados con estiércol y composta, las plantas eran trasladadas hacia patios cubiertos durante la noche. Entre los siglos XIII y XV en el norte de Italia y Alemania se conocen los primeros pasos hacia los invernaderos, donde llegó a ser muy común el uso de cabañas para la protección de cultivos en invierno y el crecimiento de plantas exóticas (Woods, 1996) .

Durante el siglo XVI era muy común que en las casas reales europeas se cultivaran cítricos en los jardines ya que, estas plantas estaban de moda y eran símbolo de poder. La importación de estas frutas era muy cara, por eso se reservaban a los aristócratas. Estos cultivos eran llamados “Orangerie”.

En el siglo XVII se construyeron grandes estructuras de cristal que permitían la entrada de luz para las plantas que también llevaban por nombre Orangerie (Fig 1.1), las cuales protegían los cultivos de cítricos de las inclemencias del tiempo y las bajas temperaturas. Una Orangerie era un símbolo de distinción en las residencias aristócratas, representaba una unión perfecta entre la naturaleza y la cultura puesto que no sólo se utilizaban como invernaderos, sino como lugares para las artes, banquetes y festividades. Las Orangerie más espectaculares datan de la época barroca (Woods, 1996). Entre las más conocidas se encuentran la Orangerie de Versailles, la del Palacio de Schönbrunn de Viena y el Zwinger de Dresde, así como la Orangerie de Potsdam, Düsseldorf y Estrasburgo.



Fig 1.1. Orangerie. Fuente: (GmbH, s.f.)

los invernaderos de gran tamaño e importancia como el “New Garden” en Inglaterra. A principios de este siglo la construcción de la mayoría de los invernaderos era sencilla y en invierno se calentaban por medio de la descomposición de materia orgánica o por medio de estufas. En 1829 se usa por primera vez el doble acristalamiento como fuente de aislamiento térmico. En el siglo XX se realizó una amplia investigación sobre el uso de calefacción, fertilización y riego dentro de un invernadero. En el año de 1937 en Holanda se construye el invernadero tipo Venlo (Fig. 1.2) que es una estructura metálica prefabricada con cubierta de vidrio el cual podía ser utilizado para diferentes cultivos. Durante la primera guerra mundial se utiliza el plástico en la agricultura (Parra, 2006).



Fig. 1.2 Invernadero tipo Venlo. Fuente: (Luiten, s.f.)

En México, las primeras estructuras de invernaderos se implementan a finales de la década de 1970 cuando un productor de la capital mexicana las instala para la producción de plantas ornamentales y flores (Trejo, 2013). Gracias a esto, la floricultura se convirtió en una industria importante para el centro del país.

A mediados de la década de 1980 se instalaron invernaderos para la producción de plántula, principalmente de tomate. Fue hasta finales de dicha década y principios 1990 cuando tecnologías, principalmente europeas, fueron instaladas en nuestro país para la producción de ciclos completos de hortalizas. Y fue en el occidente y noroeste de México donde inició la producción de tomate en condiciones de ambiente controlado (Rizo, Inforural, 2018)

Existen muchos proyectos y artículos en México relacionados con la automatización de invernaderos para la mejora en la producción de cultivos como es el caso del Instituto Politécnico Nacional en el que se han presentado diversas tesis con este tema en particular, pero el número de artículos e investigaciones en México disminuye cuando se habla de la implementación de las energías renovables en este tipo de invernaderos.

Pero para los años de 2000 a 2010 se registró el mayor crecimiento. En el año 2000, había 1.200 hectáreas dedicadas a la agricultura protegida, mientras que en 2010 eran alrededor de 12 mil, principalmente en Sinaloa, Jalisco Baja California.

La Universidad Autónoma de San Luis Potosí publicó en agosto de 2013 un artículo titulado “Solar Automated Greenhouse” en el que se busca controlar automáticamente el clima, riego y fertilizante de las plantas dentro del invernadero implementando el uso de energía solar para su funcionamiento (Enoch de Santiago Rojas F. R., 2013).

En el 2017 el Instituto Politécnico Nacional publicó una tesis que tiene por nombre “Invernadero Inteligente” dónde se busca automatizar un prototipo de invernadero controlando la temperatura por medio de ventiladores y focos incandescentes, así como el riego dentro del prototipo pudiendo monitorear estos datos a través de una pantalla LCD (García, 2014).

La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en agosto del 2017 presento un trabajo de titulación nombrado “Diseño de un sistema de instrumentación y medición para los

parámetros físicos de un módulo de invernadero” en el cual se realizaron mediciones de humedad relativa y de temperatura dentro del prototipo para realizar su simulación a través del método de elementos finito. (Nájera, 2017)

1.5.2 Definición de invernadero

Un invernadero es una estructura cubierta y cerrada de manera artificial con diversos materiales traslúcidos en los que se encuentran cultivos, con el objetivo de protegerlos de malas condiciones climáticas como pueden ser bajas temperaturas, granizo, alta radiación solar, etc. Gracias a los invernaderos, los cultivos se benefician y ayuda a que estos crezcan en periodos diferentes a su origen climático ya que, el ambiente en el que estos crecen está controlado y de esta manera las plantas se pueden desarrollar de una manera óptima y da como resultado el aumento en la producción en comparación con los cultivos al aire libre.

1.5.3 Tipos de invernaderos

Existen diferentes características por las cuales se pueden clasificar los invernaderos como (algunos de estos no se utilizan actualmente):

Según el rango de temperaturas a mantener dentro del invernadero:

- Invernaderos fríos
- Invernaderos templados
- Invernaderos cálidos.

Según los materiales que son utilizados para la cubierta:

- Invernaderos de vidrio.
- Invernaderos de plástico.

Según la estructura:

- Invernadero de aluminio.
- Invernadero de acero.
- Invernadero de madera.
- Invernadero mixto.

En la actualidad se pueden combinar las clasificaciones anteriores y que nos arrojan los siguientes tipos de invernaderos, las cuales son los más utilizados a nivel mundial:

Invernadero tipo plano o parral: Este tipo de invernadero se utiliza en zonas con pocas precipitaciones. Su estructura está conformada por dos partes, estructura vertical y horizontal. (Fig. 1.3).

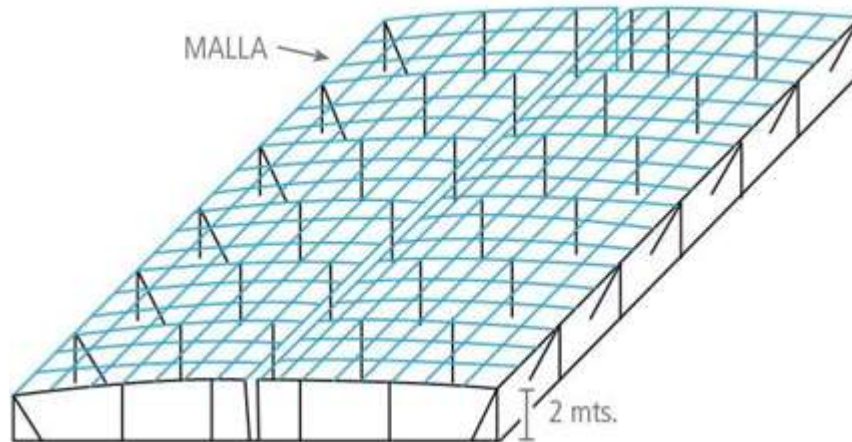


Fig. 1.3. Invernadero tipo plano o parral. Fuente: (Cultivos, 2017)

Estructura vertical: está compuesta por soportes rígidos los cuales están situados en las esquinas y sirven para tensar las cuerdas de alambre en las cubiertas.

Estructura horizontal: está constituida por dos mallas de alambre que están colocadas de tal forma que puedan soportar y sujetar el plástico que será utilizado para la cubierta.

Tabla 1.1

Ventajas y desventajas del invernadero tipo plano o parral.

Ventajas	Desventajas
Construcción económica.	Instalación de ventanas es demasiado difícil.
Uniformidad luminosa.	Poco volumen de aire.
Adaptación a cualquier tipo de terreno.	Frágil.
Resistencia al viento.	Rápido envejecimiento.
	Formación de bolsas de agua por lluvia.

Invernadero tipo raspa y amago: Es el resultado de transformar los invernaderos planos para que puedan evacuar el agua de la lluvia que se acumula en la lámina de plástico (Fig. 1.4). En este tipo de invernadero, se aumenta la altura máxima de la cumbre formando la raspa y en la parte más baja, comúnmente llamada amago, se unen las mallas de la cubierta al suelo y se fijan con horquillas de hierro para poder colocar los canales para el desagüe del agua pluvial.

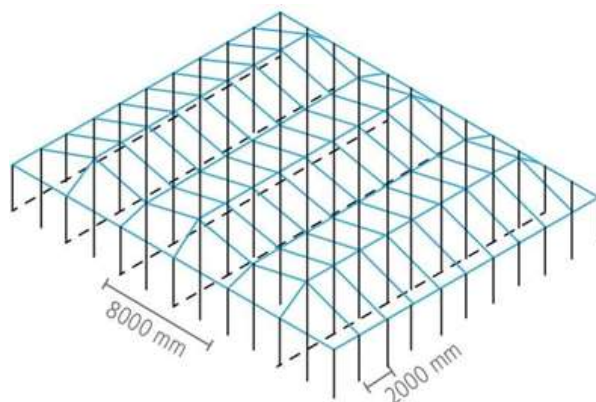


Fig. 1.4 Invernadero tipo raspa y amago. Fuente: (Cultivos, 2017)

Tabla 1.2

Ventajas y desventajas del invernadero tipo amago.

Ventajas	Desventajas
Barato y sencillo.	Realizar el cambio de plástico en la cubierta resulta complicado.
Permite la instalación de ventanas cenitales.	Mayor superficie, mayores pérdidas de calor.
Mejor capacidad de control de clima.	No aprovecha el agua pluvial.

Invernadero tipo capilla: este invernadero se caracteriza por la forma de su cubierta, que es de arcos hechos en su totalidad de metal (Fig. 1.5). Su uso es el más común. La ventilación se realiza a través de ventanas frontales y laterales, pero cuando se trata de varios invernaderos unidos, la implementación de ventilación se complica.



Fig. 1.5. Invernadero tipo capilla. Fuente: (Cultivos, 2017)

Tabla 1.3

Ventajas y desventajas del invernadero tipo capilla.

Ventajas	Desventajas
Buen reparto de luz.	Dificultad para la ventilación
Fácil instalación.	
Fácil evacuación de agua.	

Invernadero gótico: esta estructura se caracteriza por tener arcos tipo ojival esto permite albergar mayor volumen de aire, lo que proporciona un mejor microclima y mejor iluminación. Este tipo de invernadero está diseñado para adaptarse a cualquier tipo de cultivo, ya que su composición está orientada a climas y condiciones extremas (Fig. 1.6).



Fig. 1.6. Invernadero gótico. Fuente: (Cultivos, 2017)

Tabla 1.4

Ventajas y desventajas del invernadero tipo gótico.

Ventajas	Desventajas
Alta duración y resistencia a la corrosión.	Exige ciertos cuidados y condiciones para su mantenimiento
Mayor ventilación y entrada de luz.	
Montaje rápido y fácil.	
Permite realizar labores agrícolas mecanizadas en su interior.	

Invernadero asimétrico o inacral: la diferencia que tiene este tipo de invernadero con el raspa y amago es que se aumenta el tamaño de la superficie de la cara expuesta al sur con el objetivo de aumentar la captación de radiación solar (Fig. 1.7). El uso del invernadero asimétrico se extiende en zonas con climas tropicales. La ventilación de este tipo de invernadero la mayoría de las veces es fijada y es resuelta a través de aperturas que permiten la ventilación natural y la salida de aire caliente.

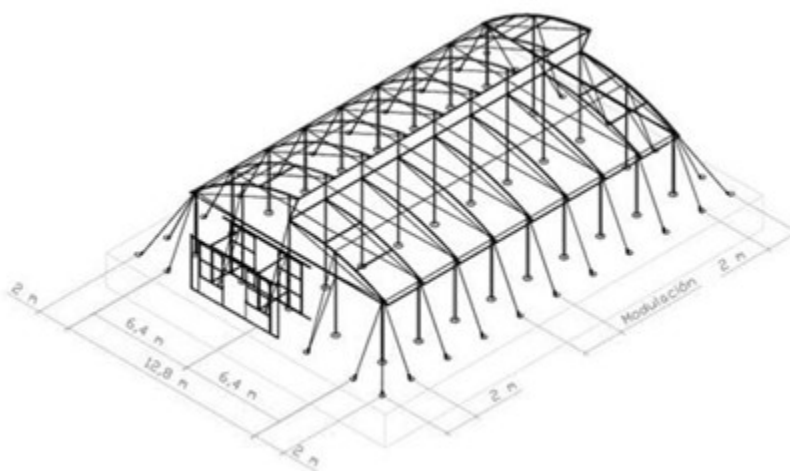


Fig. 1.7 Invernadero asimétrico. Fuente: (Cultivos, 2017)

Tabla 1.5

Ventajas y desventajas del invernadero tipo asimétrico.

Ventajas	Desventajas
Es una estructura económica.	Pérdidas de calor
Buen aprovechamiento de luz en la época invernal.	Nulo aprovechamiento de agua pluvial.
Elevada inercia térmica debido a su gran volumen unitario.	Dificultad para cambiar el plástico de la cubierta.
Buena ventilación.	
Resistencia a vientos fuertes.	

Invernadero tipo túnel o semicilíndrico: Este invernadero no tiene paredes rectas, está formado por uno a varios módulos con una serie de arcos de metal los cuales, por no necesitar de zapatas hacen su traslado e instalación más fácil de realizar y tiene una mayor capacidad para el control de los factores climáticos (Fig. 1.8).



Fig. 1.8 Invernadero tipo túnel. Fuente: (Cultivos, 2017)

Tabla 1.6

Ventajas y desventajas del invernadero tipo túnel.

Ventajas	Desventajas
Fácil instalación.	No aprovecha el agua de la lluvia.
Permite el accionamiento mecanizado de ventilación.	
Buen reparto de luminosidad dentro del invernadero.	
Barato y sencillo.	
Resistencia a vientos fuertes.	

Invernadero de cristal o tipo venlo: Este tipo de invernadero tiene una estructura metálica con cubierta de vidrio y usualmente es usada al norte de Europa (Fig. 1.9). El techo está formado por paneles de vidrio que descansan sobre canales de recogida de agua pluvial y sobre un conjunto de barras transversales.



Fig. 1.9. Invernadero tipo venlo. Fuente: (Hidroponía, 2017)

Tabla 1.7

Ventajas y desventajas del invernadero tipo venlo.

Ventajas	Desventajas
Buena estanqueidad de agua, lo que facilita una mejor climatización.	Costo alto. Naves muy pequeñas debido a la complejidad de la estructura. Menor transmisión de la luz.

1.5.4 Tipos de cubiertas

Las cubiertas son muy importantes para los invernaderos ya que protegen a los cultivos de los rayos directos del sol. La mayoría de los materiales utilizados en las cubiertas están fabricados para una buena resistencia y una buena transmisión de luz. Los materiales más comúnmente utilizados a nivel comercial como cubierta en los invernaderos se pueden clasificar de la siguiente manera:

Cubiertas rígidas:

- Vidrio: Fue el primer material utilizado para el recubrimiento de los invernaderos. Este material necesita de estructuras sólidas y estables que eviten la ruptura de este al ser colocado en la cubierta del invernadero. Presenta una alta transmittividad a la radiación solar y nula a la infrarroja de onda larga. El espesor utilizado para los invernaderos va de 2 a 4 mm.
- Policarbonato (PC): Es un termoplástico muy ligero y con buena resistencia, se presenta en forma de doble pared y su espesor va de 4 a 16 mm.
- Poliéster: Es un material fabricado con poliésteres insaturados y con fibras orgánicas, estas provocan una mejor difusión de luz, así como una mejor transmittividad de luz solar y baja para la radiación de onda larga.
- Policloruro de vinilo (PVC): Se presenta en placas lisas o curvas y tiene un espesor de 1 a 1.5 mm, una de sus principales ventajas es su alta transmitancia de la radiación visible.

Cubiertas flexibles: Son materiales sintéticos y termoplásticos, es decir, pueden ser sometidos a diferentes ciclos térmicos, pudiendo ser fundidos y salificados tantas veces sean necesarias. Son materiales ligeros y de fácil transporte. (greenhouses, s.f.)

- Polietileno (PE): Actualmente es uno de los plásticos flexibles más usados y esto se debe a su bajo precio, a las propiedades mecánicas que posee y a la facilidad que tiene para poder agregarle aditivos que ayuden a mejorar su presentación. El PE, junto con el PVC son los termoplásticos con más demanda en el mercado.

1.5.5 Microclima

Un microclima es el medio que presenta características diferentes al clima que lo rodea, generalmente se presentan dentro de espacios medianamente reducidos donde existen variables particulares como, temperatura, humedad relativa, luz, vegetación, altitud, latitud, etc.

Existen distintos tipos de microclimas dependiendo generalmente de su ubicación, un ejemplo de esto son los artificiales, los cuales son diseñados y creados por los humanos dentro de zonas urbanas, donde existen grandes emisiones de calor, efecto invernadero, todo esto debido al cambio climático que se presenta en la actualidad.

1.6 Parámetros de control

1.6.1 Temperatura

La temperatura es uno de los factores (junto con el CO₂, humedad, luz, etc.) que influye en el óptimo desarrollo de las plantas, cada una tiene una temperatura óptima necesaria para su crecimiento, esto también depende del estado de desarrollo en el que se encuentre, ya que tienen un ciclo biológico que determina su sensibilidad a la temperatura. Por debajo o encima de esta temperatura ideal, es posible que la planta no consiga desarrollarse correctamente, ya que sus ciclos biológicos pueden alterarse.

La planta debe estar expuesta a una temperatura ideal para llevar a cabo diferentes funciones, una de las principales es la apertura o cierre de las estomas, las cuales son células especializadas de las hojas que regulan los procesos de transpiración y enfriamiento (CANNA), y son indispensables para los procesos de la fotosíntesis, transpiración y respiración de la planta. En condiciones óptimas estos estomas se abrirán para poder realizar el intercambio gaseoso, es decir la entrada de dióxido de carbono y salida de oxígeno. Si la temperatura a la que está expuesta la planta aumenta, también aumenta la cantidad de agua que se pierde por transpiración, y los estomas se cerrarán como método de protección para evitar la pérdida excesiva de agua. Esto tiene un efecto negativo, pues con los estomas cerrados se restringe la entrada de dióxido de carbono que es fundamental para realizar la fotosíntesis.

1.6.2 Humedad y suelo

El agua es la molécula esencial para la vida; en las plantas constituye típicamente del 80 al 95% de la masa de los tejidos en crecimiento y desempeña varias funciones únicas. Es el solvente más abundante y mejor conocido y, como tal, permite el movimiento de moléculas dentro y entre las células (Moreno, 2009). Teniendo en cuenta la importancia del agua sobre las plantas, un exceso de ella o una limitación puede ser un factor inductor de situaciones adversas o estresantes.

La humedad relativa se refiere a la cantidad de agua en forma de vapor existente en el aire, comparándolo con la cantidad máxima de agua que puede ser mantenida a una temperatura específica. La humedad relativa es importante para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, ya que una buena humedad en el aire ayudará a que la planta pierda menos agua, pues si esto ocurre, los estomas de las plantas procederían a cerrarse y con esto la fotosíntesis se frenaría. Si esto sucede, no podrá absorber más CO_2 , y el CO_2 es indispensable para llevar a cabo este proceso. De igual forma, al cerrarse los estomas la temperatura en la planta aumentaría.

El suelo es el medio común de absorción de agua por parte del reino vegetal, el agua contenida en él, es decir, la humedad del suelo. La humedad del suelo que necesitan las plantas dependerá de la especie a la que estas pertenecen, el tipo del suelo, las condiciones, su estructura, por mencionar algunas.

La capacidad del suelo para retener el agua es importante ya que esto permitirá el acceso de las plantas a ella. Los suelos contienen diferente cantidad de agua dependiendo de su textura y estructura (Lincoln Zotarelli, 2019).

Después de un riego excesivo en el suelo o de una intensa lluvia, el agua se desplazará de forma rápida hacia capas más profundas del suelo, esto debido a la gravedad, este fenómeno es conocido como “Drenaje”. La capacidad de drenaje de un suelo dependerá de las características del mismo.

Por otro lado, la capacidad máxima de almacenamiento de agua que el suelo puede retener después del agua libre o drenaje se conoce como Capacidad de Campo, por el contrario, cuando en el suelo no existe agua disponible se conoce como Punto de Marchitamiento Permanente (News, 2018).

La cantidad total de agua disponible para absorción de la planta es el “agua disponible para la planta” que es la diferencia entre la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitamiento Permanente (Fig. 1.10) y a menudo se expresa como un porcentaje en volumen (volumen de agua/ volumen de muestra de suelo).

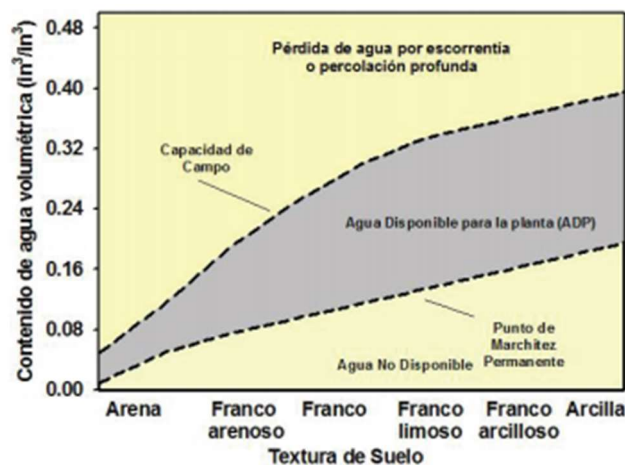


Fig. 1.10. Relación general entre el agua disponible para la planta, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, el agua no disponible y la clase de textura del suelo. Fuente: (Robaina, 2018)

1.6.3 Luz

La luz es una forma de radiación electromagnética, un tipo de energía que viaja en ondas. Otros tipos de radiación electromagnética que encontramos en nuestra vida diaria incluyen las ondas de radio, microondas y rayos X. En conjunto, todos los tipos de radiación electromagnética conforman el espectro electromagnético (Fig. 1.11) (Hyperphysics, s.f.)

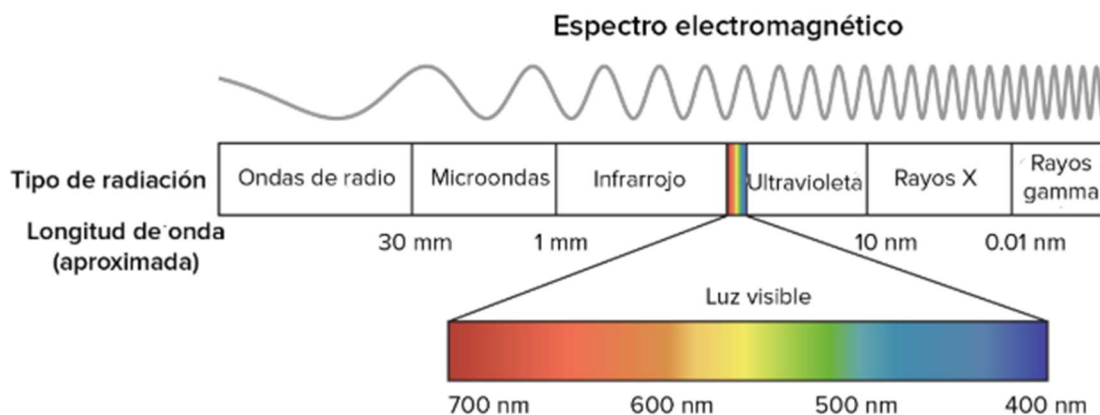


Fig. 1.11. Espectro electromagnético. Fuente: (Estremera)

La planta necesita luz para llevar a cabo procesos importantes para su crecimiento y desarrollo, existen tres aspectos principales que se deben considerar al momento de hablar sobre la luz, la calidad, cantidad y la duración. Estas tres características dependerán de la ubicación geográfica, del clima, de la estación del año y de la hora del día. Antes de describir cómo afectan, la calidad, cantidad y la duración de la luz al desarrollo de la planta se hará mención a la fotosíntesis, uno de los procesos más importantes para el crecimiento de las plantas ya que éstas utilizan la luz como fuente de energía para llevar a cabo dicho proceso.

La fotosíntesis es la reacción química donde el dióxido de carbono (CO_2) y el agua forman azúcares y producen oxígeno en presencia de energía lumínica. Las plantas utilizan los azúcares producidos en la fotosíntesis como fuente de alimento. En condiciones naturales, el sol proporciona la energía para iniciar el proceso de fotosíntesis (Purves, 2004).

Las plantas utilizan sólo una parte específica del espectro visible para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, esta región recibe el nombre de Radiación Fotosintética Activa (RFA) la cual se encuentra entre los 400 y 700 nm de la radiación solar (Fig. 1.12).

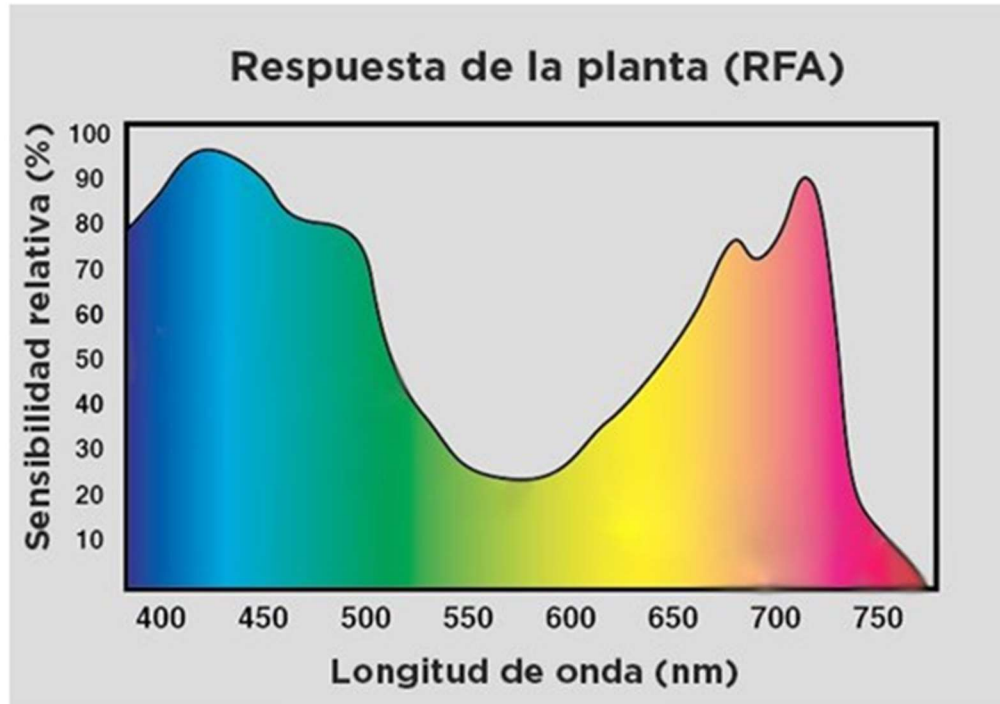


Fig. 1.12. Reacción fotosintética de la planta. Fuente: (Led, 2019)

Como se puede observar en la gráfica de la Fig. 1.12, entre más alto se encuentre la curva, mejor reaccionará la planta a esta longitud de onda, que se encuentra, como ya se mencionaba, entre los 400 y 700 nm, es decir, entre el color azul y rojo respectivamente.

Al menos el 5% de la luz del sol es utilizada para realizar la fotosíntesis. La fotosíntesis se realiza en los cloroplastos los cuales contienen al pigmento llamado clorofila, que es el encargado de absorber la luz solar. Las plantas contienen cinco distintos tipos de clorofilas, pero los tipos a y b son los principales pigmentos fotosintéticos (Bullerjahn, 1993). La clorofila absorbe la luz roja y violeta, y el tipo b la luz roja y azul, ambos tipos reflejan la luz verde, esta es la razón por la que las hojas de una planta son de este color.

La calidad de la luz se refiere al color o la longitud de onda. El sol emite longitudes de onda entre los 280 y los 2800 nm (97 % de la distribución total del espectro). Se dividen en tres regiones: Ultravioleta (100 a 380 nm), luz visible (380 a 780 nm) e infrarroja (700 a 3000 nm) (Baskin, 1998)

Como se mencionó anteriormente, las plantas fotosintetizan en los 400 y 700 nm, los cuales son dos puntos críticos de absorción: la luz roja y la luz azul.

- Luz azul: es responsable del crecimiento vegetativo y de las hojas, y es importante para las semillas y las plantas jóvenes porque ayuda a reducir el estiramiento de la planta.
- Luz roja: El fitocromo (un fotorreceptor) dentro de las hojas es más sensible a la luz roja y responde a esta. La luz roja es importante en la regulación del florecimiento y la producción de frutos y ayuda a aumentar el diámetro del tallo, así como estimular la ramificación.

Otra parte importante sobre la calidad de la luz, son las distintas fuentes de luz, ya que estas distribuyen la luz de manera diferente:

- Lámpara incandescente: Provoca una tendencia lineal con poca luz que proviene del espectro azul y con mucha luz que proviene del espectro rojo.
- Lámparas fluorescentes: La mayor parte de su luz la generan en el espectro azul, verde y rojo; el nivel de luz más alto proviene del espectro azul.
- Lámpara de sodio de alta presión: El punto crítico más alto es el verde, seguido de cerca por el rojo.
- Lámpara halógena: El punto crítico más alto está en el espectro verde; el espectro rojo tiene aproximadamente la mitad del punto crítico de energía, seguido por el azul.
- Diodos emisores de luz (LED): Este tipo de luz emite una longitud de onda específica. El fabricante puede producir estos diodos en el color o longitud de onda específicos (monocromático) que un cliente necesite (Lopez, 2018).

La velocidad en la que se realice la fotosíntesis dependerá de la cantidad de luz recibida por la planta, esto quiere decir que la reacción de la fotosíntesis es más alta a medida que la RFA aumenta. Pero cada especie de planta comienza a realizar la fotosíntesis a diferentes niveles de luz, a esto se le conoce como compensación de la luz (Reece, 2011). Este punto empieza cuando la cantidad de la energía de la luz es suficiente para realizar la actividad fotosintética.

A mayor cantidad de luz mayor niveles de fotosíntesis, pero a medida que la intensidad de la luz aumenta, la velocidad de la fotosíntesis llega a un punto máximo. Este punto donde la intensidad de la luz no aumenta la velocidad de la fotosíntesis se llama punto de saturación de la luz (Fig. 1.13).

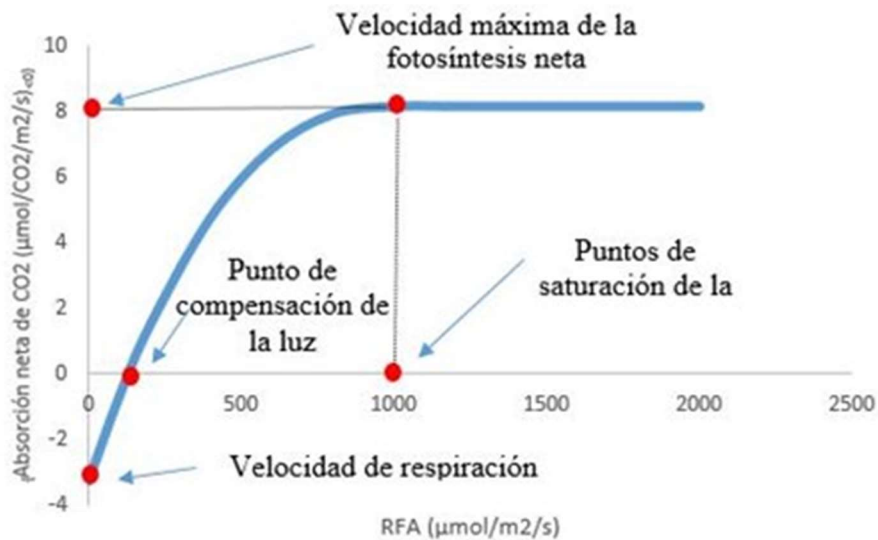


Fig. 1.13 Gráfica del punto de compensación de la luz y del punto de saturación de la luz. Fuente: (Agriculturers, 2019)

El fotoperiodismo es la respuesta biológica a un cambio en las proporciones de luz y oscuridad en un ciclo de 24 horas (Flores, 1997). La cantidad de horas de luz impacta directamente en el florecimiento. Las plantas se pueden dividir en tres categorías según la duración del día que se requiere para el florecimiento:

- Plantas de día corto (PDC): Florecen a principios de primavera o en otoño, ya que deben tener un periodo de luz bajo, expuestas a 10 horas 20 minutos de luz al día.
- Plantas de día largo (PDL): Son plantas que florecen en verano ya que necesitan un periodo de luz largo, generalmente a 16 horas de luz al día.
- Plantas de día neutro (PDN): Florecen sea cual sea el periodo de luz al día.

1.7 Rábano

El rábano (*Raphanus sativus* var *sativus*) o rabanito (Fig. 1.14), pertenece a la familia de las Crucíferas. La importancia de esta familia se debe a su contenido de minerales como el potasio y sodio, los cuales están presentes en mayor cantidad que en otras hortalizas. De su aporte vitamínico se puede mencionar la vitamina C, la cual actúa como un antioxidante, favoreciendo la formación de colágeno y glóbulos rojos.



Fig. 1.14. Rábano (*Raphanus sativus* var *sativus*). Fuente: (*Xemphintap, s.f.*)

En 2017, México exportó a cuatro países; Estados Unidos destaca como principal importador de esta hortaliza con 37 mil toneladas adquiridas, las cuales generaron al país un ingreso de 14 millones 488 mil dólares (Pesquera, 2018).

1.7.1 Taxonomía y morfología

Tabla 1.8
Taxonomía y morfología del rábano.

Familia	<i>Cruciferae</i>
Nombre científico	<i>Raphanus sativus</i> var <i>sativus</i>
Planta	Anual o bienal
Sistema radicular	Raíz gruesa, carnosa, de forma y tamaño variable, su piel es de color rojo, rosa, blanco o de diversos colores.
Tallo	Pequeño antes de la floración con una roseta de hojas. Cuando florece, se alarga alcanzando una altura de 0,5 a 1 m.
Hojas	Son basales, unidas al tallo, pequeñas, algo pubescentes y dentadas.
Flores	Dispuestas sobre pedicelos delgados e racimos grandes y abiertos con pétalos color rosa, amarillentos o blancos, delgadas.
Fruta	Silícula de 3-10 cm de longitud, esponjoso. Semillas globosas rosadas o castaño-claras, con un tinte amarillento; cada fruto contiene de 1 a 10 semillas incluidas en un tejido esponjoso.

Fuente: (Faxsa, s.f.)

1.7.2 Temperatura

El rábano es propio de los climas templados y puede ser muy tolerante al frío.

La temperatura necesaria para el desarrollo de la planta de rábano oscila entre los 18-30°C, con temperaturas mínimas de 5°C y máximas de 35°C. La exposición de la planta a temperaturas por debajo de los 7°C durante un periodo largo puede provocar floración prematura (Faxsa, s.f.)

1.7.3 Humedad del suelo

La humedad necesaria para el buen desarrollo y crecimiento del rábano ronda entre 60% y 80%. Se recomienda regarla con frecuencia a través del riego por goteo, aproximadamente cada planta debe recibir 450 ml cada tercer día, esto es necesario para evitar el sabor amargo de la raíz.

La falta de agua ocasiona que la raíz se vuelva dura y si, además está acompañada de temperaturas altas se corre el riesgo de tener floración prematura. Otro efecto negativo que se tiene por la falta de humedad en la tierra es que las raíces se agrietan y esto ocasiona que el precio del producto baje considerablemente.

1.7.4 Germinación

La germinación de la planta se da entre los 7 y 10 días. Una vez que salen las primeras plántulas se debe colocar la charola en un lugar con luz solar, pero en donde no le den directamente los rayos del sol en las horas más intensas (a medio día). La luz del sol de la mañana o de la tarde son muy adecuadas.

1.7.5 Fotoperiodo

El rábano pertenece al grupo de plantas de día largo, ya que el ciclo de luz necesario para su crecimiento y floración es de alrededor 16 horas.

1.7.6 Plagas, enfermedades y fisiopatías del rábano

Las plagas más comunes que pueden afectar a los cultivos de rábano son:

- Pulgones: Está es una de las plagas más comunes en los cultivos son insectos pequeños de aproximadamente 1-3mm de longitud y atacan a los brotes jóvenes con alto contenido de azúcar (Santos, 2017).
- Moscas blancas: Se manifiestan cuando los cultivos se encuentran en medios con demasiada humedad y altas temperaturas, estas aparecen en el envés de las hojas.

La enfermedad más importante que perjudica al rábano es:

- Mildiu: Es un patógeno común durante la temporada de primavera y se manifiesta como pequeñas manchas amarillas en las hojas de la planta, posteriormente, después de transcurrido un tiempo, estas manchas se tornan de un color marrón oscuro, terminando por secar las hojas completamente (Nicola, 2009).

Fisiopatías:

- Textura dura: Esto es ocasionado por la exposición del rábano a suelos con déficit hídrico.
- Ahuecado: Se manifiesta cuando en ocasiones el rábano se deja madurar demasiado tiempo
- Sabor picante: El sabor picante se presenta en el cultivo de rábano cuando este ha sufrido un exceso de calor o una recolección temprana.
- Raíces laterales: Esta fisiopatía se expone debido a un riego excesivo durante el periodo cercano a la madurez.

1.8 Control ON/OFF

Un sistema de control es un dispositivo que recibe variables de entrada que provienen del sistema que será controlado, llamado planta. Este dispositivo compara las señales de entrada con el valor deseado, también conocido como *setpoint*, para así poder producir una señal de salida que mantendrá el valor deseado. Esta diferencia será usada para poder manipular la variable controlada.

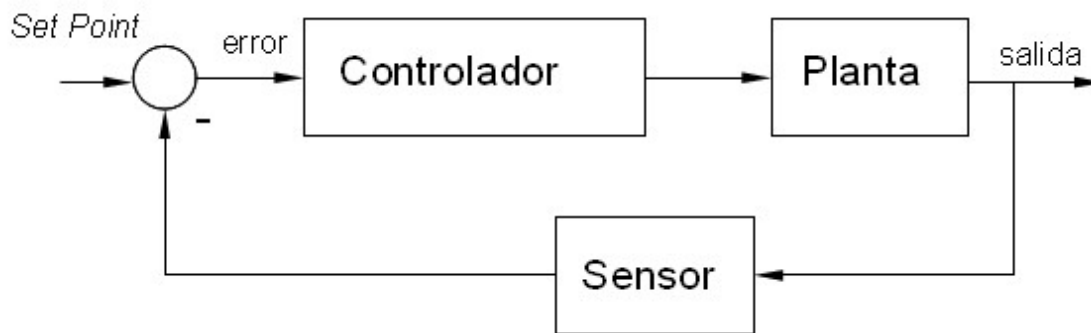


Fig. 1.15. Esquema general de un sistema de control. Fuente: (Rezende, 2016)

Sistemas de control retroalimentado o sistema de lazo cerrado: En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema (Ogata, 1998).

El control ON-OFF o también conocido como TODO-NADA o ABIERTO-CERRADO es la forma más simple de control por retroalimentación. Este tipo de control utiliza un algoritmo para revisar si la variable del proceso está por encima o por debajo del *setpoint* determinado (Villajulca, 2019), es decir, la variable de control del controlador cambia entre “totalmente ON” a “totalmente OFF” sin estados intermedios.

Este control tiene las siguientes características:

- Tiene un simple mecanismo de construcción lo que hace que tenga un amplio uso y que la mayoría de veces sea utilizado en sistemas de regulación de temperatura.
- Funcionamiento óptimo en procesos de tiempo de retardo mínimo y velocidad de relación lenta.
- Variación cíclica continua de la variable controlada.

Tabla 1.9
Ventajas y desventajas del control ON-OFF

Ventajas	Desventajas
Es la forma más simple de control. Bajo precio de instalación. Fácil instalación y mantenimiento. Amplia utilización en procesos de poca precisión.	Mínima precisión, No recomendable para procesos de alto riesgo.

Capítulo 2. Diseño, Implementación y Construcción del Invernadero

2.1 Estructura

La estructura seleccionada para el prototipo de invernadero fue la de tipo túnel, esto en función de los siguientes aspectos:

- Su fácil instalación y traslado gracias a que los arcos que forman la estructura no necesitan de cimientos.
- El control de variables climáticas dentro del invernadero es más fácil de realizar porque gracias a que esta estructura no incluye paredes rectas
- Menor cantidad de sombras y mayor reparto de luminosidad dentro del invernadero.
- Se reduce la condensación del agua y el goteo de esta sobre los cultivos, ya que sus paredes curvas hacen que la evacuación del agua sea sobre estas.

2.1.1 Diseño de la estructura del prototipo de invernadero.

El diseño de la estructura del prototipo de invernadero se realizó con ayuda del software SolidWorks (Fig. 2.1) con base a los objetivos planteados en el capítulo anterior. Gracias a este diseño se pudo calcular la cantidad de material necesario para su implementación, así como el espacio que se requirió para su ubicación, la cual fue en la terraza del edificio FCE5, dentro del laboratorio de energía solar en la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.



Fig. 2.1 Diseño de estructura realizado en SolidWorks.

2.1.2 Dimensiones

Las dimensiones (Fig. 2.2) que fueron propuestas para el tamaño del prototipo se eligieron en función a la cantidad de macetas que se colocaron dentro del mismo (tres macetas), así como a las medidas de éstas (Fig. 2.3). También influyó el espacio que fue necesario para poder instalar y maniobrar los sistemas que fueron colocados dentro del prototipo de invernadero.

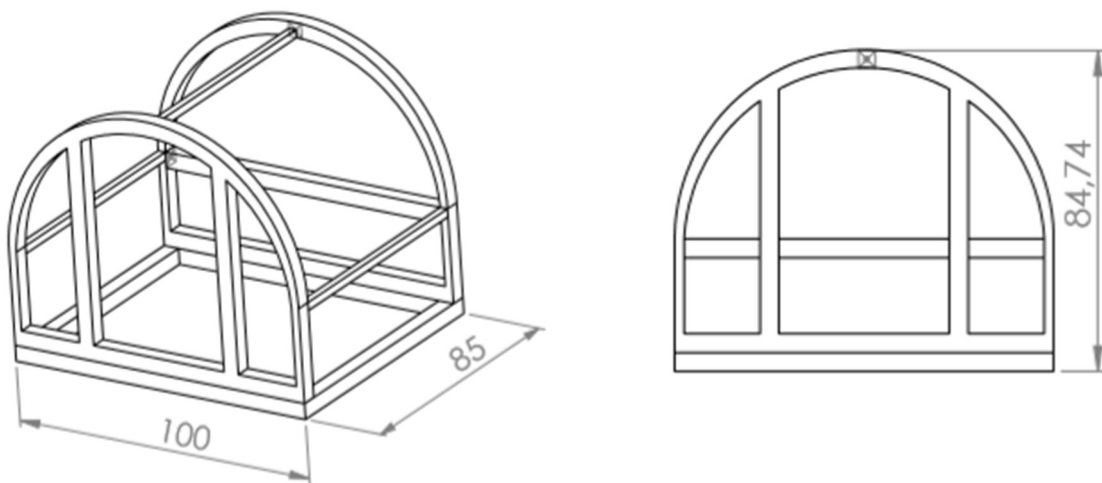


Fig. 2.2 Dimensiones de la estructura del prototipo de invernadero

Como se puede observar en la Fig. 2.2, la base de la estructura tiene dimensiones de 100 cm de ancho, 85 cm de largo y 85 cm de alto, referenciado con la medida del radio del arco. Por la parte de enfrente, la estructura tiene una abertura, la cual fue utilizada para facilitar el trabajo de instalación de los mecanismos necesarios para la implementación del microclima. La estructura está conformada por barras que unen el arco trasero con el delantero, estas barras también fueron utilizadas para sostener la cubierta del invernadero.

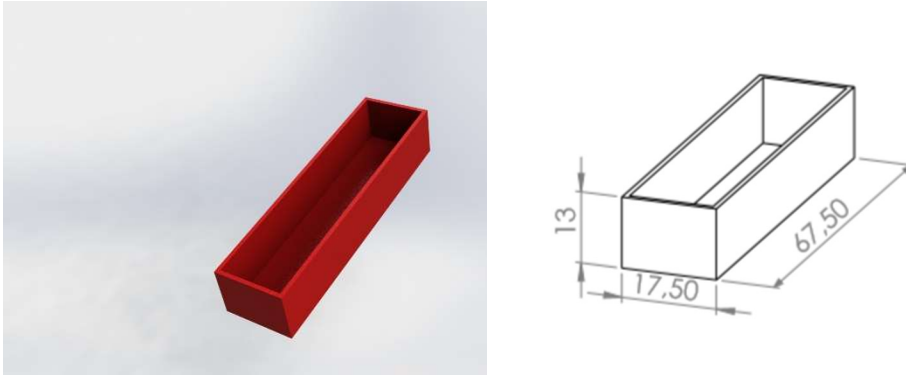


Fig. 2.3. Dimensiones de maceta.

El número de macetas colocadas dentro del prototipo fue de 3, como se puede observar en la figura 2.3, las macetas tienen 67.5 cm de largo y 17.5 cm de ancho, así como 13 cm de profundidad, ideal para el cultivo del rábano, ya que éste necesita de al menos 12 cm de oscuridad.

2.1.3 Construcción del prototipo de invernadero

La estructura del invernadero se construyó con barras de metal para lograr que esta fuera más resistente a los vientos y a las lluvias. Las barras de metal fueron cortadas con un disco especial para materiales rígidos (Fig. 2.4), el acceso a esta cortadora se consiguió en el taller de diseño y maquinado del Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores (CIDS) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Cabe recalcar, que al realizar el corte de las barras de metal se hizo el uso de equipo de seguridad como: guantes, gafas de protección y principalmente, bajo la supervisión del personal capacitado.



Fig. 2.4 Corte de barras de acero para la estructura del prototipo.

Teniendo todas las partes de la estructura debidamente cortadas con las medidas correspondientes se realizó la construcción de los arcos característicos del invernadero tipo túnel, esto se logró doblando repetidas veces la barra de metal hasta lograr la forma deseada. Posteriormente, se continuó con la unión de todas las piezas con ayuda de soldadura de 1/8 especial para metal cumpliendo las medidas de seguridad necesarias para evitar cualquier accidente, esto quiere decir; el uso de careta para soldar y guantes (Fig. 2.5), al igual que la supervisión del técnico encargado del taller.



Fig. 2.5. Soldado de todas las piezas de metal.

Habiendo concluido con el ensamble de todas las partes de la estructura (Fig. 2.6) se lijó todo el esqueleto del invernadero para eludir cualquier rebaba o imperfección que pudiera afectar a la cubierta plástica.



Fig. 2.6. Estructura del prototipo de invernadero terminada.

Se utilizó una pintura de recubrimiento térmico anticorrosión color negra (Fig. 2.7) para proteger cada barra de metal de posibles daños ocasionados por el medio ambiente y prolongar el tiempo de vida del metal.



Fig. 2.7. Recubrimiento del prototipo con pintura anticorrosión

Como se mencionó en el capítulo uno, la cubierta utilizada en el prototipo de invernadero es un factor muy importante a la hora de satisfacer las necesidades del cultivo y su elección no debe tomarse a la ligera. La transparencia, flexibilidad, el rendimiento térmico o la resistencia al fuego son algunos de los factores decisivos para escoger un buen material de cubierta. Para este trabajo de investigación se optó por escoger una membrana plástica flexible de polietileno de color verde, perteneciente a los termoplásticos (Fig 2.8). Este tipo de plástico refleja la parte verde del espectro de luz por lo que no permite que las longitudes de onda verde penetren al invernadero, pero permite la entrada de longitudes de luz de alta y baja energía (azul, rojo y amarillo).



Fig. 2.8. Membrana plástica flexible de polietileno de color verde

Esta película plástica está adicionada con antioxidantes y protectores UV para evitar su degradación por este tipo de radiación y de igual manera evitar la degradación térmica. A continuación, se presenta una tabla de características sobre este plástico en particular.

Tabla 2.1

Características de la membrana plástica flexible de polietileno color verde.

Características	
Calibre	180 micras
Protección	UV
Durabilidad de tratamiento UV	Dos años
Usos comunes	Se utiliza generalmente donde los invernaderos son expuestos constantemente a temperaturas bajas
Toxicidad	Nula

La sujeción del plástico a la estructura es fundamental, pues se debe lograr que todo el invernadero quede perfectamente sellado y de esta forma evitar que el medio externo al interior del invernadero provoque alteraciones en el microclima que será implementado para

el desarrollo del cultivo de rábano, también se evita el ingreso de insectos que puedan provocar plagas que afecten a las plantas.

Por esta razón, se utilizaron perfiles de aluminio con función de sujetadores que se colocaron en el arco trasero, arco delantero y base, así como alambres zigzag, los cuales crean presión entre el perfil de aluminio y el plástico (Fig. 2.9) provocando un efecto de estar engrapado.



Fig. 2.9. Sujeción de plástico con perfil de aluminio y alambre zigzag

Para fijar los perfiles de aluminio a la estructura se utilizó un taladro para perforar los lugares donde fueron colocados dichos perfiles, también se empleó una remachadora para sujetarlos (Fig. 2.10). Una vez teniendo los perfiles perfectamente sujetos a la estructura (Fig. 2.11) se continuó colocando el plástico (Fig. 2.12 y Fig. 2.13) de tal manera que no se formaran bolsas, es decir, que el plástico quedara completamente estirado.



Fig. 2.10. Colocación de remaches.



Fig. 2.11. Perfiles sujetadores de aluminio.



Fig. 2.12. Vista lateral del prototipo de invernadero con el recubrimiento plástico.



Fig. 2.13. Vista frontal del prototipo de invernadero con el recubrimiento plástico

En la Figura 2.13 se puede observar un acceso al interior del prototipo, este acceso fue hecho con cremalleras para asegurar que el invernadero siga perfectamente sellado.

2.2 Etapa de control

2.2.1 Selección de microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que puede ser usado para diferentes propósitos, está compuesto por una unidad central de proceso (CPU), memorias (ROM y RAM), dispositivos de entrada salida como convertidores analógico/digital (CAD), conversores digital/analógico (CDA), etc.

Para este proyecto de tesis, se decidió utilizar el microcontrolador Arduino ATmega2560 ya que muy probablemente es la placa más capaz de las pertenecientes a la familia Arduino. Está constituido por 54 pines digitales, un cristal oscilador de 16 MHz, entrada para alimentación de la placa, conexión USB, por mencionar los elementos más importantes. La comunicación de la placa Arduino ATmega2560 con una computadora se lleva a cabo a través del puerto serie (Figura 2.14)



Fig. 2.14. Arduino ATmega2560. Fuente: (Selvin, 2018)

El bajo costo en comparación con otros microcontroladores en el mercado, la gran cantidad de periféricos existentes para él, el ser multiplataforma, es decir, el software de Arduino funciona en sistemas operativos como Windows, Macintosh OSX, Linux, etc, mientras que la mayoría de los entornos para otros microcontroladores están limitados únicamente a Windows, fueron las principales razones para elegir este microcontrolador.

Tabla 2.2
Especificaciones de Arduino ATmega2560

Arduino ATmega2560	
Voltaje de operación	5VDC
Voltaje de entrada	7-12VDC
Pines digitales de entrada/salida	54
Pines análogos de entrada	16
Corriente por cada Pin	40 mA
Corriente entregada en el Pin de 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB (8KB usados por el bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

Fuente: (Selvin, 2018)

La licencia del software de Arduino está publicada bajo condiciones libres y está preparado para ser ampliado por programadores experimentados. El lenguaje de programación puede ser ampliado a través de librerías C++; si se desea profundizar, se puede programar en el lenguaje AVR C, en el cual está basado, de la misma manera se puede añadir directamente códigos de programación en AVR C.

2.2.2 Control de temperatura

Para recapitular, la temperatura juega un papel sumamente importante en los ciclos biológicos del rábano ya que, si está por encima o por debajo de la temperatura ideal para el óptimo crecimiento del rábano, es muy posible que la planta no se desarrolle de manera correcta, provocando enfermedades, malformaciones en los frutos o en casos muy extremos, la muerte de la misma.

Sensor DHT11

Un sensor es un dispositivo eléctrico y/o mecánico que convierte una variable física que se desea medir en una señal eléctrica que contiene información a la variable detectada, para esto, el sensor debe de estar acoplado a un circuito el cual nos ayudará a convertir la señal eléctrica de este a valores que se puedan medir, posteriormente se debe caracterizar el sensor para poder controlar la sensibilidad con la que se podrá detectar la señal enviada por el circuito de acoplamiento y finalmente se procede a la etapa de adquisición de datos.

Sensor de temperatura DHT11: Es un dispositivo que incorpora un circuito que mide la temperatura y la humedad relativa (Fig. 2.15), es uno de los sensores digitales más económicos y accesibles dentro de su categoría, por lo tanto, se debe conectar a los pines digitales del microcontrolador (AOSONG, 2018)

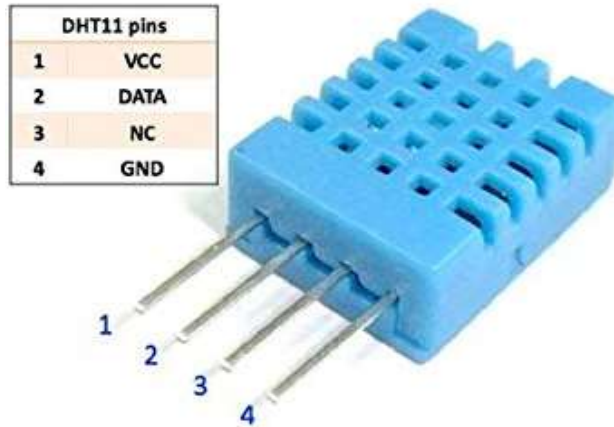


Fig. 2.15. Sensor de temperatura y humedad DHT11. Fuente: (Notch, s.f.)

Cada sensor está calibrado en laboratorio lo cual presenta una alta precisión en la medición de la temperatura y humedad. Internamente realiza la conversión a grados centígrados y su mayor cualidad es su alta calidad, pero la desventaja de este sensor es que sólo proporciona medidas enteras, es decir, sin decimales ya que la resolución que tiene es de 1% para la humedad y 1° para la temperatura (Hernández L. d., Escoger el mejor sensor de temperatura para Arduino, 2018).

La interfaz de comunicación que presenta este dispositivo, el cual es un solo hilo, hace que su uso e implementación en proyectos sea fácil y rápida. Además, tiene un tamaño reducido, su bajo consumo y la capacidad que tiene para transmitir la señal a unos 20 metros de distancia nos demuestra que es una buena opción para implementarlo en proyectos de medición. A este sensor es necesario agregarle una resistencia pull-up la cual nos ayudará a evitar inestabilidades en la señal de salida.

Tabla 2.3
Características técnicas DHT11.

Modelo	DHT11
Alimentación	De 3,3 V a 5 V DC
Corriente máxima	2.5 mA durante la conversión
Señal de salida	Señal digital a través de un solo bus
Rango de medición.	Temperatura: 0°C a 50°C Humedad: 20% a 80%
Precisión	Temperatura: ± 2°C Humedad: ± 5%
Tiempo mínimo por muestra	0,5 seg
Resolución	8 bit
Dimensiones.	15.5mm x 12mm x 5.5mm

Fuente: (Notch, s.f.)

El siguiente diagrama muestra la aplicación o conexión típica del sensor de temperatura y humedad DHT11 a un microcontrolador (Fig. 2.16). Se debe mencionar que la resistencia pull-up que se muestra en la figura 2.14 tiene un valor de 5 K Ω ya que el largo del cable por el que será transmitida la señal es menor o igual a 20 m, cuando la longitud del cable conectado sea mayor a 20 metros, se debe realizar el cálculo correspondiente de la resistencia pull-up para la correcta funcionalidad del sensor. Los períodos entre mediciones no deben ser inferiores a 1 segundo.

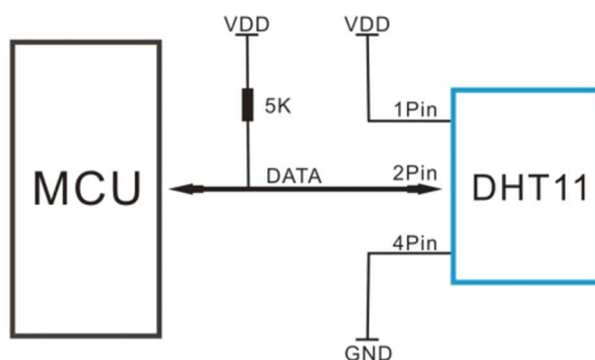


Fig. 2.16 Aplicación típica del sensor DHT11. Fuente: (Lazada, s.f.)

A continuación, se muestra una tabla donde mencionan las características eléctricas de este sensor, estos datos son importantes ya que son parte indispensable para la realización del dimensionamiento fotovoltaico que se llevará a cabo en el capítulo siguiente.

Tabla 2.4
Características eléctricas DHT11.

	Condición	Mínimo	Típico	Máximo
Voltaje	DC	3V	5V	5.5V
Corriente	Medición	0.5mA		2.5mA
	Paro	0.2mA		1mA
	Promedio	100uA		150uA

Fuente: (Lazada, s.f.)

Ventilación (extracción)

La ventilación de un invernadero es un aspecto fundamental para regular la temperatura y humedad dentro de éste. Realizar una renovación del aire en el interior, para conseguir unos valores adecuados de O₂ y CO₂ es crucial. La ventilación permite eliminar del invernadero sustancias nocivas en el ambiente.

El sistema de ventilación sustituye el aire caliente que se encuentra dentro del invernadero por otra masa de aire con una temperatura menor que procede del exterior, esto para disminuir la temperatura, al mismo tiempo se modifica la concentración de gases y de humedad.

El aire caliente se expande ya que, a altas temperaturas, las moléculas de este se mueven rápidamente y se esparcen, ocupando mayor espacio (Fig. 2.17) y como resultado, éstas se separan, dejando espacios vacíos entre ellas. Mayor cantidad de espacios vacíos existentes, da como resultado menor densidad. Por lo tanto, el aire caliente es menos denso que el aire frío, es decir, el aire frío tiene más masa por unidad de volumen que el aire caliente.

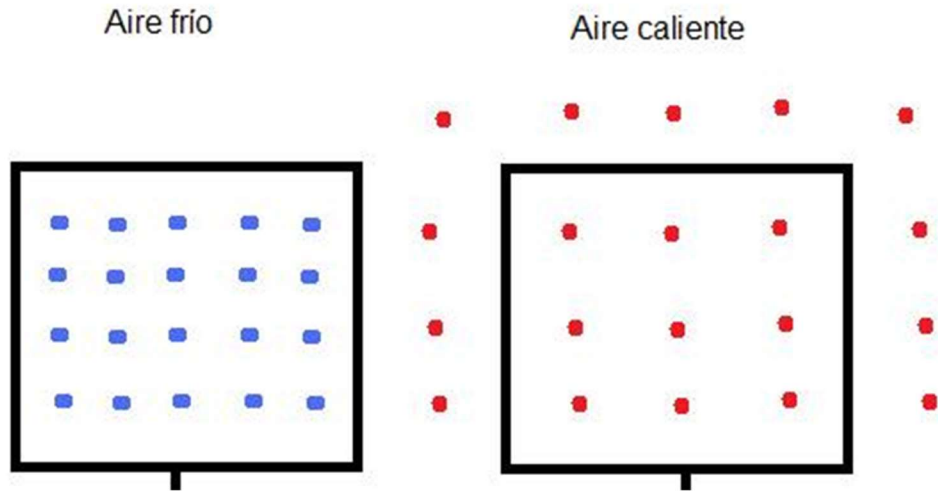


Fig. 2.17. Moléculas de aire frío y aire caliente. Fuente: (Hernández L. , 2010)

Es por esta razón que una masa de aire caliente asciende, porque tiene menor densidad que una masa de aire frío, el cual desciende, en otras palabras, la fuerza de gravedad es la responsable de que el aire caliente suba ya que, en realidad es el aire frío el que baja y desplaza al aire caliente.

La primera opción para disminuir la temperatura dentro del prototipo, se optó por un extractor en forma de esnórquel (Fig. 2.18) hecho con tubo PVC de 4 pulgadas, codos de unión de 90° y 45°, este último para darle la dirección correcta al tubo y ayudarlo a extraer la masa de aire caliente que se encuentra en la parte superior del invernadero y un ventilador de 12 VDC a 0.25 A.



Fig. 2.18. Extractor de aire caliente.

Este extractor fue situado en una de las caras laterales del prototipo de invernadero. Para la inyección de oxígeno y de aire frío, se utilizaron tres ventiladores de 12VDC a 0.25 A, situados en la parte trasera y lateral de invernadero.

Durante el proceso de pruebas, se notó que un solo extractor no era suficiente para disminuir el exceso de la temperatura, por lo que se optó por colocar un extractor de mayor potencia, 12 VDC a 10 Amp, Es muy importante mencionar que, aunque esta opción consume mayor energía, el tiempo en el que se encuentra funcionando no es excesivo.

Calefacción

Algunos cultivos dentro de invernaderos tienen ciclos que concurren dentro del invierno, un descenso de la temperatura por debajo del mínimo puede provocar desórdenes fisiológicos en la planta, así como fisiopatías, etc. Incluso si, el descenso de temperatura tiene suficiente

duración, pueden provocar la muerte del cultivo o la pérdida completa de la cosecha, por eso los sistemas de calefacción son importantes aliados que ayudan a evitar este tipo de situaciones.

Efecto termoeléctrico.

El efecto termoeléctrico es un fenómeno en el cual al aplicar una diferencia de temperatura entre dos materiales semiconductores diferentes (para mejorar la conductividad eléctrica de los semiconductores, se utilizan impurezas añadidas es decir, se dopan a los materiales semiconductores, clasificándoles como semiconductores tipo P o tipo N, según sea el caso.) surge una diferencia de potencial que hace fluir una corriente eléctrica entre las uniones caliente y fría (Serna). Esto se debe a que, los electrones pertenecientes a la unión caliente incrementan su energía en comparación a los que ocupan la unión fría, creando así, una situación de desequilibrio. Los electrones situados en la parte caliente se dirigirán a la parte fría donde disminuirá su energía.

Esta diferencia de potencial continuará existiendo hasta que se llegue a un estado de equilibrio entre los electrones que fluyen por el gradiente de temperaturas de la unión caliente a la fría (Mieg, 2006). Pero si se mantienen las diferencias de temperaturas, como resultado el desequilibrio seguirá existiendo y se seguirá tratando de equilibrar mediante el transporte de electrones. Este fenómeno es conocido como efecto Seebeck.

Efecto Peltier. Si se hace pasar una corriente eléctrica a través de un circuito formado por materiales semiconductores distintos, se produce el efecto inverso al mencionado anteriormente, es decir, se tendrá como resultado un gradiente de temperatura entre los dos materiales. Se absorbe calor en una de las uniones y se desprende por la otra. Este fenómeno es conocido como Efecto Peltier, en honor al físico francés Jean Peltier, quien lo descubrió en 1834 (M. Ožbolt, 2014). Esta diferencia de temperatura sucede en la unión de los semiconductores tipo N y tipo P, es decir, un extremo de la unión de ambos se calienta, mientras que el otro se enfría, esto se debe a que, al inyectar una corriente eléctrica, los portadores de uno de los extremos de los semiconductores son acelerados, provocando que este extremo, al tener menor densidad de portadores, pierda energía y se enfríe; estos portadores pasan al otro extremo de los semiconductores, siendo frenados de forma brusca, al presentar dicha fricción, estos incrementan su energía lo que da como resultado el

calentamiento de la unión. Si el sentido de la corriente se invierte, el flujo de energía también se invertirá y ahora la unión de los semiconductores que se enfriaba pasará a ser la que se caliente y viceversa.

Celda Peltier.

Una celda Peltier es un dispositivo termoelectrico que está compuesto por dos piezas de material semiconductor dopado, uno es tipo N y otro tipo P (Fig. 2.19). Las celdas comercializadas están fabricadas, comúnmente por dos tipos de elementos semiconductores: Teluro de bismuto y seleniuro de antimonio (Sandoval, 2010).



Fig. 2.19 Estructura interna de una Celda Peltier. Fuente: (Técnica, s.f.)

Las celdas Peltier están conformadas por dos placas cerámicas las cuales tienen la función de aislantes eléctricos y que llevan pistas de cobre que permiten unir los semiconductores eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo.

Siguiendo el principio del efecto Peltier, al aplicar una corriente a través de los semiconductores de tipo N y tipo P, específicamente, la polaridad positiva de alimentación en el lado donde se encuentra el material N y en el lado donde se encuentra el material P la polaridad negativa, la placa que se encuentra en la parte superior se enfriará mientras que la inferior se calentará. En cambio, si en la misma celda se invierte la polaridad de alimentación, es decir, se aplica la polaridad negativa en el material tipo n y la polaridad positiva en el tipo P, se invierte la función de calor/frío.

Calefacción

El sistema de calefacción dentro de un invernadero se debe diseñar de tal forma que la distribución del calor dentro de este sea de manera uniforme. Las pérdidas de calor del invernadero se llevan a cabo a través de las paredes y del techo. Otras pérdidas de calor están relacionadas principalmente al tipo de estructura y material de cubierta.

Para este propósito se utilizó una celda Peltier de 12V a 6 Amp (Fig. 2.20) como sistema de calefacción, es decir, sólo se utilizó la parte caliente de la celda para este prototipo.

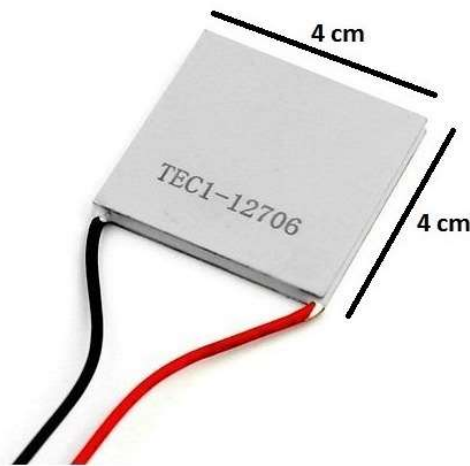


Fig. 2.20. Celda Peltier utilizada. Fuente: (Creativo, s.f.)

Se realizó el montaje adecuado de la celda (Fig. 2.21) utilizando, para la parte caliente de la celda, un disipador y un ventilador para la distribución del calor (Fig. 2.22), que sería proporcionado por la misma, en cuanto a la placa fría, se le agregó un disipador y esta parte fue aislada de todo el sistema dentro de un recipiente de unicel, esto con el propósito de que la parte fría de la celda no interfiriera con el proceso de calefacción (Fig. 2.23).

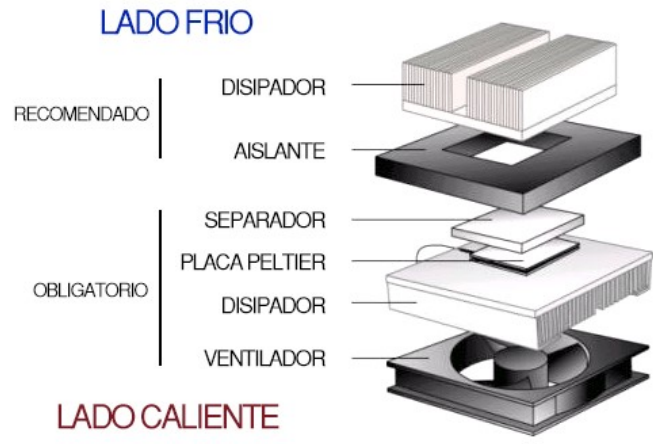


Fig. 2.21. Montaje de Celda Peltier. Fuente: (Llamas, Generar frío con Arduino y un placa Peltier, 2019)



Fig. 2.22. Montaje de Celda Peltier lado caliente

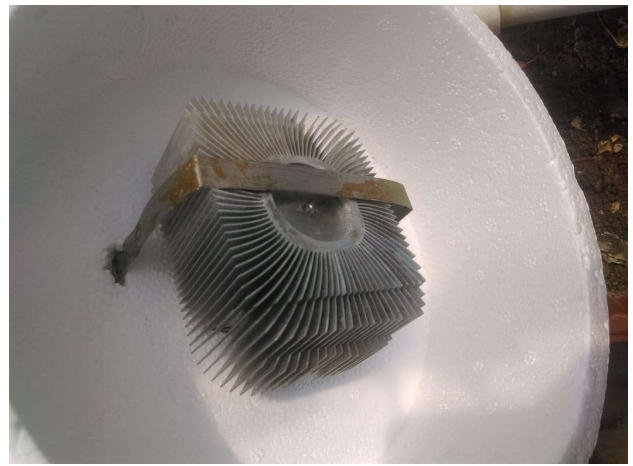


Fig. 2.23. Montaje de Celda Peltier lado frío

2.2.3 Control de humedad del suelo.

El nivel correcto de humedad en el suelo evita que el rábano sufra de malformaciones, enfermedades e incluso la pérdida de este. El riego automático y controlado ayuda a mantener el porcentaje adecuado de humedad, así como el ahorro del recurso hídrico.

Sensor HL-69

Este sensor utiliza la conductividad que existe en el suelo, la cual va a aumentar mientras más sea la cantidad de agua que se presente en la tierra. Consiste en dos placas conductoras separadas, en las cuales se registra la humedad que existe en el suelo por medio de un voltaje que hay entre una placa y otra, esto será detectado por un circuito de control con un amplificador operacional, el cual se encargará de transformar la conductividad registrada a un valor analógico que podrá ser leído por el microcontrolador (Fig. 2.24).

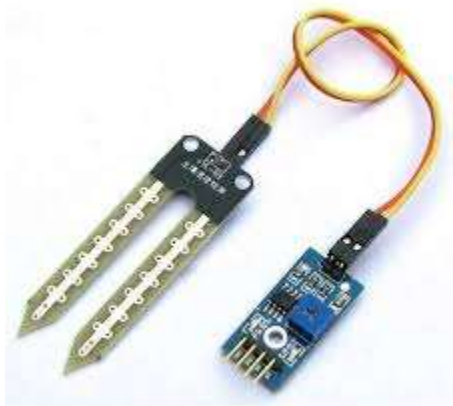


Fig. 2.24. Sensor de humedad del suelo HL-69. Fuente: (Distribuidora, s.f.)

Tabla 2.5
Características técnicas HL-69.

Modelo	HL-69
Alimentación	De 3,3 V a 5 V DC
Corriente máxima	2.5 mA durante la conversión
Señal de salida	Señal analógica
Rango de medición.	Humedad: 0% a 100%
Dimensiones.	Sensor: 6cm x 2 cm Módulo electrónico: 4cm x 1.5 cm

Fuente: (Distribuidora, s.f.)

El siguiente diagrama muestra la conexión típica del sensor de humedad HL-69 al microcontrolador.

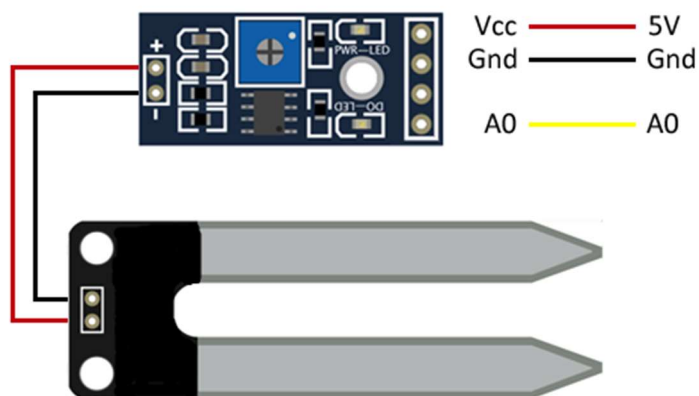


Fig. 2.25. Conexión típica del sensor de temperatura del suelo HL-69. Fuente: (Llamas, *Medir la Humedad del Suelo*, 2016)

La tabla 2.6 presenta las características eléctricas del sensor de humedad del suelo, condiciones que se deben seguir adecuadamente para el correcto funcionamiento del sensor, así como para evitar algún daño en el mismo o el circuito que lo acompaña.

Tabla. 2.6
Características eléctricas HL-69.

	Condición	Mínimo	Típico	Máximo
Voltaje	DC	3V	5V	5.5V
Corriente	Medición	0.5mA		2.5mA
	Paro	0.2mA		1mA
	Promedio	100uA		150uA

Fuente: (Llamas, Medir la Humedad del Suelo, 2016)

Riego por goteo

El riego por goteo consiste en la distribución de agua mediante mangueras o tubos y goteros que entregan pequeños volúmenes de agua en forma periódica y que están distribuidos estratégicamente en la zona de absorción por parte de las plantas.

Al riego por goteo se le denomina un sistema presurizado donde el agua es conducida y distribuida por conductos cerrados que necesitan presión. También se les denomina riegos localizados porque humedecen un sector de volumen de suelo, suficiente para un buen desarrollo del cultivo (Liotta, 2018). La posibilidad de llevar a cabo riegos frecuentes, reduce el riesgo de que los cultivos sufran estrés hídrico ya que es posible mantener el nivel de humedad en el suelo a un nivel óptimo durante el periodo de cultivo.

La combinación del riego por goteo con un sistema de control maximiza el ahorro de agua, pues al tener el sensor de humedad, el riego solo se activa cuando la humedad del suelo de las macetas se encuentra por debajo del ideal para el crecimiento de las plantas, humedeciendo con menos agua y por periodos muy cortos de tiempo.

Para realizar este sistema de riego se utilizó tubo tipo PVC de ½ pulgada al cual se realizaron pequeños orificios por los cuales sería la salida del agua para el riego del suelo en el que se encontraban las plantas (Fig. 2.26). Los orificios se realizaron a lo largo del tubo con una distancia de 5 cm entre ellos.

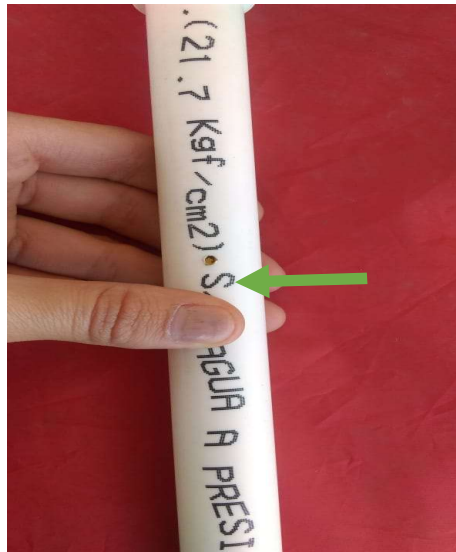


Fig. 2.26. Tubo PVC ½ pulgada

Se utilizaron tres piezas de tubo PVC de 70 cm cada uno, con un tapón que va en uno de los extremos de cada pieza, estos tubos fueron ubicados sobre la orilla derecha de cada maceta para evitar de esta forma que las gotas cayeran directamente sobre las plántulas cuando las semillas comenzaran a crecer (Fig. 2.27).



Fig. 2.27. Distribución de los tubos PVC

Electroválvulas

Las electroválvulas son válvulas electromecánicas y su función principal es la de controlar el paso de algún fluido a través de tubería o de algún otro conducto, este tipo de control casi siempre es ON/OFF comúnmente llamado Todo o Nada. Este tipo de válvulas también son conocidas como válvulas selenoides pues en su interior se halla una bobina selenoide.

Las electroválvulas pueden ser de dos o hasta de 5 vías, pero las más comunes son las de dos vías, éstas a su vez, se dividen en tres, dependiendo el uso al que estén destinadas a operar, pueden ser de acción directa, acción indirecta o ambas, llamada de acción mixta además de que cada una de estas categorías puede ser normalmente cerra (N.C) o normalmente abierta (N.A).

Para este proyecto de investigación se utilizaron tres electroválvulas N.C de acción directa de dos vías a 12 VDC y 1 A (Fig. 2.28), la válvula pasa de estar N.C a N.A cuando recibe un pulso eléctrico, este pulso energiza la bobina permitiendo el paso del agua por el tubo. Si la bobina no recibe este pulso eléctrico, la válvula permanece cerrada.

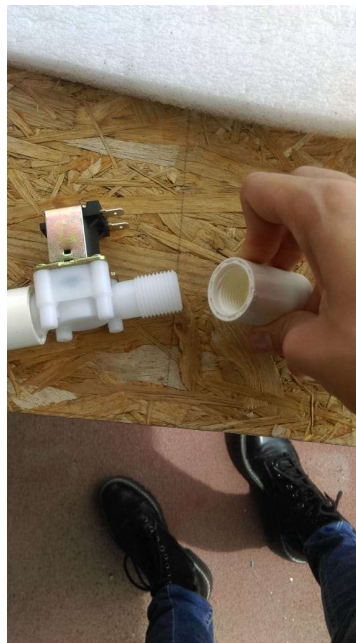


Fig. 2.28. Electroválvula

Para unir cada electroválvula con las piezas de tubo PVC se utilizaron seis coples de ½ pulgada con rosca interna (un par por electroválvula) y cinta de teflón para evitar fugas de agua, una vez unidas las electroválvulas a los tubos que se colocaron sobre las macetas para realizar el riego por goteo, se unió el extremo que quedó libre de cada electroválvula a otras piezas de tubo PVC, las cuales están ensambladas mediante codos y pegamento especial para este material con el objetivo de que cada tubería tenga acceso al agua que es almacenada en un bote de plástico de 20 litros (Fig. 2.29).



Fig. 2.29. Tubería para el riego

El bote utilizado fue adaptado para que suministre agua a las tuberías, esto se logró realizando un agujero en la parte baja del recipiente para poder colocar empaques de cada lado, así como una llave de paso por cualquier incidente que pudiera ocurrir (Fig. 2.30).



Fig. 2.30. Adaptación de tubería a bote con capacidad de 20 litros

2.2.4 Control de luz

La selección de luz artificial bajo condiciones de cultivo controlado se debe realizar de manera cuidadosa pues esta modifica el crecimiento, desarrollo y calidad de las plantas y como resultado, afectar de manera considerable su valor en el mercado.

Fotorresistor

Un fotorresistor es un componente eléctrico, el cual contiene una resistencia que varía su magnitud al estar en contacto con distintas intensidades lumínicas. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz que incide en el fotorresistor menor será su resistencia, es decir, mayor movimiento de electrones en el material semiconductor que compone este dispositivo eléctrico (Fig. 2.31).



Fig. 2.31 Fotorresistor. Fuente: (Curiosidades, s.f.)

Tabla 2.7
Características técnicas Fotorresistor.

Modelo	GL55
Alimentación	De 3,3 V a 5 V DC
Corriente máxima	2.5 mA
Señal de salida	Señal analógica
Rango de medición.	1 M Ω en total oscuridad 100 Ω bajo luz brillante.
Tiempo mínimo por muestra	20-100 ms
Dimensiones.	Sensor: 3.6 cm x 0.5 cm Módulo electrónico: 4cm x 1.5 cm

Fuente: (Curiosidades, s.f.)

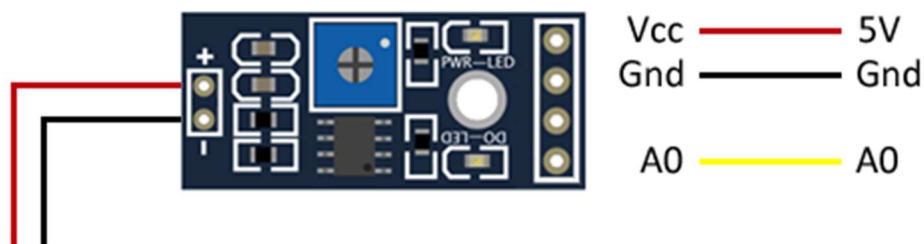


Fig. 2.32. Conexión tipo del sensor LDR a un microcontrolador. Fuente: (Ataruru, 2019)

Tabla 2.8
Características eléctricas Sensor LDR.

	Condición	Mínimo	Típico	Máximo
Voltaje	DC	3V	5V	5.5V
Corriente	Medición	0.5mA		2.5mA

Fuente: (Ataruru, 2019)

Luminarias

En este trabajo se utiliza la iluminación artificial para exponer a la planta a longitudes de ondas específicas del espectro visible, estas longitudes son 400 nm y 700 nm que corresponden a la luz de color azul y rojo respectivamente. Como se mencionó en el capítulo anterior, esta región del espectro recibe el nombre de Radiación Fotosintética Activa y sólo en esta parte se lleva a cabo la fotosíntesis.

Dentro del prototipo de invernadero se utilizaron módulos de cuatro diodos LED (Fig. 2.33), se optó por esta fuente de luz ya que puede transmitir una longitud de onda específica del espectro visible además de que su consumo energético es bastante bajo, su tiempo de vida es demasiado largo, el cual va de 20,000 a 50,000 horas, en comparación con, por ejemplo, bombillas halógenas las cuales tienen un tiempo de vida de aproximadamente 2,000 horas.



Fig. 2.33. Módulos LED

Otra característica que se tomó en cuenta a la hora de elegir la luz artificial a utilizar fue la emisión de calor, pues hablando de los diodos LED es casi nula si se compara, con la emisión de calor que tiene un foco incandescente, pues estos focos iluminan a partir del calentamiento del filamento que llevan en su interior.

Se realizaron tres arreglos de luces con cinco módulos cada uno, cuatro con LEDs color rojo y el restante de color azul, en otras palabras, cuatro LEDs de color rojo por uno de color azul (Fig. 2.34). Se eligió esta combinación, con mayor número de LEDs rojos ya que la luz de este color es la encargada de la floración y del crecimiento de los frutos, estos últimos son el producto final y por lo tanto el más importante de la siembra de la mayoría de los cultivos.

De acuerdo al artículo titulado “Variation of phenotypic responses to lighting using a combination of red and blue light-emitting diodes versus darkness in seedlings of 18 vegetable genotypes” la combinación de diodos LED utilizada fue de 85% color rojo y 15% azul, exponiendo a los 18 fenotipos estudiados a un fotoperiodo de 17 hrs, esta combinación promovió el crecimiento de las raíces, aumentando su longitud, el diámetro, la ramificación así como la coloración inherente en hojas y tallos (Yun Kong, 2018)



Fig. 2.34. Arreglo de módulos LED

Los arreglos de los módulos fueron conectados en serie y colocados en la parte superior del invernadero, uno sobre cada maceta. El sistema de iluminación se diseñó para ser controlado con ayuda del sensor LDR y de un módulo RTC DS3231 o reloj en tiempo real (Fig. 2.35).

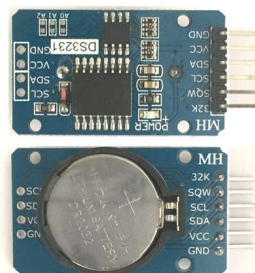


Fig. 2.0.35. Módulo RTC DS3231. Fuente: (Llamas, RELOJ Y CALENDARIO EN ARDUINO CON LOS RTC DS1307 Y DS3231, 2016)

Este módulo fue programado para realizar dos eventos, uno nombrado “Encendido” y el otro “Apagado” dichos eventos se llevaban a cabo a las 19:00 hrs y a las 23:00 hrs respectivamente (Fig. 2.36).

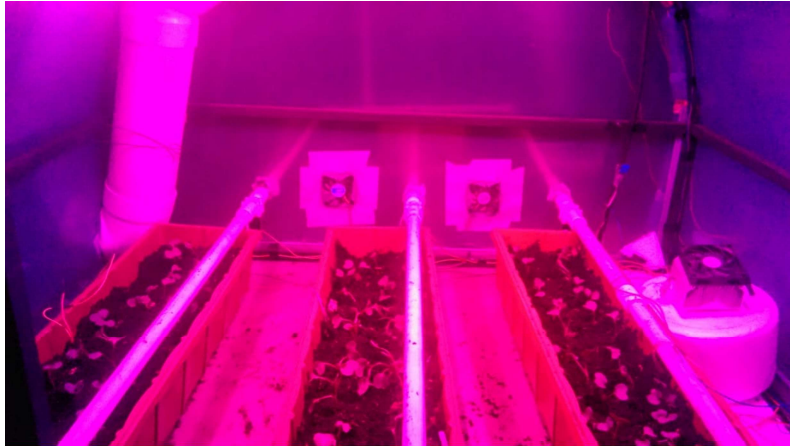


Fig. 2.36. Módulos de LEDs encendidos con DS3231

El fotorresistor estará activo sólo durante el tiempo que dura el evento de “Encendido” ya que este depende totalmente del módulo RTC, esto para evitar que las luminarias se enciendan en caso de que durante este evento la luz solar aún esté presente.

2.3 Etapa de potencia y circuito

2.3.1 Control de potencia con relevadores

Un relevador, también conocido como relé, es un dispositivo electromecánico capaz de realizar la conmutación de media o alta potencia a través de un circuito electrónico de baja potencia. Un relé está constituido por una bobina, una cubierta metálica y un grupo de contactos hechos con elementos conductores los cuales permiten o interrumpen el paso de la corriente eléctrica una vez que la bobina sea energizada (Fig. 2.37).

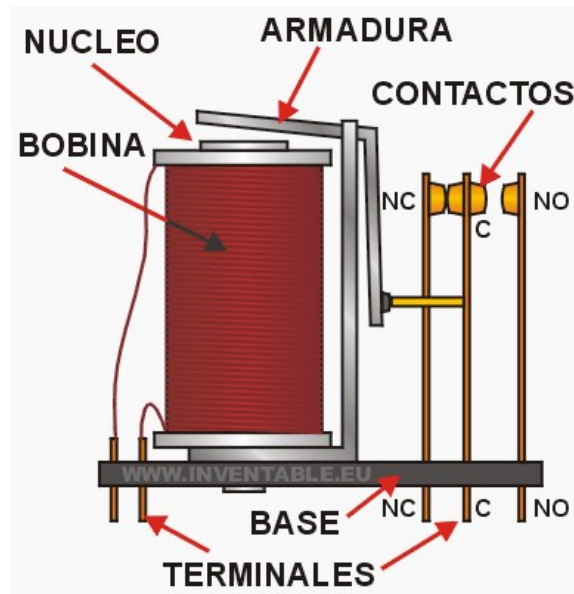


Fig.2.37. Diagrama de un relevador. Fuente: *(Electrotecnia, 2019)*

Los relevadores se pueden clasificar, según el número y tamaño de los conectores, la potencia de conmutación, la corriente en la bobina (o resistencia), estas características definirán su tamaño. Para este trabajo de tesis se utilizaron relevadores de tipo SPDT (Single Pole Double Throw) que es un relé con un solo conmutador de dos vías (Fig. 2.38).

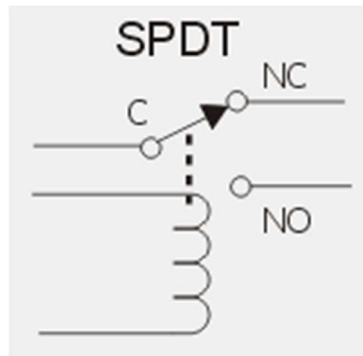


Fig. 2.38. Esquema de un relevador SPDT. Fuente: *(Technology, s.f.)*

La forma de conectar los relés al microcontrolador se realizó a través de transistores BJT tipo NPN (Fig. 2.39). Un transistor bipolar o BJT es un dispositivo que está controlado por corriente, esto quiere decir que requiere una corriente de base para empezar a conducir, esta corriente es muy pequeña comparada con la que sus otras dos terminales trabajan.

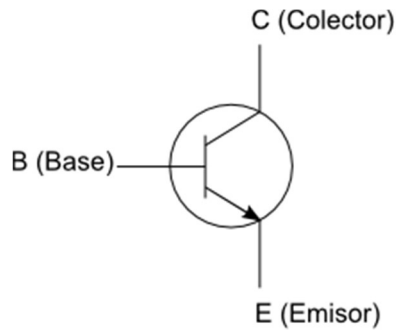


Fig. 2.39. Diagrama de un transistor bipolar. Fuente: (Hardwarelibre, s.f.)

Conectando de esta manera el transistor, se cierra el circuito y como resultado, una de las terminales de la bobina va a tierra, mientras que la otra está conectada a positivo (Fig. 2.40). Para conectar el transistor al Arduino se debe colocar una resistencia que limite la corriente de base pero que proporcione la corriente necesaria para llevar al transistor a un estado de saturación.

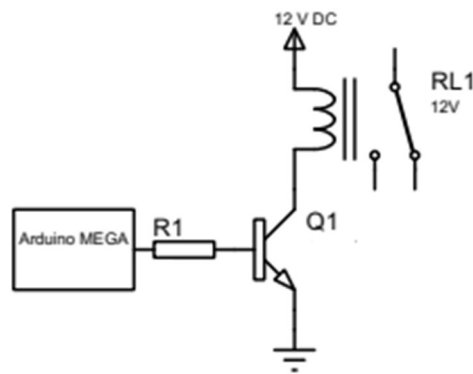


Fig. 2.40. Circuito de conexión de un transistor a un relevador SPDT. Fuente: (Prometec, s.f.)

Al estar trabajando con una carga inductiva, se debe proteger de alguna manera al transistor, ya que, como a través de este se realiza una desconexión de la alimentación de la bobina del relevador, el campo magnético que se encuentra presente en ella induce en la misma una tensión de polaridad inversa en sus terminales. Este pico de voltaje puede dañar el transistor de control. Para resolver este problema, se debe conectar un diodo rectificador inversamente

polarizado en paralelo con la bobina, con el objetivo de que este disipe esta extra tensión de apertura.

Selección de componente.

Para este proyecto se utilizaron relevadores de 12 VDC con una corriente máxima demandada por la bobina de 50mA. Con estos datos se pudo elegir el transistor indicado, el cual fue uno de los más comunes para este tipo de aplicaciones; el BC547 (Fig. 2.41)

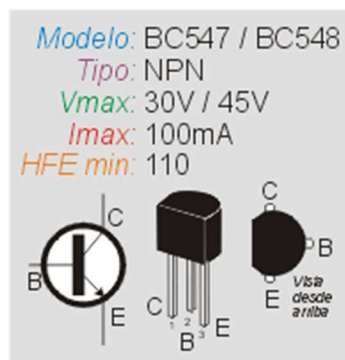


Fig. 2.41. Transistor BC547. Fuente: (INVENTABLE, 2017)

Para poder calcular la resistencia de la base se debe considerar la ganancia del transistor, pero primero de debe obtener el valor de la corriente que permitirá al transistor llegar a un estado de saturación. Se sabe que la corriente máxima que fluirá por el transistor será de 50 mA y de las características de un transistor bipolar se tiene que

$$H_{fe} = \frac{I_c}{I_b} \quad 2.1$$

Donde:

Hfe = Ganancia en continua del transistor

Ic = Corriente colector

Ib = Corriente base

Si despejamos la corriente base de la ecuación 2.1, quedaría la siguiente ecuación

$$I_b = I_c / H_{fe} \quad 2.2$$

$$I_b = \frac{50\text{mA}}{110} = 0.45 \text{ mA}$$

Esta será la corriente necesaria para activar el relevador utilizando el transistor. Ahora se puede calcular la resistencia de la base con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{(V_{in}-0.6)(H_{fe})}{I_{relé}} \quad 2.3$$

Donde:

R = Resistencia de base

V_{in} = Tensión de control

H_{fe} = Ganancia en continua del transistor

I_{relé} = Corriente del relé

$$R = \frac{(5V-0.6)(110)}{50\text{mA}} = 9.68 \text{ kOhms}$$

Se debe utilizar resistores con un valor comercial de 10 kΩ.

2.3.2 Diseño del circuito

El diseño del circuito se realizó en el software de automatización de diseño electrónico Proteus 8. La primera etapa fue el diseño del esquema electrónico, este está dividido en dos partes, en la primera se encuentra toda la etapa de potencia (Fig. 2.40). Esta parte está conformada por todos los relevadores utilizados para la activación de los elementos dentro del prototipo de invernadero como, ventiladores, electroválvulas, luces, etc. Todos los relés presentes en esta parte, se alimenta con 12 VDC.

En la segunda parte del diseño del circuito se encuentran colocados los pines donde fueron colocados todos los módulos de sensores que se utilizaron para la creación del microclima dentro del prototipo, así como los pines donde se colocó el módulo del reloj DS3231 (Fig. 2.41). Todos los módulos, tanto de los sensores como del reloj, están alimentados por el Arduino, es decir 5VDC.

También se encuentra conectado un relé que tiene la misma alimentación que los módulos de los sensores, esto se hizo simplemente para comprobar que la tensión de control es independiente con la que se alimenta al relevador, por lo que se puede trabajar tensiones separadas para la parte del control y para el relevador.

Después de tener el esquema electrónico del circuito, se procedió a probarlo en protoboard, conectar la parte de los relevadores a una fuente de voltaje regulable y la parte donde se encuentran los módulos de los sensores se conectó al Arduino MEGA (Fig. 2.42).

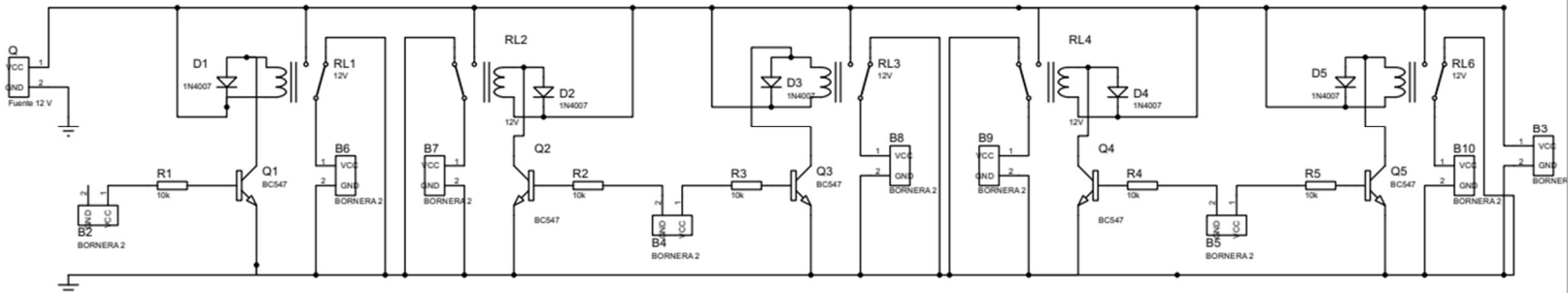


Fig. 2.42. Esquema electrónico primera parte del circuito.

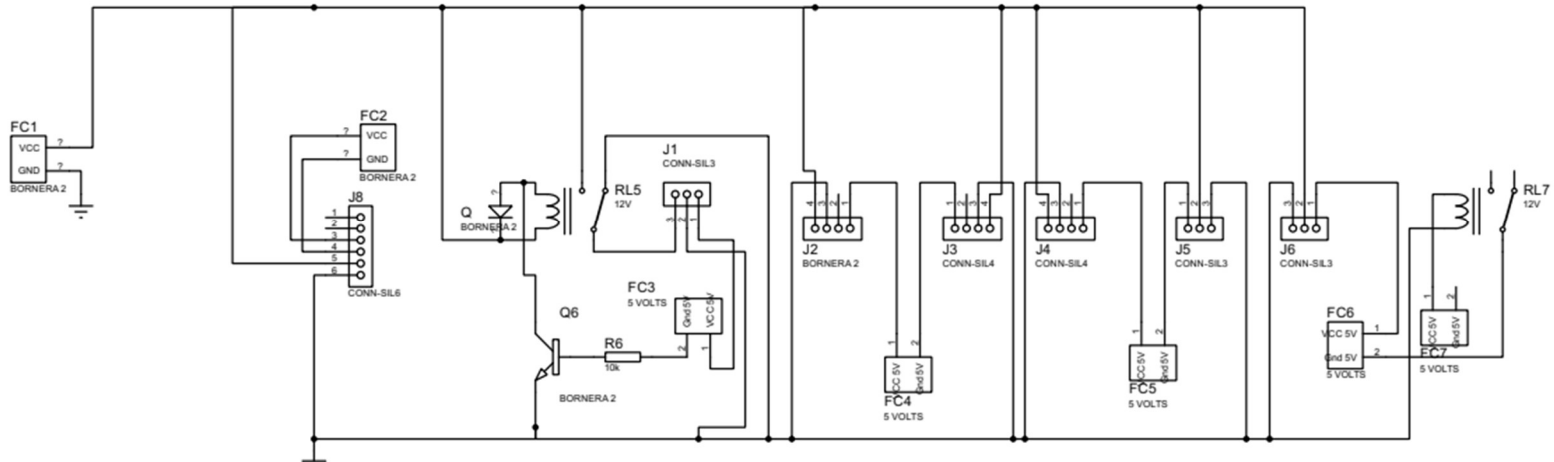


Fig. 2.43. Esquema electrónico segunda parte del circuito.

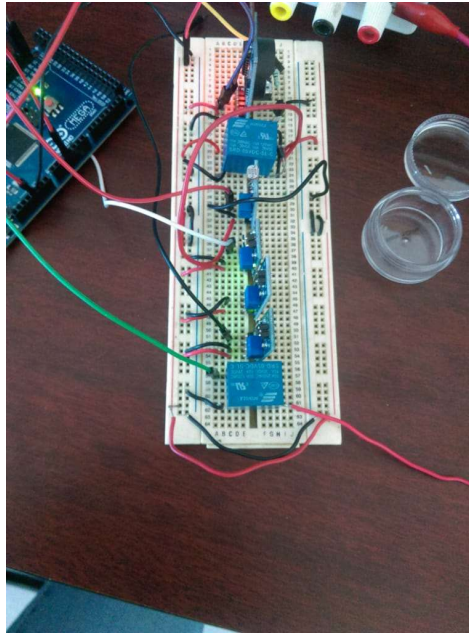


Fig. 2.44. Montaje del circuito en protoboard

Verificado el correcto funcionamiento del circuito, se diseñó el PCB en el mismo software de automatización de diseño electrónico (Fig. 2.45). Los elementos fueron colocados de tal forma que el tamaño final de la placa fue de 10x15 cm.

La placa fue diseñada en doble cara ya que, al tener demasiados elementos, algunas pistas se cruzaban y ésta fue la solución a ese inconveniente. También se generó un plano común de tierras, para evitar cualquier fallo en el circuito debido a las tierras no aterrizadas correctamente.

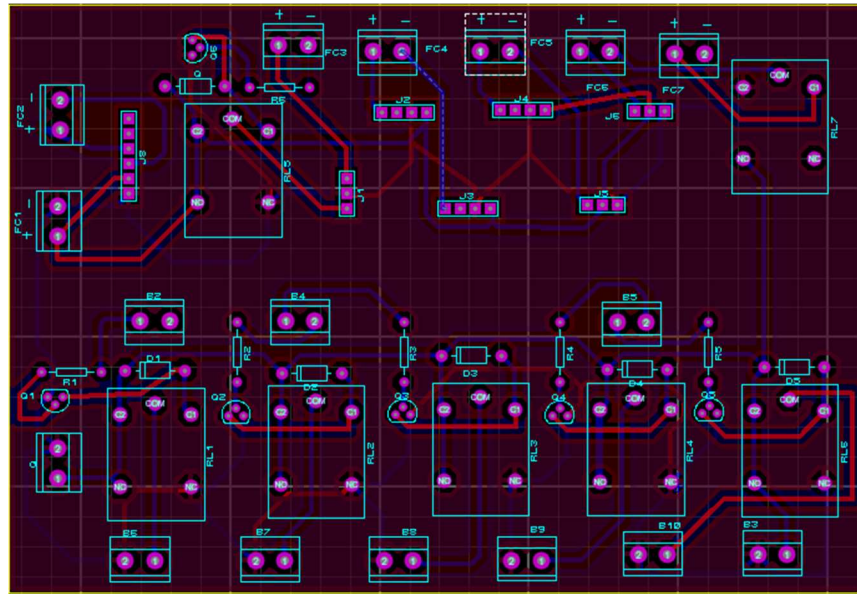


Fig. 2.45. Diseño de PCB

Una vez teniendo la placa lista, se soldaron todos los elementos antes mencionados y se diseñó en SolidWorks una caja hecha de acrílico para proteger y colocar dentro de ella la placa, el Arduino MEGA, la pantalla LCD, la cual sirvió para visualizar los datos de temperatura, humedad del suelo en cada maceta, la fecha y la hora, así como el módulo Wi-Fi y el módulo para tarjeta SD. Estos últimos para el monitoreo y almacenamiento de datos (Fig. 2.46).

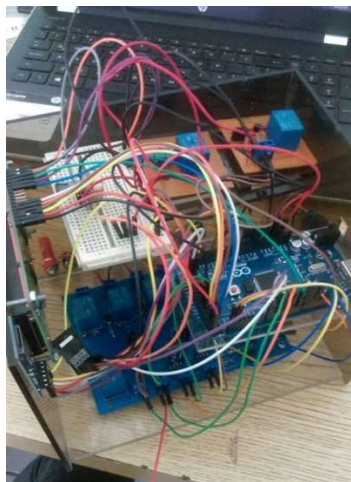
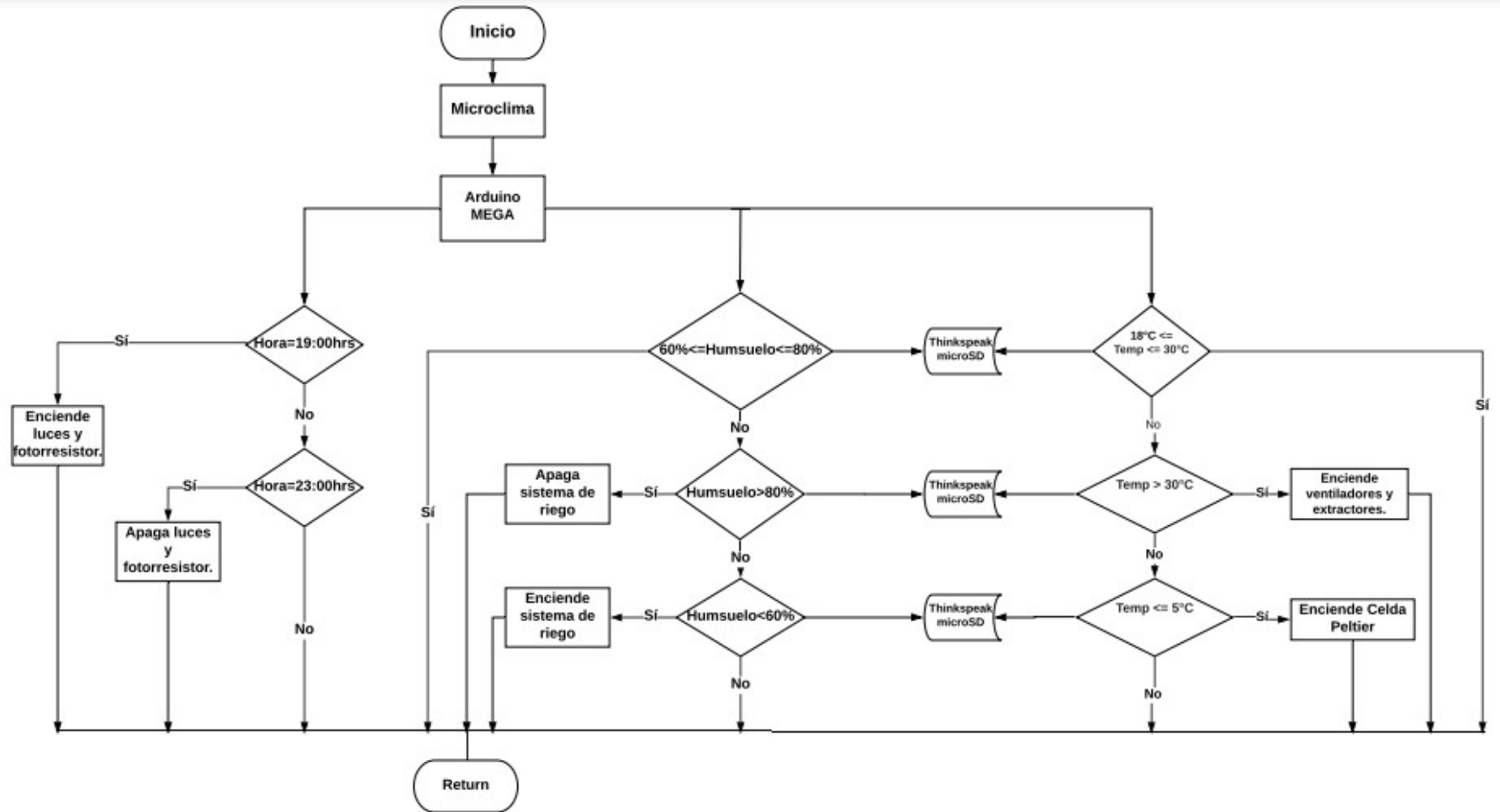


Fig. 2.46. Elementos de control y monitoreo ensamblados en caja de acrílico.

A la caja de acrílico se le realizaron perforaciones en las cuales fueron ensambladas puntas banana para hacer más sencilla la conexión de cada elemento dentro del invernadero, así como de las fuentes de alimentación externas, hablando de la alimentación para el Arduino y para los relevadores pertenecientes en la placa.

2.3.3 Diagrama de Flujo.



2.3.4. Almacenamiento y monitoreo de datos

Para poder llevar a cabo la visualización y almacenamiento de los datos de los sensores DHT11 y HL-69 se utilizaron dos módulos, uno para poder mandar datos de los sensores DHT11 por medio de una red de Internet haciendo uso del internet de las cosas y el otro fue un módulo para tarjeta microSD. Se utilizaron dos módulos distintos para poder comparar estos dos tipos de formas para almacenar y monitorear datos.

ESP-01

El ESP8266 es un chip integrado con conexión Wi-Fi y compatible con el protocolo TCP/IP, el objetivo principal de este chip, es dar acceso a cualquier microcontrolador a una red (Hernández L. d., ProgramarFácil, 2018), que en este caso fue el Arduino MEGA.

El ESP-01 es un módulo transceptor Wi-Fi basado en el chip ESP8266, que permite adentrarse en el mundo del IoT, es decir, la interconexión de objetos cotidianos con internet, este módulo es uno de los más populares para este fin, ya que es muy fácil de usar y su precio es demasiado accesible comparado con el de otros módulos similares (Fig. 2.47.)

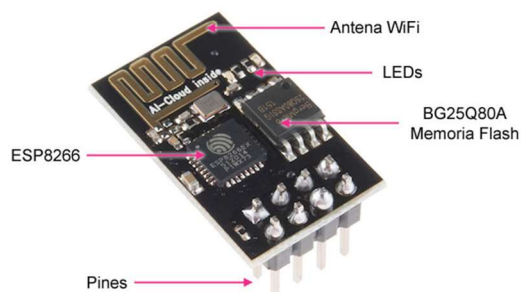


Fig. 2.47. Módulo ESP-01. Fuente: (SanDoRobotics, s.f.)

Este módulo se puede programar por medio de un adaptador serie/USB utilizando los pines Rx y Tx a través del microcontrolador Arduino.

Tabla 2.9
Características técnicas ESP-01.

Modelo	ESP-01
Alimentación	3,3 V
Corriente máxima	80 mA
Rango de temperatura de funcionamiento	-40° C – 125° C
Dimensiones.	5mm x 5mm

Fuente: (SanDoRobotics, s.f.)

Thinkspeak

Thinkspeak es una aplicación y API de código abierto para IoT en la cual se pueden almacenar y monitorear datos en tiempo real de objetos conectados a través del protocolo HTTP por medio de una red local.

Se creó un canal en la plataforma de Thinkspeak llamado “Invernadero” (Fig. 2.48) con dos visualizaciones de gráficas las cuales serían la de temperatura y humedad del suelo, estos datos fueron proporcionados por los sensores DHT11.

Los datos eran monitoreados desde la app disponible para celulares, esto permitió el monitoreo de estos parámetros de forma más rigurosa, pues ya que los datos de los sensores eran registrados en tiempo real, en cualquier problema relacionado con estos, se podía actuar de forma casi instantánea para solucionarlo. Los datos que fueron registrados por el canal en Thinkspeak se pueden exportar en formato xls para hacer uso de ellos de cualquier forma que se desee.

Invernadero

ID de canal: 968357
Autor: mwa0000017347969
Acceso: privado

Vista privada | Vista pública | Configuraciones de canal | Compartir | Claves API | Importación / Exportación de datos

Agregar visualizaciones | Agregar widgets | Exportar datos recientes

Análisis | MATLAB Visualización MATLAB

Estadísticas del canal

Creado: hace 2 months ago
Última entrada: hace 21 days ago
Entradas: 12590



Fig. 2.48. Canal hecho en Thinspeak para el almacenamiento y monitoreo de datos. Fuente: (Sánchez, 2020)

Módulo microSD

El lector microSD permite incorporar una memoria microSD para el almacenamiento de datos. La lectura se puede realizar través del bus SPI esta interfaz es la que se emplea normalmente ya que tiene una alta tasa de transferencia de datos. Este módulo tiene un regulador de voltaje que permite conectarlo a la tensión proporcionada por el Arduino, la cual es de 5VDC (Fig. 2.49).

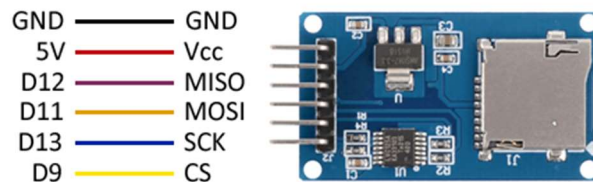


Fig. 2.49. Módulo microSD. Fuente: (Llamas, LEER Y ESCRIBIR EN UNA TARJETA SD O MICRO SD CON ARDUINO, 2016)

2.4 Materiales

A continuación, se presenta la lista de costos de los materiales y equipos utilizados en el desarrollo del prototipo.

Materiales	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
Tubular de metal (m)	14	\$28.00	\$392.00
Soldadura 1/8 (Kg)	1	\$46.00	\$46.00
Perfil sujetador de aluminio (m)	5	\$25.00	\$125.00
Alambre zigzag (m)	3	\$20.00	\$60.00
Remaches (bolsa)	1	\$27.00	\$27.00
Pintura de recubrimiento térmico (lata)	1	\$150.00	\$150.00
Plástico (m)	5	\$200.00	\$1,000.00
Macetas	3	\$70.00	\$210.00
Cable 22 AWG (m)	30	\$10.00	\$300.00
Cinta de aislamiento térmico	1	\$145.00	\$145.00
Sensor DHT11	2	\$40.00	\$80.00
Sensor HL-69	3	\$35.00	\$105.00
Fotorresistor	1	\$30.00	\$30.00
Arduino MEGA	1	\$300.00	\$300.00
Módulo ESP-01	1	\$75.00	\$75.00
Modulo microSD	1	\$30.00	\$30.00
Módulo 4 Leds	15	\$18.00	\$270.00
Ventilador	5	\$50.00	\$250.00
Extractor	1	\$500.00	\$500.00
Recipiente unicel	1	\$20.00	\$20.00
Celda Termoeléctrica	1	\$60.00	\$60.00
Electroválvula	3	\$129.00	\$387.00
Tubo PVC 4 pulgadas (m)	1	\$35.00	\$35.00
Codo 90° de 4 pulgadas	1	\$25.00	\$25.00
Codo 45° de 4 pulgadas	1	\$23.40	\$23.40
Tubo PVC 1/2 pulgada (m)	9	\$16.05	\$144.45
Codo "T's" de 1/2 pulgada	2	\$7.10	\$14.20
Codo 90° de 1/2 pulgada	4	\$5.00	\$20.00
Conectores PVC 1/2 pulgada	13	\$2.31	\$30.03
Pegamento PVC	1	\$25.00	\$25.00
Relevador 12 VDC	5	\$15.50	\$77.50
Relevador 5VDC	3	\$15.50	\$46.50
Resistor 10kΩ	6	\$0.20	\$1.20
Diodo 1n4007	6	\$1.50	\$9.00
Transistor bc547	6	\$2.50	\$15.00

Clema 2 entradas	17	\$3.50	\$59.50
Tira de pines hembra	1	\$15.00	\$15.00
Tira de pines macho	1	\$15.00	\$15.00
Jumpers M-M	20	\$1.00	\$20.00
Jumpers H-M	30	\$1.00	\$30.00
LCD	1	\$150.00	\$150.00
Puntas banana	12	\$8.00	\$96.00
PCB	1	\$200.00	\$200.00
Acrílico (30cmx30cm)	1	\$90.00	\$90.00
Recipiente plástico	1	\$50.00	\$50.00
Fuente de voltaje	1	\$2,000.00	\$2,000.00
Semillas de rábano (sobres 2.8gr)	3	\$19.00	\$57.00
	Total		\$5,810.78

Capítulo 3. Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFA)

Un sistema fotovoltaico autónomo (SFA) provee energía para satisfacer el consumo de cargas eléctricas que no están conectadas a la red, estos emplean sistemas de acumulación energética (baterías) y regulación para poder hacer frente a situaciones donde la generación es menor a la demanda.

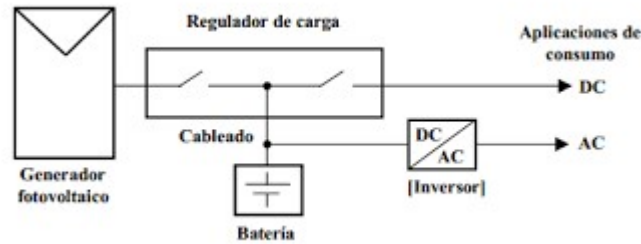


Fig. 3.1. Sistema Fotovoltaico Aislado (SFA). Fuente: (Díaz, 2003)

3.1 Elementos de un SFA

3.1.1 Radiación e Irradiancia Solar

Radiación Solar. La radiación es la cantidad de energía solar que incide en una superficie determinada durante un periodo de tiempo específico. Las medidas utilizadas con mayor frecuencia para su representación son Wh/m^2 o J/m^2 (Style, 2012). Cuando la radiación solar llega a la atmósfera una parte de ella es absorbida y otra se dispersa, esto dependerá principalmente, de la transmisividad de los gases existentes en la atmósfera (O_2 , N_2 , CO_2) así como las nubes, smog o polvo (Fig. 3.2)



Fig. 3.2. Mapa recurso solar en México. Fuente: (Atlas, 2017)

Los tipos de radiación que inciden sobre la superficie terrestre son: directa, difusa, reflejada o terrestre, total y global. A continuación, se define cada una de ellas.

Radiación directa: Es la radiación que llega directamente del sol a una superficie, y que su trayectoria no ha sido modificada por la presencia de un cuerpo o fenómeno, es decir que no sufre ninguna dispersión atmosférica.

Radiación difusa: Esta radiación se presenta cuando los rayos solares penetran la atmósfera e inciden en la superficie terrestre, luego de que su dirección inicial fuera modificada, esto a causa de la dispersión.

Radiación reflejada o terrestre: Es la radiación que “rebota” de la superficie terrestre; la cantidad de la radiación solar reflejada dependerá del coeficiente de reflexión de la superficie o también conocido como albedo.

Radiación total: Es la suma de la radiación directa y difusa y que se reciben sobre una superficie.

Radiación global: Es la radiación que se mide sobre una superficie horizontal, considerando que no existe radiación reflejada, por lo tanto, la radiación global es la suma de la radiación directa y difusa.

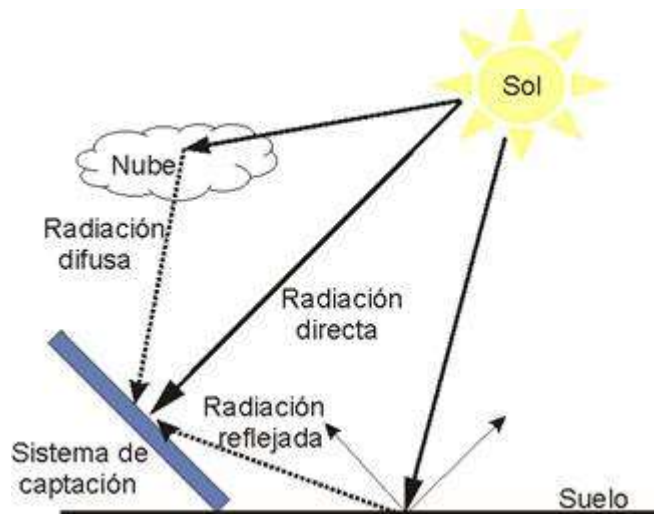


Fig. 3.3. Tipos de radiación solar. Fuente: (Eficiente, 2014)

Para poder cuantificar la radiación en términos de potencia y energía, se utilizan los conceptos de irradiancia e irradiación.

Irradiancia Solar. Es la energía solar por unidad de área presente en cada momento, es decir, la potencia instantánea incidente en una superficie determinada por intervalos de tiempo reducidos (Quiroz, 2006). La irradiancia solar se mide en W/m^2 o kW/m^2 , cuando esta llega a la atmósfera tiene una potencia de aproximadamente $1350 W/m^2$ pero mientras va atravesando la atmósfera, esta irradiancia va perdiendo potencia, llegando a la superficie de la tierra, con una potencia máxima de, aproximadamente, $1000W/m^2$ (Style, 2012).

La curva de la Fig. 3.4 es la representación de la irradiancia solar durante un día sobre una superficie horizontal. El eje vertical se identifica por llevar el nombre de la irradiancia, la cual está representada en W/m^2 mientras que en el eje horizontal se muestran las horas del día. En la curva se puede observar la variación en potencia de la irradiancia por cada hora transcurrida durante el día.

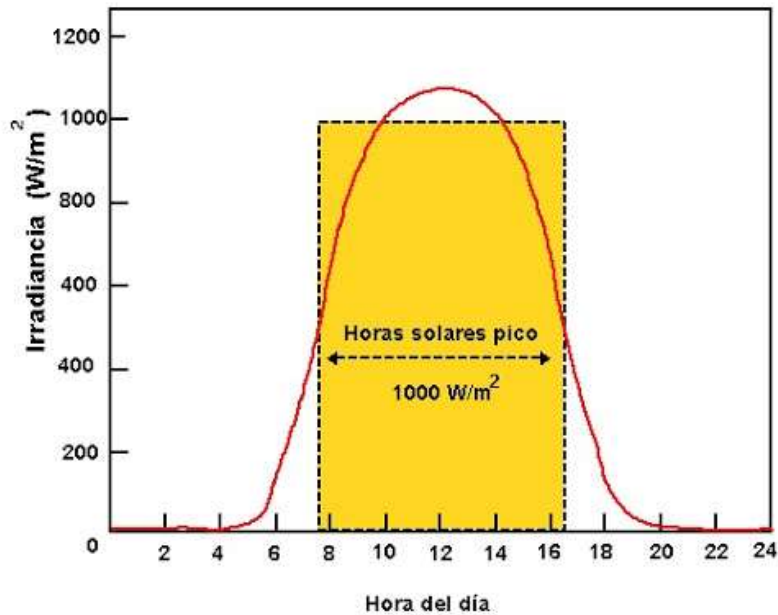


Fig. 3.4. Curva típica de la Irradiancia Solar durante un día. Fuente: (G, 2020)

Hora Solar Pico. Para poder realizar el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico es necesario conocer las Horas de Sol Pico (HSP), es decir, el número de horas en las que se dispone de una hipotética irradiancia solar constante de 1000 W/m^2 (ver Fig. 3.4).

3.1.2 Módulo fotovoltaico

El efecto fotovoltaico. Es un fenómeno físico en el cual se produce la conversión de la radiación solar en energía eléctrica, esto se debe a la interacción que existe entre la radiación luminosa y los electrones existentes en un material semiconductor (Mercedes Ballesteros Perdices, 2008).

El objeto físico en el que se lleva a cabo este fenómeno es la celda fotovoltaica o también conocida como célula solar, la cual tiene el mismo funcionamiento que un diodo con la característica de poseer una superficie más amplia.

La celda fotovoltaica también llamada celda fotoeléctrica se caracteriza por ser un dispositivo semiconductor que transforma la energía proveniente de la radiación solar en electricidad, a través del efecto fotovoltaico. Las celdas fotovoltaicas, generalmente, están fabricadas con Silicio y tienen una eficiencia comercial alrededor del 20%-30%.

Las celdas fotoeléctricas funcionan gracias a los semiconductores. Los semiconductores que se utilizan para este procedimiento tienen una característica especial, deben estar dopados, esto quiere decir que, a estos semiconductores se le añaden impurezas de manera controlada para poder mejorar su conductividad eléctrica. Se les conoce como, extrínsecos debido a que su conductividad no está determinada por una propiedad característica de él mismo, sino por algo que es ajeno a él (Urritia, 2004). Para dopar a los semiconductores se utilizan dos tipos de impurezas:

Impurezas pentavalentes: Son elementos cuyos átomos contiene 5 electrones de valencia en la órbita exterior y al semiconductor dopado con estas impurezas se le conoce como de tipo n. Estas impurezas también son conocidas como donadoras, esto hace que, al semiconductor que se le añaden este tipo de impurezas le ceden electrones. Entre los elementos que tienen esta característica se encuentra el fósforo, el antimonio y el arsénico.

Impurezas trivalentes: Son elementos cuyos átomos contienen 3 electrones de valencia en la órbita exterior, y los semiconductores a los que se les añaden estas impurezas se conocen como del tipo p. Cuando al semiconductor se le añaden impurezas receptoras, estas capturan electrones de forma fácil, lo que ocasiona la aparición de un hueco. El boro, el galio y el indio son elementos que tienen esta característica.

Un electrón gana la energía suficiente para desprenderse del átomo al que está ligado gracias a los fotones, generando así, un par electrón-hueco. Es por eso que en la celda fotovoltaica es necesario absorber fotones.



Fig. 3.5. Celda fotovoltaica. Fuente: (iluminet, 2016)




Panel Fotovoltaico: Este está conformado por un conjunto de celdas fotovoltaicas que a partir del efecto fotoeléctrico transforma la radiación solar en energía eléctrica (Fig. 3.6). Existen tres tipos de paneles solares fotovoltaicos y se clasifican de acuerdo a la calidad del material con el que están fabricadas las celdas fotovoltaicas y su eficiencia. Los paneles fotovoltaicos más comunes en el mercado son: (Tabla 3.1).



Fig. 3.6. Panel solar fotovoltaico. Fuente: (iluminet, 2016)

Tabla 3.1

Tipos de paneles solares fotovoltaicos

Celdas	Silicio	Rendimiento de laboratorio	Rendimiento comercial	Características
	Monocrystalino	24%	Entre el 17% y 20%	Color de celdas azul marino homogéneo y fabricadas por el método Czochralski
	Policristalino	19%	Entre el 13% y 15%	Las celdas están formadas por cristales lo que les da una apariencia con diferentes tonos azules. Mayor resistencia al sobrecalentamiento.
	Amorfo	13%	Entre el 7% y 9%	Es una placa flexible y económicamente muy accesible.

Fuente: (Serrano, 2017)

3.1.3 Regulador de carga

El objetivo principal de un regular de carga dentro de un SFA es el de realizar un proceso óptimo de carga de la batería, permitiendo de esta forma la carga completa y así evitar la sobrecarga y descarga excesivas responsables de causar daños a los acumuladores. Los reguladores de carga preservan y determinan la vida útil de las baterías, ya que estos permiten el paso de la electricidad dependiendo del estado en el que se encuentre el acumulador en cada momento, por el contrario, si la batería se encuentra totalmente cargada, éste impedirá el paso de corriente al acumulador para evitar sobrecalentamiento.



Fig. 3.7. Regulador de carga. Fuente: (SUBFIELDS, s.f.)

Los parámetros principales que definen a los controladores de carga son los siguientes:

Tensión nominal: Es la diferencia de potencial para la que específicamente fue diseñado un instrumento o instalación eléctrica.

Intensidad máxima en generación: Esta será la energía recibida desde los paneles solares fotovoltaicos.

Intensidad máxima de consumo: Es la intensidad que será proporcionada a la parte de la instalación que corresponde a la conexión de los equipos eléctricos del usuario.

Pérdida máxima generación/consumo: Este valor está relacionado a las caídas de tensión internas y es sustancial porque puedo modificar las tensiones de trabajo y provocar pérdidas de energía.

Autoconsumo: Este parámetro hace mención a la energía que necesita el regulador de carga para su correcto funcionamiento. Hay que tener en cuenta este parámetro al momento de realizar el dimensionamiento fotovoltaico para poder garantizar su correcto funcionamiento.

Sobrecarga: Este valor, generalmente viene dado en las hojas de especificación del producto como un porcentaje, el cual indica el valor sobre la tensión nominal que el regulador de carga tolera sin causar algún daño importante en su funcionamiento.

3.1.4 Acumuladores

Las baterías son dispositivos capaces de transformar energía química en energía eléctrica. Dentro de un SFA éstas almacenan la energía eléctrica proporcionada por los paneles fotovoltaicos; las baterías suelen ser la parte más sensible de un sistema fotovoltaico autónomo, en el que más atención y cuidado se debe prestar. Los principales parámetros que son útiles al momento de elegir una batería son los siguientes:

Capacidad: Se refiere a la cantidad de energía que se puede obtener a través de la descarga de un acumulador, inicialmente cargado al máximo (AutoSolar, 2015). La capacidad de una batería se mide en Amperios-hora (Ah) para un determinado tiempo de descarga y se calcula realizando el producto de la intensidad de descarga del acumulador durante el tiempo en el que esté actuando: $C = (I)(t)$. Los acumuladores tienen un voltaje nominal que generalmente suele ser de 2, 6, 12 y 24 V.

Eficiencia de carga: Es la relación existente entre la energía que es utilizada para cargar la batería y la que es realmente almacenada. Se debe tener en cuenta que el valor de la eficiencia de carga debe ser lo más alto posible (aproximarse al 100%) ya que, de lo contrario, será necesario aumentar el número de paneles fotovoltaicos al sistema y de esta forma, obtener los resultados deseados.

Auto descarga: Un acumulador que es dejado en reposo sin cargar pierde de manera gradual su carga, este efecto es conocido como auto descarga. Existen factores que ocasionan la aceleración de este efecto en las baterías, como puede ser la construcción de la batería, su edad, la temperatura y las condiciones en las que se encuentra.

Profundidad de descarga: Es la cantidad en porcentaje que se obtiene del acumulador durante una descarga completa partiendo de la batería completamente cargada. A partir de esta profundidad de descarga se pueden clasificar como descargas superficiales a las que tienen menos del 20% de descarga y como descargas profundas las que son hasta del 80%.

La profundidad de descarga afecta directamente la vida útil de la batería, ya que si el acumulador queda completamente descargado este se puede ver seriamente afectado y perder gran parte de su capacidad de carga.

3.1.5 Inversor

El inversor es un dispositivo electrónico que transforma la corriente directa (DC) en corriente alterna (AC), esta corriente debe tener las mismas características que la red eléctrica a la que esté conectada ya que no debe haber variaciones para evitar perturbaciones en la red eléctrica de distribución.

Tipos de inversores

Inversor central: Son equipos que están diseñados para conectar a más de diez series de paneles fotovoltaicos y generalmente se ocupan en proyectos de grandes dimensiones como fábricas o granjas solares.

Inversor orientado a rama: Este inversor recibe su nombre debido a que está conectado a un string de paneles fotovoltaicos; estos paneles están conectados en serie por lo que la corriente a través de ellos es la misma mientras que los voltajes se suman directamente.

Varios de estos inversores permiten la conexión de varios arreglos en paralelo en vez de utilizar un mismo circuito para todo el arreglo fotovoltaico (David, 2018). De esta manera los paneles solares fotovoltaicos en un mismo circuito pertenecen a un arreglo en serie, pero distintos circuitos se encuentran en un arreglo en paralelo.

Micro inversor: Este tipo de inversores es más compacto y va conectado a un panel fotovoltaico, aunque los más recientes sirven para dos módulos fotovoltaicos. La ventaja de este tipo de módulos es que un arreglo fotovoltaico puede operar de manera óptima incluso

si hay diferencia de orientación entre los módulos o sombras ocasionales, ya que estos inconvenientes no afectan la producción total.

3.1.6 Elementos de Protección

Estos elementos cumplen una doble función, la de cuidar la integridad del usuario e instalador, así como la de proteger a los equipos que conforman el sistema y al sistema mismo.

Fusibles e interruptores magneto-térmicos: Su principal función es la de abrir un circuito cuando la corriente exceda el límite e impide el paso de energía, protegiendo de esta manera a los usuarios y equipos (Style, 2012).

Un fusible contiene un alambre fino que se quema cuando la corriente alcanza el valor para el cual fue creado por el fabricante (Fig. 3.8).



Fig. 3.8. Fusible. Fuente: (Style, 2012)

Los interruptores magneto-térmico son interruptores que se abren para impedir el paso de la corriente cuando esta excede el valor definido (Fig. 3.9).



Fig. 3.9. Pastilla magneto-térmica. Fuente: (Alfaluz, s.f.)

3.1.7 Método de dimensionamiento del mes crítico

Existen diversos métodos para dimensionar un sistema fotovoltaico que van desde un cálculo realizado a mano hasta softwares especializados; en este trabajo de investigación el dimensionamiento se llevó a cabo con base en el mes más crítico, es decir, aquel o aquellos meses en los que los periodos de radiación solar global sean los más cortos en comparación con los demás meses. Se optó por este método de dimensionamiento fotovoltaico para brindar mayor confiabilidad al sistema y evitar la insuficiencia energética en el prototipo de invernadero.

Los pasos para realizar el dimensionamiento de sistema fotovoltaico aislado fueron los siguientes:

- 1) Recurso solar: Conocer el sitio geográfico donde será instalado el SFA y consultar la irradiación solar de la cual se dispondrá.
- 2) Estimación de consumos: Los datos proporcionados para calcular el consumo energético tienen que ser lo más apegados a la realidad, esto para evitar posibles errores en el dimensionamiento y como resultado futuros desabastos energéticos para los aparatos involucrados.

3) Dimensionamiento del módulo fotovoltaico: En este punto se calcula el número de paneles solares fotovoltaicos que serán usados en el SFA, esto se obtiene después de conocer el consumo eléctrico diario. Con base en este cálculo, se selecciona el panel fotovoltaico que cumpla con las necesidades solicitadas.

4) Dimensionamiento del sistema de acumulación: Cálculo del número de baterías que se usarán en el sistema fotovoltaico autónomo, se debe tener en cuenta el número de días de autonomía que se otorgarán a los sistemas eléctricos y electrónicos del invernadero, con base al recurso solar disponible.

5) Dimensionamiento de regulador: El principal objetivo al momento de dimensionar el regulador es obtener la corriente máxima que va a circular por la instalación. Se debe calcular la corriente que produce el generador y la que es consumida por la carga, la corriente máxima de estas dos, será la que deba soportar el regulador cuando se encuentre en funcionamiento (Hontoria).

6) Dimensionamiento de inversor: Para este proyecto de investigación no se requirió el uso de un inversor, ya que todas las cargas necesitaban DC.

7) Dimensionamiento del cableado y protecciones: El cableado es uno de los puntos en los que se debe prestar mayor atención ya que al haber un consumo existirán pérdidas debido a las caídas de tensión en los cables.

3.2 Dimensionamiento del SFA

3.2.1 Ubicación

El sistema fotovoltaico autónomo se ubicará en la terraza del edificio FCE5 (Fig.3.10), el cual pertenece a la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma Puebla.

El estado de Puebla tiene una latitud de 19.06° , este dato es importante ya que este es el ángulo al cual se deben inclinar los paneles solares fotovoltaicos para obtener la máxima generación de energía.

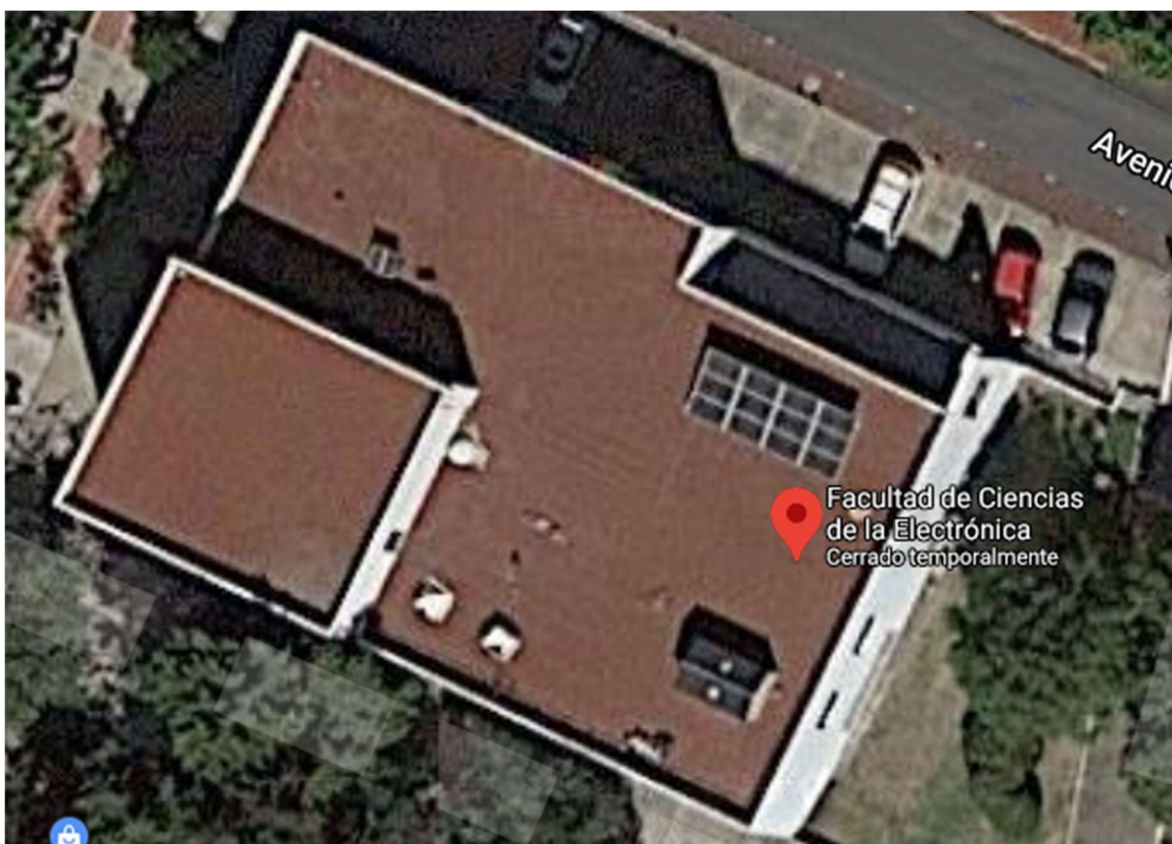


Fig. 3.10. Edificio FCE5. Fuente: (Google, s.f.)

3.2.2 Recurso solar

Para poder conocer el recurso solar con el que se cuenta se hizo uso de la base de datos de la NASA (Paul W. Stackhouse, s.f.) sobre la irradiancia solar para el estado de Puebla. La siguiente tabla muestra los datos de la irradiancia obtenidos a través de este sitio (Tabla 3.2)

Tabla 3.2

Datos de Irradiancia solar para el Estado de Puebla

Northward facing tilted surfaces are designated negative (-)

PARAMETER	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
-END HEADER-													
SI_EF_TILTED_SURFACE_HORIZONTAL	4.55	5.23	6.13	6.11	6.02	5.61	5.64	5.45	4.91	4.89	4.77	4.34	5.30
SI_EF_TILTED_SURFACE_LAT_MINUS15	4.78	5.42	6.25	6.13	5.98	5.55	5.59	5.44	4.95	5.01	4.99	4.57	5.39
SI_EF_TILTED_SURFACE_LATITUDE	5.44	5.93	6.47	6.00	5.65	5.14	5.21	5.25	4.98	5.32	5.65	5.27	5.53
SI_EF_TILTED_SURFACE_LAT_PLUS15	5.78	6.10	6.33	5.56	5.03	4.54	4.63	4.81	4.76	5.35	5.98	5.66	5.38
SI_EF_TILTED_SURFACE_VERTICAL	4.20	3.89	3.10	1.94	1.53	1.61	1.57	1.67	2.20	3.12	4.26	4.26	2.78
SI_EF_OPTIMAL	5.83	6.10	6.47	6.13	6.04	5.69	5.69	5.45	5.00	5.38	6.02	5.74	5.79
SI_EF_OPTIMAL_ANG	42.00	34.00	20.50	5.50	-5.00	-11.00	-9.00	1.00	13.00	28.00	41.00	44.50	17.00
SI_EF_OPTIMAL_ANG_ORT	S	S	S	S	N	N	N	S	S	S	S	S	S
SI_EF_TRACKER	6.74	7.63	8.15	7.43	7.07	6.75	6.81	6.34	5.85	6.51	7.40	6.60	6.94

Fuente: (NASA, s.f.)

La página nos arroja distintos datos sobre la irradiancia solar como la orientación de la superficie inclinada, en este caso de los paneles fotovoltaicos, así como la irradiancia para una superficie que se encuentra con un ángulo fijo, referente al lugar dónde se llevará a cabo la instalación (Puebla). Para este dimensionamiento utilizaremos la irradiancia solar para la inclinación basada en la latitud del sitio.

Para poder realizar el dimensionamiento, necesitamos conocer el número de HSP. Para calcularlo es necesario dividir el valor de la irradiación solar incidente entre el valor de la potencia de irradiancia en condiciones estándar. El valor de la irradiancia solar en condiciones ideales es de 1000 w/m^2 .

La tabla 3.3 muestra las horas pico para cada mes del año en el estado de Puebla, para realizar el dimensionamiento se tomó el valor del mes de septiembre, ya que este es el que menos horas de irradiación recibe, es decir, el mes crítico.

Tabla 3.3

Horas solares pico en el estado de Puebla

Puebla	
Mes	HSP
Ene	5.44
Feb	5.93
Mar	6.47
Abr	6
May	5.65
Jun	5.14
Jul	5.21
Ago	5.25
Sep	4.98
Oct	5.32
Nov	5.65
Dic	5.27

3.2.3 Estimación de consumos

Tabla 3.4

Tabla de consumos eléctricos diarios.

Cantidad	Carga(DC)	Volts	Corriente (Amp)	Potencia unitaria (W)	Potencia (Watts)	Hrs al día	Total de energía (wh)*Margen de seguridad (1.2)
1	Extractor	12	6	72	72	6	518.4
1	Ventilador Extractor	12	0.25	3	3	6	21.6
2	Ventilador Atrás	12	0.25	3	6	6	43.2
1	Ventilador lateral	12	0.25	3	3	6	21.6
1	Ventilador Celda	12	0.25	3	3	1	3.6
3	Electroválvula	12	0.6	7.2	21.6	0.3	7.776
1	Celda Peltier	12	4	48	48	1	57.6
1	Luces	12	1.2	14.4	14.4	4	69.12
2	DHT11	5	0.0025	0.0125	0.025	24	0.72
3	HL-69	5	0.0025	0.0125	0.0375	24	1.08
1	Fotorresistor	5	0.0025	0.0125	0.0125	4	0.06
	ESP-01	3.3	0.08	0.264	0	24	0
1	Módulo SD	5	0.08	0.4	0.4	24	11.52
1	Arduino	9	2	18	18	24	518.4
1	LCD	5	0.0015	0.0075	0.0075	24	0.216
					189.4825	Total	1274.892

Todas las cargas presentadas en la tabla 3.4 son de corriente directa DC, por lo que no se necesitará la presencia de un inversor

En la instalación habrá pérdidas por el rendimiento de la batería, esto influye en la energía final requerida, por lo que, para realizar un dimensionamiento confiable se usará un rendimiento en la batería del 95% y en los conductores del 100%.

3.2.4 Cálculo del consumo medio diario

Para calcular los consumos medio diarios (Lmd) se considera la siguiente expresión (Hontoria):

$$Lmd = \frac{LmdDC + \frac{LmdAC}{\eta_{inv}}}{\eta_{bat} * \eta_{con}} \quad (3.1)$$

Donde:

Lmd = Consumo medio de energía diario.

LmdDC = Consumo medio de energía diario de las cargas continuas.

LmdAC = Consumo medio de energía diario de las cargas en alterna.

η_{inv} = Rendimiento del inversor

η_{bat} = Rendimiento de la batería

η_{con} = Rendimiento de los conductores.

$$Lmd = \frac{1282,49 \text{ Wh/día} + 0}{0,95 * 1} = 1.282 \text{ kWh/día}$$

3.2.5 Dimensionamiento de los paneles fotovoltaicos

Teniendo la demanda energética de la carga total, se está en condiciones para dimensionar el panel solar fotovoltaico.

El número total de paneles fotovoltaicos que serán utilizados en SFA se pueden calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$N_T = \frac{L_{mdcrit}}{P_{MPP} * H_{Pcrit} * PR} \quad (3.2)$$

Donde:

N_T = Número total de módulos

L_{mdcrit} = Consumo medio diario para el mes crítico

P_{MPP} = Potencia pico del módulo en condiciones estándar de medida.

H_{Pcrit} = Horas de sol pico en mes crítico (septiembre)

PR = Factor global de funcionamiento. Este factor varía entre el 0,65 al 0,90, por defecto se utilizará 0,90.

El panel fotovoltaico que se utilizará para este proyecto es el modelo SW130 poly R6A de 130 en STC (Fig. 3.11).

$$N_T = \frac{1282 \text{Wh/día}}{130 \text{w} * 4,98 \text{hps} * 0,9} = 2,86 \approx 3$$

Sunmodule® SW 130/140 poly R6A

COMPORTAMIENTO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR DE PRUEBA (STC*)

		SW 130	SW 140
Potencia en el punto de máx. potencia	P_{max}	130 Wp	140 Wp
Tensión en vacío	U_{oc}	21,5 V	22,1 V
Tensión a potencia máxima	U_{mp}	17,4 V	18,0 V
Corriente de cortocircuito	I_{sc}	7,99 A	8,35 A
Corriente a potencia máxima	I_{mp}	7,49 A	7,85 A

Tolerancia de medición (P_{max}) de acuerdo con TÜV Rheinland: +/- 2% (TÜV Power controlled)

*STC: 1000W/m², 25°C.

Fig. 3.11. Características panel SW130 poly R6A. Fuente: (Yumpu, s.f.)

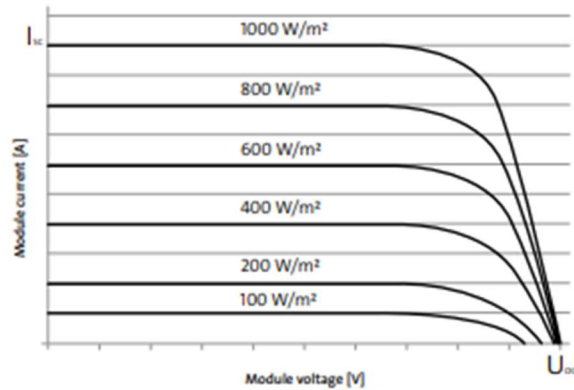


Fig. 3.12. Curva I-V panel fotovoltaico SW130 poly R6A. Fuente: (Yumpu, s.f.)

Conociendo el número total de paneles a utilizar se puede determinar si es necesario agrupar los módulos en serie o en paralelo. El número de módulos que habrá en serie se obtiene a partir de la siguiente ecuación

$$N_{\text{serie}} = \frac{V_{\text{bat}}}{V_{\text{modMPP}}} \quad (3.3)$$

Donde:

N_{serie} = Número de paneles en serie

V_{bat} = Voltaje nominal de la batería

V_{modMPP} = Voltaje máximo del panel fotovoltaico.

El voltaje nominal de las baterías que se usarán es de 12v

$$N_{\text{serie}} = \frac{12\text{v}}{17,4\text{v}} = 1$$

El número de módulos que habrá que poner en paralelo se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$N_{\text{paralelo}} = \frac{NT}{N_{\text{serie}}} \quad (3.4)$$

$$N_{\text{paralelo}} = \frac{3}{1} = 3$$

Teniendo estos resultados, obtenemos que los tres paneles estarán conectados en paralelo (Fig. 3.13).

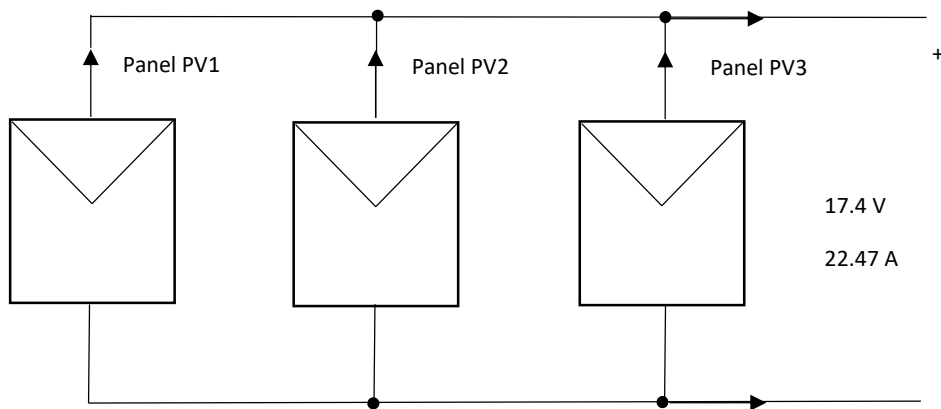


Fig. 3.13. Conexión en paralelo de los paneles fotovoltaicos.

3.2.6 Dimensionamiento del sistema de acumulación

Para definir el tamaño del sistema de acumulación se deben tomar en cuenta dos parámetros muy importantes, los cuales son:

Máxima profundidad de descarga estacional y diaria: Es el nivel de máxima descarga que se le permite a la batería antes de su desconexión del regulador. En baterías estacionarias de plomo-ácido los valores adecuados para estos parámetros, respectivamente, son (Hontoria):

- Profundidad de descarga máxima estacionaria ($PD_{\text{max,e}}$) = 70% = 0,7
- Profundidad de descarga máxima diaria ($PD_{\text{max,d}}$) = 15% = 0,15

Días de autonomía: Es el número de días sucesivos en los que, a pesar de ausencia de sol, las baterías son capaces de satisfacer la demanda energética del sistema sin sobrepasar la profundidad máxima de descarga de los acumuladores, procurando así, el buen funcionamiento del sistema. Este sistema tendrá 3 días de autonomía, ya que los días de autonomía cortos prolongan la vida del acumulador.

La capacidad de las baterías es la cantidad de energía que un acumulador es capaz de almacenar, esto para asegurar los días de autonomía. Las siguientes ecuaciones se utilizan para hallar la capacidad de las baterías en Wh (Watts-hora) como en Ah (Ampers-hora).

La capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima diaria en Watts-hora se calcula de la siguiente manera:

$$Cnd(Wh) = \frac{Lmd}{PD_{max,d} * Fct} \quad (3.5a)$$

Donde:

Cnd(Wh): Capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima diaria en Watts-hora

Lmd = Consumo medio de energía diario

PD_{max,d} = Profundidad de descarga máxima diaria

Fct = Factor de corrección de temperatura

El Fct tomará un valor de 1 para realizar un correcto cálculo de consumo.

$$Cnd(Wh) = \frac{1282 \text{ Wh/día}}{0,15 * 1} = 8546,6 \text{ Wh}$$

Capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima diaria en Amperios-hora

$$Cnd(Ah) = \frac{Cnd(Wh)}{V_{bat}} \quad (3.5b)$$

Donde:

Cnd(Ah): Capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima diaria en Amperios-hora

Cnd(Wh): Capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima diaria en Watts hora

Vbat: Voltaje nominal de la batería.

$$Cnd(Ah) = \frac{8546,66 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = 712,22Ah$$

La capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima estacional en Watts-hora se calcula de la siguiente manera:

$$Cne(Wh) = \frac{Lmd * N}{PD_{max, e} * Fct} \quad (3.6a)$$

Donde:

Cne(Wh): Capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima estacional en Watts-hora

Lmd = Consumo medio de energía diario

N = Número de días de autonomía

PD_{max,e} = Profundidad de descarga máxima estacional

Fct = Factor de corrección de temperatura

$$Cne(Wh) = \frac{1282 \text{ Wh/día} * 3}{0,7 * 1} = 5494,28 \text{ Wh}$$

Capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima estacional en Amperios-hora se calcula de la siguiente manera:

$$C_{ne}(Ah) = \frac{C_{ne}(Wh)}{V_{bat}} \quad (3.6b)$$

Donde:

$C_{ne}(Ah)$ = Capacidad nominal del acumulador en función de la descarga máxima estacional en Amperios-hora

$C_{ne}(Wh)$ = Capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima estacional en Watts-hora

V_{bat} = Voltaje nominal de la batería

$$C_{ne}(Ah) = \frac{5494,28 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = 457,85Ah$$

La capacidad nominal de la batería se elige tomando el valor más alto entre $C_{nd}(Ah)$ y $C_{ne}(Ah)$ en este caso será el valor de $C_{nd}(Ah)$ es decir 712.22 Ah. Se tendrá que elegir la batería redondeando este valor por exceso para obtener mejor margen de seguridad.

Se hará uso de baterías estacionarias de la marca HOPPECKE power VL de plomo-ácido, serán baterías de 12v modelo Hoppecke Power 6 OPzS 600 con una capacidad de 900 Ah en C100 (Fig. 3.14).



Fig. 3.14. Batería Hoppecke Power 6 OPzS 600. Fuente: (Novateck, s.f.)

3.2.7 Dimensionamiento del regulador

La selección del regulador de carga que será utilizado debe ser con base al cálculo de la máxima corriente de entrada y de salida que debe soportar para su buen funcionamiento. Para realizar el cálculo de la corriente de entrada del regulador de carga se debe hacer el producto entre la corriente unitaria en corto circuito (I_{sc}) del panel solar fotovoltaico, se utiliza esta corriente porque es la máxima corriente que nos entregará nuestro panel fotovoltaico, el número de paneles fotovoltaicos en paralelo y un factor de seguridad para evitar daños ocasionales al regulador. Esta expresión se muestra a continuación:

$$I_{regin} = 1,25 * I_{MOD,SC} * NP \quad (3.7)$$

Donde:

I_{regin} = Corriente de entrada al regulador

$I_{MOD,SC}$ = Corriente unitaria del módulo fotovoltaico en condiciones de cortocircuito.

NP = Número de strings en paralelo

1,25 = es un factor de seguridad para evitar daños ocasionales al regulador.

$$I_{regin} = 1,25 * 7,99 \text{ A} * 3 = 29,96 \text{ A}$$

Para realizar el cálculo de la corriente de salida, se deben considerar las potencias de las cargas en DC y en AC, en este caso solo se consideran las cargas en DC, ya que no se tienen cargas en AC.

$$I_{\text{regout}} = \frac{1,25 * (P_{\text{DC}} + \frac{P_{\text{AC}}}{\eta_{\text{inv}}})}{V_{\text{bat}}} \quad (3.8)$$

Donde:

I_{regout} = Corriente de salida del regulador

P_{DC} = Potencia de cargas en continua.

P_{AC} = Potencia de cargas en alterna.

η_{inv} = rendimiento del inversor.

$$I_{\text{regout}} = \frac{1,25 * (177.1 + 0)}{12} = 18,4 \text{ A}$$

El regulador de carga que se deberá usar tendrá que soportar una corriente máxima de entrada de 29,96 A y una corriente máxima de salida de 18,4 A con un voltaje nominal de 12 v.

El regulador de carga que se adapta a estas necesidades es el VS3024AU de la marca EPsolar (Fig. 3.15). Tiene un voltaje nominal de 12/24 V autoajustable y una carga/descarga nominal de 30 A.



Fig. 3.15. Controlador VS3024AU. Fuente: (Solar, s.f.)

3.2.8 Dimensionamiento del cableado

Para realizar el dimensionamiento del cableado que será utilizado para la instalación fotovoltaica, se deben considerar dos parámetros importantes:

- Criterio de intensidad máxima admisible o de calentamiento: La temperatura que el conductor del cable debe tener al estar expuesto un trabajo a plena carga y permanente, no debe exceder en ningún momento, la temperatura máxima que es admitida por los materiales que se utilizan en el aislamiento del cable. Esta temperatura está especificada en normas particulares de los cables y generalmente es del 70% para cables termoplásticos y del 90% para cables con aislamiento termoestables (Lorenzo, s.f.).
- Criterio de la caída de tensión: Al estar circulando una corriente a través de los conductores se ocasiona una pérdida de la potencia que es transportada por los cables, así como también, una caída en el voltaje o diferencia de este entre las tensiones en el origen y en el extremo de la canalización.

Se deben especificar con los criterios anteriores cada tramo de línea o, mejor dicho, cada sección de la instalación fotovoltaica. La caída máxima de tensión para cada tramo de línea viene especificada en la siguiente tabla:

Tabla 3.5

Caídas de tensión por cada tramo de línea en un SFA

Caídas de tensión	
Instalación autónoma	
Circuito	Caída de Tensión
Panel-regulador	1,5%
Regulador-batería	0,5%
Batería-inversor	1%
Circuito continua	1,5%
Circuito alterna	1,5%

Fuente: (BirthLH, s.f.)

Para poder conocer el tipo de conductor que será utilizado para la instalación eléctrica se hace uso de las siguientes expresiones (BirthLH, s.f.):

- En función de la potencia:

$$S = \frac{2 * L * P}{\gamma * \Delta U * U} \quad (3.9)$$

- Función de la intensidad:

$$S = \frac{2 * L * I}{\gamma * \Delta U} \quad (3.10)$$

Donde:

S = Sección transversal del cable en mm²

L = Longitud del cable

I = Intensidad

P = Potencia

Y = Conductividad del cobre

U = Tensión

ΔU = Caída de tensión

$$\Delta U = \text{Caída de tensión} * V_{ns} \quad (3.11)$$

Donde:

V_{ns} = Voltaje nominal del sistema fotovoltaico

En este dimensionamiento los tramos de líneas se dividen de la siguiente forma

(Tecnosolab, s.f.):

Línea paneles-regulador: La corriente que es generada por los paneles fotovoltaicos es continua y la intensidad máxima a transportar dependerá el número de paneles y la forma en la que se encuentre el arreglo de estos. Esta intensidad será la corriente de entrada del regulador de carga.

Línea regulador baterías: La corriente en este tramo sigue siendo continua y transporta la misma corriente que la línea de los paneles y el regulador.

Línea baterías-consumos: La intensidad que circulará en este tramo de línea será función de la máxima potencia y la máxima tensión, todo se encuentra en DC ya que, como se mencionó anteriormente, nuestra carga consume en corriente continua.

Para conocer la conductividad o resistividad del conductor sin conocer la temperatura de trabajo a la cual este será sometido, se deberán usar valores desfavorables para esta, tomando en cuenta el tipo de aislamiento, recordando que la temperatura máxima para cables de termoplásticos es de 70°C y para cables con aislamiento termoestable es de 90°C.

La siguiente tabla muestra el valor de conductividad para el cobre, material del cual están fabricados los conductores, dependiendo del valor en su temperatura.

Tabla 3.6
Tabla de conductividad para el cobre

Datos para la conductividad			
Material	γ_{20°	γ_{70°	γ_{90°
Cobre	56 m/ Ω mm ²	47,6 m/ Ω mm ²	44 m/ Ω mm ²
Temperatura	20 °C	70 °C	90 °C

Fuente: (BirthLH, s.f.)

Cálculo de cableado para el tramo de línea paneles fotovoltaicos-regulador

La longitud de tramo que habrá entre los paneles y el regulador será de 5 m y se utilizará conductores de termoplástico de PVC unipolares.

La intensidad máxima en el circuito paneles-regulador estará expresada por la siguiente igualdad:

$$I_{pr} = I_{regin} \quad (3.12)$$

Donde:

I_{pr} = Corriente en la línea paneles-regulador

I_{regin} = Corriente de entrada al regulador

$$I_{pr} = 29,96 \text{ A}$$

Sabiendo que, para este tramo de línea se requiere como caída de tensión máxima un 1,5% y que la tensión nominal del arreglo fotovoltaico es de 17,4 V podemos calcular ΔU

$$\Delta U = 0.015 * 17,4V = 0,261 \text{ V}$$

Teniendo en cuenta que, la temperatura máxima en conductores de termoplástico no superará los 70°, se elige una conductividad (γ) de 47,6, entonces se tiene:

$$S = \frac{2 * 5m * 29,96A}{47,6 * 0,261V} = 24.1 \text{ mm}^2$$

Se elige, por tanto, una sección transversal comercial de 25 mm², lo que equivale a 4 AWG.

Cálculo de cableado para el tramo de línea regulador -baterías

Se utilizarán conductores de termoplástico de PVC unipolares con una longitud de 1 metro y la intensidad máxima en el circuito regulador-baterías estará expresada por la siguiente igualdad:

$$I_{rb} = I_{pr} \quad (3.13)$$

Donde:

I_{rb} = Corriente máxima en la línea regulador-baterías

I_{pr} = Corriente en la línea paneles-regulador

$$I_{rb} = 29,96 \text{ A}$$

Teniendo presente que, para este tramo de línea, se requiere como caída de tensión máxima un 0,5% y que la tensión nominal del arreglo fotovoltaico es de 17,4 V podemos calcular ΔU

$$\Delta U = 0.005 * 17,4V = 0,087 \text{ V}$$

Entonces, la sección de cable será la siguiente

$$S = \frac{2 * 1\text{m} * 29,96\text{A}}{47,6 * 0,087\text{V}} = 14.46 \text{ mm}^2$$

Se elige una sección transversal comercial de 16,8 mm², lo que equivale a 5 AWG.

Cálculo de cableado para el circuito en corriente continua

La longitud que habrá en el circuito de corriente continua será de 3 m y se utilizará conductores de termoplástico de PVC unipolares.

La intensidad máxima en el circuito de corriente continua se calculará gracias a la siguiente expresión:

$$I_{cc} = \frac{1,25 * P_{dc}}{V_{ns}} \quad (3.14)$$

Donde:

I_{cc} = Intensidad máxima en corriente continua

P_{dc} = Potencia en corriente continua

$$I_{cc} = \frac{1,25 * 189,74\text{W}}{12 \text{ V}} = 19,7 \text{ A}$$

El circuito en corriente continua requiere como caída de tensión máxima un 1,5% y la tensión nominal del arreglo fotovoltaico es de 17,4 V, entonces se calcula ΔU

$$\Delta U = 0.015 * 17,4\text{V} = 0,261 \text{ V}$$

entonces se tiene:

$$S = \frac{2 * 3m * 19,7A}{47,6 * 0,261V} = 9,7 \text{ mm}^2$$

Se elige una sección transversal comercial de 10,5 mm², lo que vale 7 AWG.

Tabla 3.7

Resumen de los cálculos realizados para el cableado del SFA.

TRAMO DE LÍNEA			
	Paneles-Regulador	Regulador-Batería	Circuito DC
Longitud (m)	5	1	3
Intensidad (A)	29,96	29,96	19,7
Tensión (V)	12	12	12
Caída de tensión (%)	1,5%	0,5%	1,5%
Calibre del conector	4 AWG	5 AWG	7 AWG

La tabla 3.7 muestra los calibres calculados para los conectores de cada tramo de línea, pero de acuerdo a la NOM-001-SEDE-2012 art 690 el calibre del conductor que se debe utilizar de acuerdo al valor nominal de la corriente de cada tramo de línea se encuentra entre los 12 y 14 AWG.

3.2.9 Elementos de protección

Como elemento de protección entre los paneles fotovoltaicos y el regulador al igual que entre el regulador y las baterías, se propone usar un fusible modelo HP10M30 de 30 A para 1000 VDC de la marca Mersen (Fig. 3.16).



Fig. 3.16. HP10M30 Mersen. Fuente: (Mersen, s.f.)

3.2.10 Diagrama de conexión del sistema

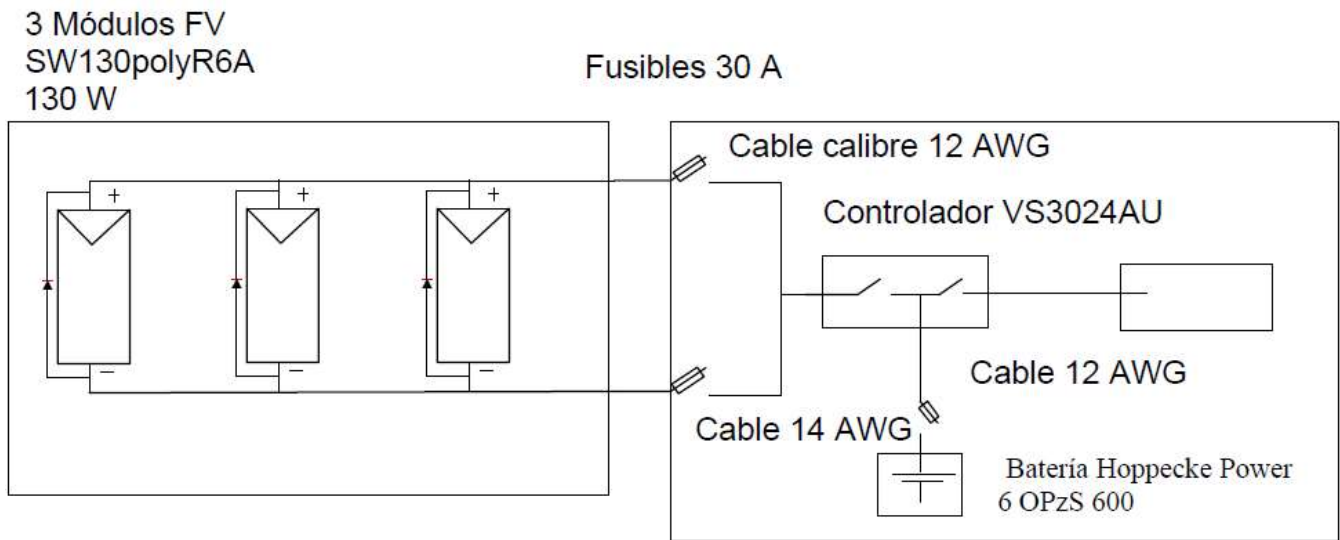


Fig 3.17 Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico

Capítulo 4. Implementación, Resultados y Análisis del Invernadero.

En la primera parte de este capítulo se muestran los resultados del control realizado sobre las variables del sistema, que son: temperatura y humedad relativa, riego y luz, así como el análisis de los datos obtenidos durante el tiempo de monitoreo de estos parámetros.

4.1 Control de temperatura y humedad relativa

Para la etapa de control y monitoreo de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero, se colocaron dos sensores DHT11 localizados en contra esquina, a una altura media de la estructura. Las mediciones tomadas para referencia del control fueron promediadas a partir de las mediciones tomadas de estos dos sensores. La ubicación de estos sensores se escogió con el propósito de tener un monitoreo adecuado durante el crecimiento de la planta, ya que la altura máxima del rábano queda por debajo de los sensores.

La celda termoelectrica se incorporó con una función en específico, la de aumentar la temperatura dentro del invernadero cuando se requiriera, es decir, cuando la temperatura detectada por los sensores fuera menor a 5°C, ya que, está temperatura es la mínima biológica para el rábano.

La información proporcionada por los sensores DHT11 fueron monitoreados a través de IoT, es decir, de manera remota y en tiempo real, esto debido a que la ubicación en la cual se realizó el proyecto no era posible el acceso las 24 horas del día ni los 7 días de la semana. Gracias a este recurso se pudieron obtener los datos más relevantes para el análisis experimental.

Se realizó un análisis de distribución de frecuencias de temperaturas en horas diurnas con todos los datos obtenidos durante el lapso de tiempo de censado, el cual fue del 11 de febrero al 15 de Marzo del 2020, con el objetivo de conocer el intervalo de horas en el que la temperatura registrada por los sensores era mayor a la temperatura máxima biológica permitida por el cultivo seleccionado y de esta forma concentrarnos específicamente en este intervalo, pues fue en el que el sistema de control entró en acción, ya que, durante las horas nocturnas, las temperaturas registradas se encontraban dentro del rango óptimo para el crecimiento y desarrollo del cultivo de rábano.

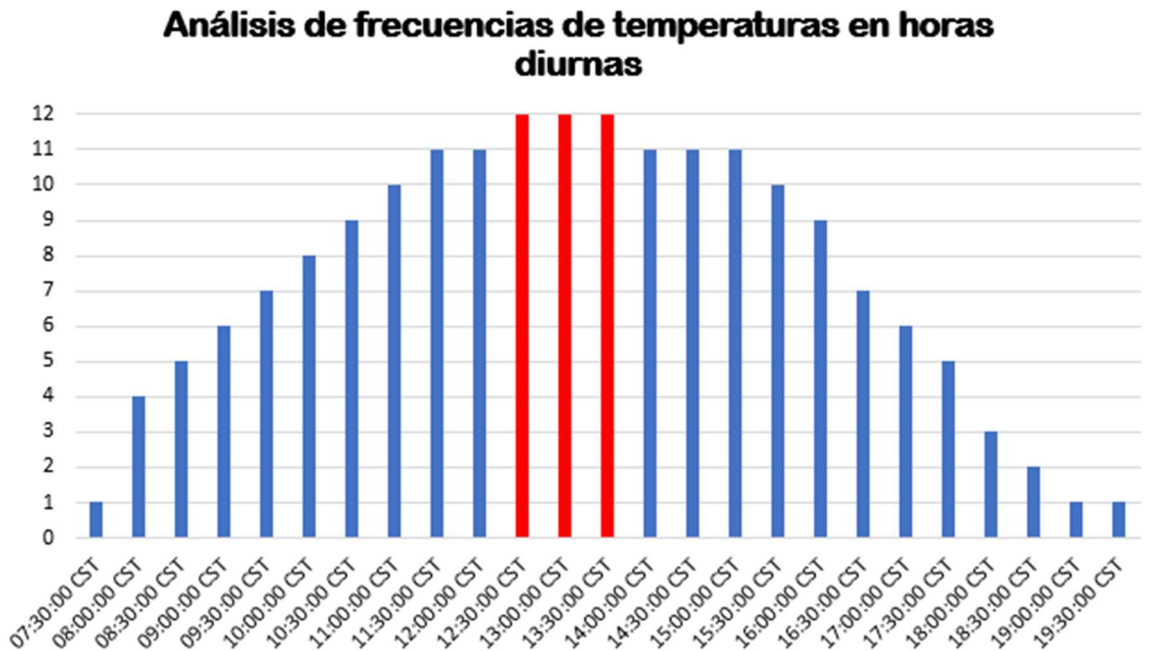


Fig. 4.1 Análisis de distribución de frecuencias de temperaturas altas durante las horas diurnas.

El intervalo con un registro de temperaturas iguales o mayores a 30°C fue de las 11:00 hrs a las 15:00 hrs, como se muestra en la Fig. 4.1. Las barras de color rojo son el intervalo de horas donde se encuentra el rango de temperaturas más altas monitoreadas durante todo el tiempo de censado, las cuales se encuentran entre 40.2°C-49.8°C.

Dentro de las mediciones de temperatura obtenidas por los sensores, se encontraron temperaturas mayores a 50°C, siendo que, el rango en la medición de temperatura para los sensores DHT11 es de 0°C-50°C.

Se optó por utilizar otra forma de medir la temperatura durante el intervalo de tiempo donde se encontraban las temperaturas máximas, utilizando un termómetro de mercurio de laboratorio, gracias a esto, se pudo comprobar que después de los 45 °C, medidos a través de los sensores, existía un margen de error de 5°C.

4.1.2 Etapas de diseño y ajuste de mediciones

Etapa 1

Para esta etapa se consideraron las primeras dos semanas del ciclo de cultivo del rábano, es decir, su germinación y primeras hojas o también conocidas como cotiledones. Este periodo de tiempo se encuentra entre el 11 de febrero de 2020 y el 25 de febrero de 2020.

En esta etapa el invernadero contaba con dos ventiladores situados en las paredes laterales a la altura de los sensores DHT11, el primer objetivo de estos ventiladores era que el aire fresco del medio entrara al invernadero. También se contaba con un extractor para expulsar el aire caliente del invernadero.

Los ventiladores y el extractor eran accionados cuando los sensores detectaban una temperatura mayor a 35 ° C, dando lugar a la extracción de aire caliente de la parte superior del invernadero e inyección de aire en este con una temperatura inferior a la expulsada, con el propósito de regular la temperatura y la renovación del aire dentro del prototipo.

Dentro de estas semanas se seleccionaron dos días para analizar el control de temperatura, se eligió el “peor día”, considerado por haber alcanzado la mayor temperatura registrada y el “mejor día” donde las temperaturas estaban dentro del rango permitido.

Esta selección se hizo de acuerdo al análisis de frecuencia (Fig. 4.1) realizado para las horas del día en el que la temperatura tomaba valores iguales o mayores al máximo de temperatura biológica requerida por la planta de rábano, para cada día dentro de un intervalo de horas diurnas.

Como el “peor día” se seleccionó el 16 de febrero del 2020, ya que durante este día se registraron las temperaturas más altas medidas en las primeras dos semanas. La gráfica 4.2 muestra que la temperatura, línea azul, llegó a un valor de 49.1 °C.

La temperatura rebasa el máximo biológico de la planta alrededor de las 8:30, aumentando hasta su punto máximo a las 14:00, lo que nos indica que, el sistema de control de temperatura no logró regular mínimamente la temperatura. Como se indicó en la Fig. 4.1, después de las

15:00, es decir, fuera del rango de horas donde se encuentran las temperaturas máximas dentro del invernadero, la curva azul comienza a descender.

Para la temperatura máxima observada en este día, la humedad relativa (HR) registrada es de 17.9%, y como se puede observar, la HR es inversamente proporcional a la temperatura ya que el grado de saturación del aire disminuye porque al aumentar la temperatura tiene mayor capacidad para contener vapor de agua. Las condiciones ideales en el intervalo diurno solo se conservaron durante cuatro horas y media.

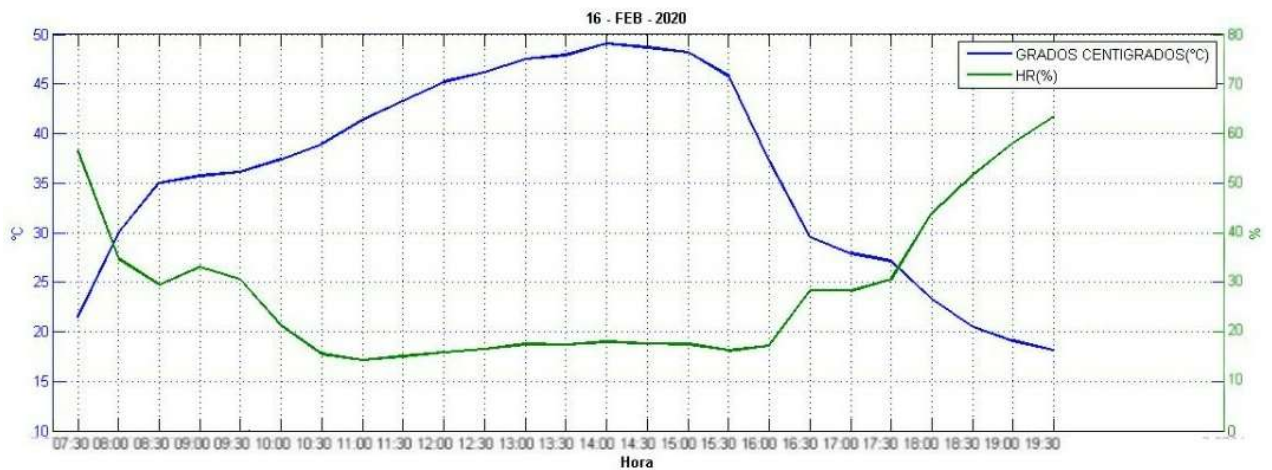


Fig. 4.2 Peor día del período 11/Feb/2020-25/Feb/2020 en horas diurnas

La gráfica de la figura 4.3 representa el “día bueno”, en otras palabras, el día donde se obtuvo, dentro de las horas que presentan las temperaturas más altas, mediciones de temperatura más bajas en comparación a todos los días pertenecientes a esta primera etapa y con una diferencia de 3.1°C respecto al 16 de febrero del 2020. La temperatura máxima registrada durante este día es de 46.1 °C con una HR de 17.3%.

Igual que en el caso de la gráfica de la Fig. 4.2, se puede observar que la temperatura excede la temperatura máxima biológica del rábano a las 9:30 llegando al punto máximo a las 14:30 después del cual, la temperatura disminuyó llegando a la temperatura óptima máxima a las 16:00 dando como resultado, cinco horas y media de condiciones ideales para la planta, durante las horas diurnas.

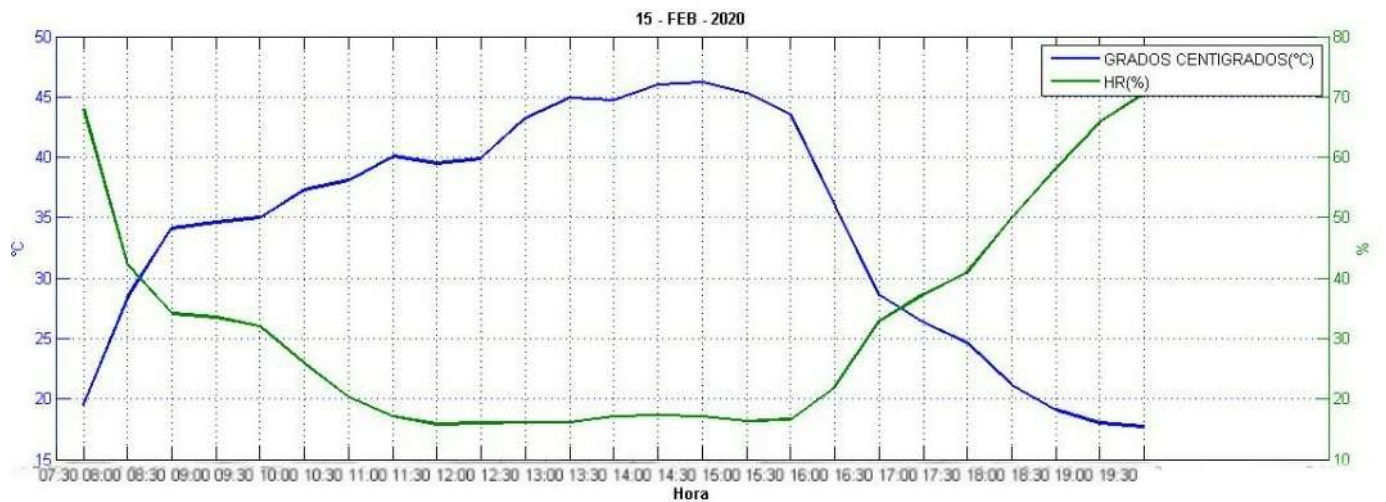


Fig. 4.3. Mejor día del período 11/Feb/2020-25/Feb/2020 en horas diurnas

Al encontrar que los mecanismos los cuales, fueron incorporados en un principio dentro del invernadero encargados de la regulación de la temperatura y humedad no estaban dando los resultados esperados, se decidió realizar otra etapa, donde se agregaron otros sistemas para poder cumplir con el objetivo de conservar las condiciones ideales para la planta durante el mayor tiempo posible.

Etapa 2

Dentro de esta etapa se analizaron los días del 3 de marzo de 2020 al 15 de marzo de 2020, evaluando de la misma forma que en la etapa uno, dos días nombrados como, el peor y el mejor durante este período de tiempo. En estas últimas semanas se llevó a cabo, dentro del ciclo biológico del rábano, el desarrollo vegetativo y crecimiento de la raíz.

En esta etapa se incorporaron un par de ventiladores en la parte trasera del invernadero, se quitó uno de los ventiladores laterales que se encontraban en el lado donde estaba colocada la celda termoeléctrica, se agregó otro extractor de calor en el lado opuesto al primero y se puso en funcionamiento a la celda Peltier en polaridad inversa, es decir, que en vez de funcionar proporcionando calor al interior de invernadero, esta vez se utilizaría la cara fría, para poder ayudar a los demás mecanismos a bajar las temperaturas altas y establecer las condiciones ideales de temperatura y humedad que necesita el rábano dentro del invernadero.

A diferencia de la etapa uno, los ventiladores, extractores y la celda Peltier entraban en estado de funcionamiento cuando los sensores DHT11 registraban temperaturas máximas a los 30 °C, esto con la finalidad de extraer el aire caliente del invernadero antes de llegar a su temperatura máxima permitida y de este modo controlar de una manera más efectiva la temperatura. cumpliendo de la misma manera, con el intercambio del aire dentro del invernadero y regulación de temperatura y de HR.

Como “peor día” dentro del último lapso del ciclo vegetativo del rábano, se seleccionó al 06 de marzo de 2020 (Fig. 4.4). En esta gráfica podemos observar que dentro del rango de horas donde se encuentra la frecuencia de temperaturas altas, según la figura 4.1, la temperatura máxima es de 38.1 °C con un RH de 16.1%.

Al analizar la gráfica, se percibe que, la curva excede la temperatura máxima permitida alrededor de las 11:30 llegando a su punto máximo, una hora después, es decir, a las 12:30, posteriormente se puede observar que después de una hora la temperatura se logra estabilizar hasta obtener nuevamente los valores ideales, todo esto, a las 13:30 estando aún, dentro del rango de horas crítico de temperatura para las horas diurnas. En comparación a los días de la etapa uno, este día en particular, estuvo dentro de las condiciones ideales diez horas, pues el sistema de control tardó exactamente dos horas en estabilizar el sistema, cosa que no se logró en la etapa anterior.

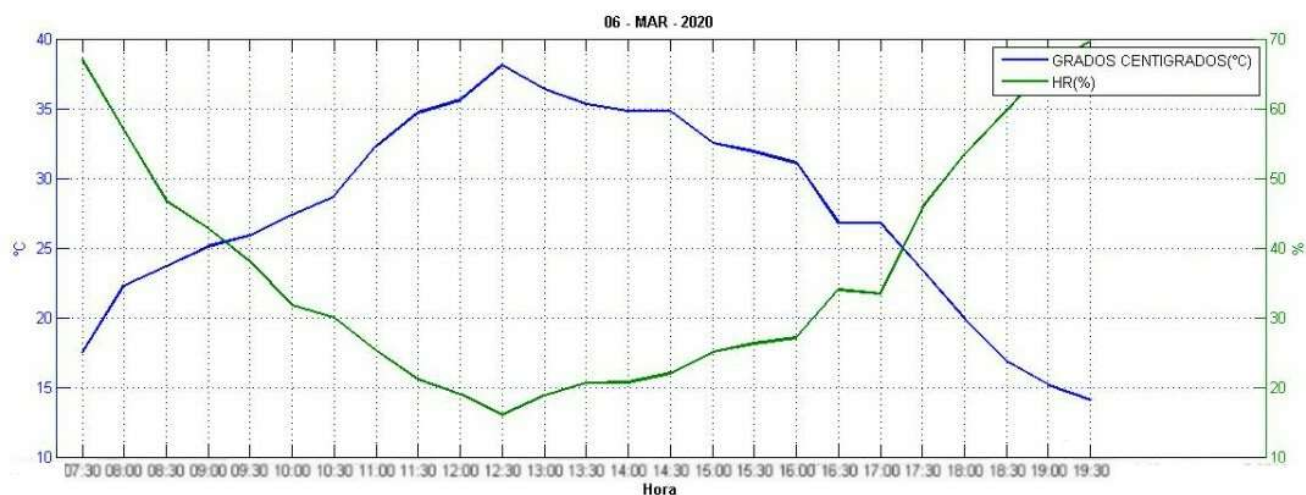


Fig. 4.4. Peor día del período 03/Mar/2020-15/Mar/2020 en horas diurnas

El 07 de marzo de 2020 se eligió como el “mejor día” para esta etapa, el cuál registró una temperatura máxima de 34.2°C con una humedad relativa, en este punto de 16.1%. Al observar la gráfica (Fig. 4.5), se puede apreciar el correcto funcionamiento del sistema de control manteniendo la temperatura máxima por debajo de 35°C durante la mayor parte del intervalo de horas donde se presentan las temperaturas más altas, las cuales son entre las 11:00 y las 15:00 hrs, manteniendo las condiciones de temperatura y humedad óptimas dentro del prototipo de invernadero para el crecimiento del cultivo de rábano, durante las horas diurnas.

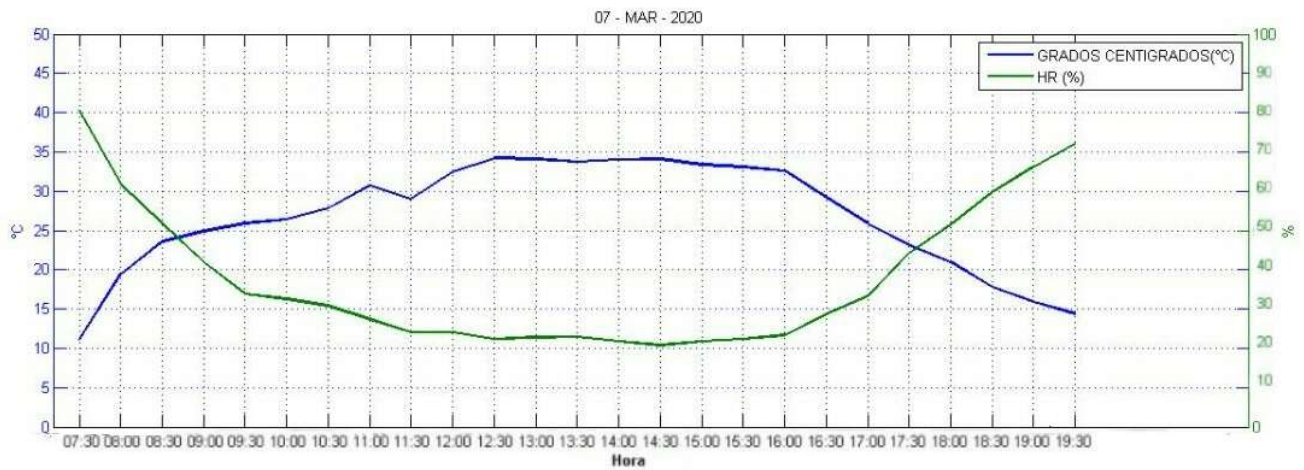


Fig. 4.5. Mejor día del período 03/Mar/2020-15/Mar/2020 en horas diurnas

4.2 Control de riego

El control de riego se hizo a través de electroválvulas, una por cada maceta, las cuales fueron colocadas en la parte trasera del invernadero y controladas por la plataforma Arduino, mientras que el monitoreo de la humedad de la tierra se realizó por medio de sensores de humedad de suelo HL-69, estos sensores se colocan en la tierra y utilizan la conductividad que existe en el suelo, la cual es proporcional a la cantidad de agua existente en la tierra. Se utilizaron 3 sensores de humedad, uno para cada maceta, colocados a la mitad de cada una.

Todos los datos de la humedad del suelo que se registraron durante la etapa de experimentación, fueron guardados en una memoria SD (mencionado anteriormente). Con la finalidad de proporcionar mayor diversidad en la captura de datos se utilizó el respaldo por medio de la tarjeta SD y la transmisión por IoT para el monitoreo en tiempo real de los parámetros de control del invernadero. El monitoreo de datos de la humedad se realizó cada hora, por lo que, al observar que las mediciones se mantenían constantes se decidió obtener el promedio de la humedad del suelo por día para cada maceta y proceder a graficar los datos obtenidos.

La humedad que el suelo debe tener para asegurar un buen crecimiento del cultivo, en este caso del rábano, debe estar entre el 60% y 80%. Las gráficas que se muestran a continuación, son el resultado de las mediciones tomadas durante un periodo de tiempo de aproximadamente 1 mes, iniciando el 11 de febrero del 2020 y concluyendo el 15 de marzo del 2020.

Los resultados obtenidos durante el tiempo que se estuvo sensando la humedad del suelo, fueron divididos en dos etapas, al igual que se hizo con el análisis de resultados del control de la temperatura y humedad relativa, en el cual se realizaron ajustes en las mediciones, para poder visualizar si existe alguna relación directa, específicamente entre la humedad del suelo y la temperatura.

La Fig. 4.6 muestra los datos registrados durante la primera etapa, correspondiente al periodo de tiempo de 14 días, es decir, desde el 11 al 24 de febrero del 2020. Se puede observar que durante este tiempo los sensores registraron porcentajes de humedad en el suelo entre 60% y 80%, dentro del rango óptimo para este requerimiento.

Pero también se observa que en el día 22 de febrero, dos de los sensores registraron datos por debajo de la humedad del suelo mínima requerida, de 45% para el sensor de la maceta con nombre R3 y de 33% para el sensor R1. Esto se debió al daño de los sensores; una vez que se revisaron se encontró que las pistas de cobre que recubren cada una de las baquelitas se desprendieron y algunas estaban llenas de sarro, causando que, se activaran las electroválvulas correspondientes para poder alcanzar las mediciones óptimas ya que los sensores registraron valores menores al 60% de humedad en la tierra. Este incidente ocasionó que los sensores dejarán de medir la humedad de la tierra de estas macetas y como resultado se inundaran. Se cambiaron estos sensores para continuar con el monitoreo de la humedad del suelo.

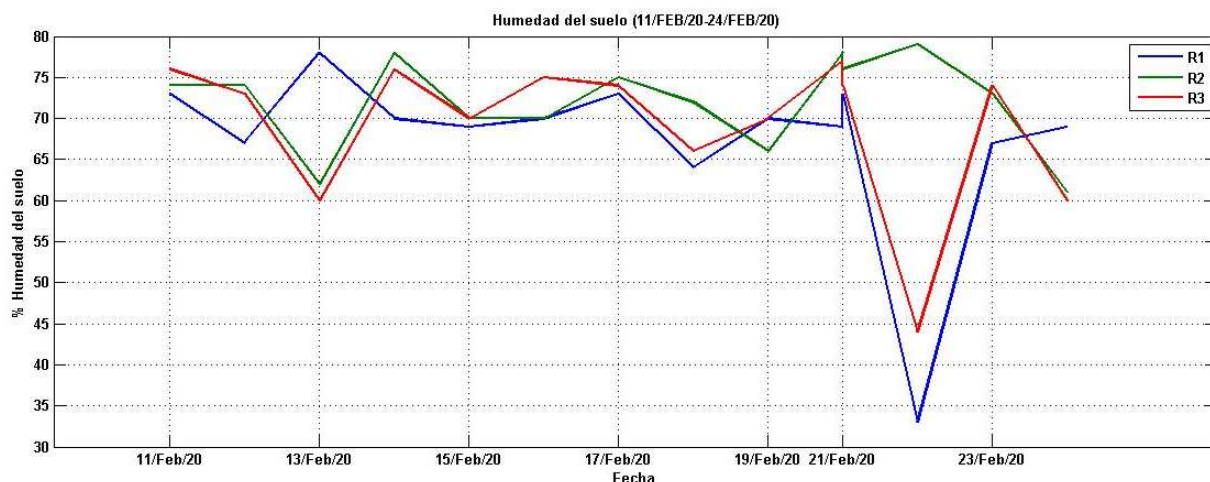


Fig. 4.6. Gráfica humedad del suelo del periodo 11/feb/2020 al 24/feb/ 2020

La gráfica que se muestra en la Fig. 4.7 contiene datos que fueron sensados entre el 03 al 15 de marzo del 2020 es decir, la segunda etapa, durante un periodo de 13 días y como se puede apreciar, el porcentaje de humedad en el suelo para los tres sensores se encuentra dentro del rango óptimo para el rábano, a excepción del último día, donde, los tres sensores registraron mediciones por debajo del 45%. Al revisarlos, nos encontramos con las mismas averías que sufrieron los sensores R1 y R2 en la etapa anterior.

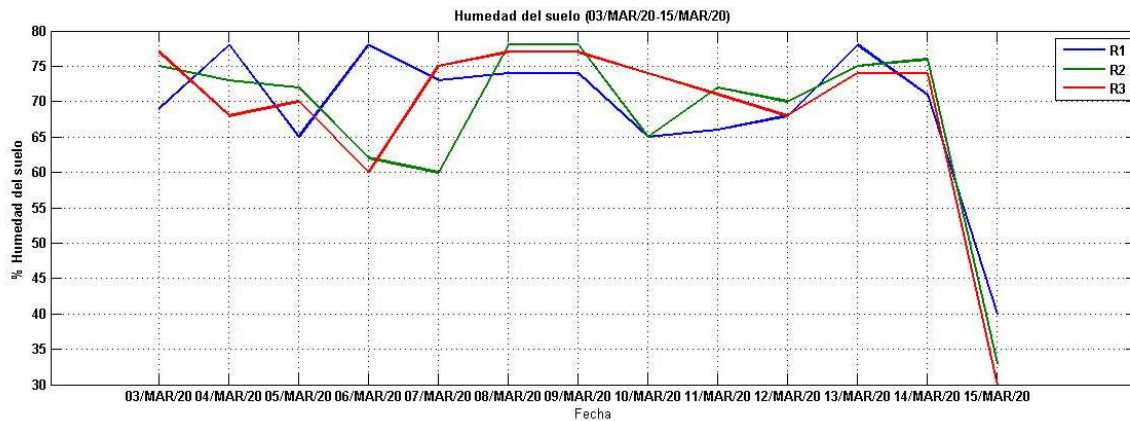


Fig. 4.7. Gráfica humedad del suelo del periodo 03/mar/2020 al 15/mar/ 2020

Al comparar las dos gráficas, se observó que estas averías en los sensores se registraron dentro de un rango de 12-13 días de cada periodo mostrado; en ambos casos las macetas se inundaron como resultado de que los sensores ya no enviaban la señal para desactivar las electroválvulas permaneciendo normalmente abiertas, debido a que los sensores dañados registraban porcentajes de humedad por debajo del 60%.

Durante las dos etapas mostradas, se puede observar que se mantuvo el porcentaje ideal de humedad del suelo para cada una de las macetas, comprobando que la temperatura no afectó directamente este parámetro.

4.3 Control de Luz

La activación de las luces se realizó mediante un control en cascada este tipo de control involucra, por lo menos, dos sistemas de control de retroalimentación y la salida de uno es el punto de ajuste para el otro, los cuales están ordenados uno dentro del otro.

El sistema de control principal involucra al módulo RTC DS3231 y el secundario a la fotorresistencia (Fig.4.8). La función del módulo RTC(J8) es proporcionar y mantener la información horaria en tiempo actual aun cuando el Arduino se encuentre sin energía eléctrica. Al tener configurado el módulo RTC se hizo uso de la librería de gestión de eventos “TimeAlarms” la cual facilita la programación para determinadas funciones con fecha y hora determinada. Esta acción se inicia a partir de las 19:00 hrs, hora en la que se lleva a cabo el evento nombrado “Encender luces”, dónde el sistema de control de luz es activado, el cual finaliza a las 23:00hrs con la indicación del evento “Apagar luces, esta operación se lleva a cabo durante todo el periodo que duró el ciclo vegetativo del rábano, es decir, aproximadamente 1 mes.

La función realizada durante el evento “Encender luces”, consiste en activar el relevador (RL5), para proporcionarle el control de las luminarias al fotorresistor.

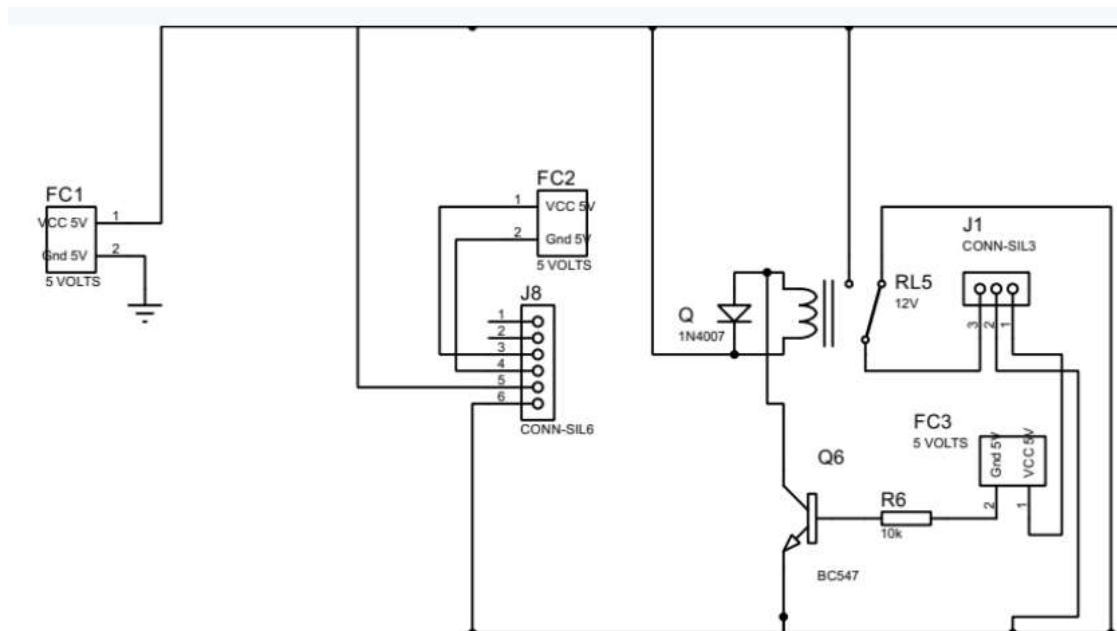


Fig. 4.8. Diagrama del circuito eléctrico utilizado para el control de luz

Estando activo el fotorresistor, se encarga de sensar la intensidad de luz que llega hacia el invernadero. El fotorresistor varía sus valores de resistencia dependiendo del nivel de luz detectado, pues es un dispositivo formado por un semiconductor, el cual al ser iluminado algunos de los fotones incidentes son absorbidos provocando una excitación en los electrones, en consecuencia, estos pasan a la banda de conducción generando una corriente eléctrica y como resultado disminuyen la resistencia del LDR, y viceversa (Fig. 4.9). El valor mínimo detectado por el fotorresistor para proceder a mandar la señal de control a través del relevador. al arreglo de luces LED fue de $750\text{ k}\Omega$. Con valores menores a éste, la iluminación permanece apagada.



Fig. 4.9. Sistema de iluminación encendido.

El relevador RL5 permanece activo hasta las 23:00 horas, ya que a esta hora se lleva a cabo el evento “Apagar luces”, el cual desactiva dicho relevador, que como se mencionó anteriormente es el encargado de activar el fotorresistor y proporcionarle el control de las luminarias, despojándolo de electricidad.

Como propósito de análisis y comparación del crecimiento y desarrollo del cultivo se tomaron la etapa inicial en el ciclo biológico de la planta, es decir, la germinación y la cosecha del producto. Se compararon las plantas obtenidas en cada maceta. En total fueron 4 macetas que se monitorearon en este trabajo. La ubicación de cada maceta se observa en la Fig. 4.10, tres de ellas fueron colocadas dentro del prototipo de invernadero con las condiciones necesarias para su buen desarrollo etiquetadas como: R1, R2 y R3, y la restante como RE se dejó a la intemperie, necesitando del cuidado de una persona.

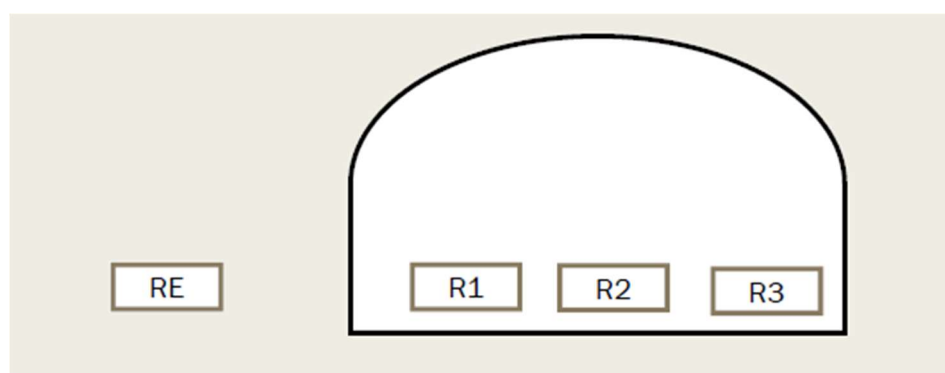


Fig. 4.10. Vista frontal del invernadero.

Durante el periodo de germinación de la semilla de rábano, el cuál según la bibliografía consultada va de los 7 a los 10 días después de ser plantada, se comparó el tiempo en el que comenzaron a brotar de la tierra las primeras plántulas, teniendo como resultado que, para el día 3, las semillas que fueron plantadas en las macetas que se encontraban dentro del invernadero (Fig. 4.11, 4.12, 4.13) comenzaban a brotar y mostrar sus primeras hojas, en cambio, las semillas de la maceta RE (Fig. 4.14), no mostraban indicios del comienzo de la evolución del embrión.



Fig. 4.11. Semillas germinadas de la maceta R1



Fig. 4.12. Semillas germinadas de la maceta R2



Fig. 4.13. Semillas germinadas de la maceta R3



Fig. 4.14. Semillas germinadas de la maceta RE

Durante el proceso de germinación, la semilla debe estar en un ambiente que cumpla las condiciones ideales para que el embrión crezca de manera correcta, dentro de estas condiciones, las más importantes son, la humedad del suelo y la temperatura, ya que estos factores contribuyen a ablandar el tegumento de la semilla provocando que, cuando el embrión se hinche, la cubierta de la semilla se rompa. Entonces, como se observa en las Fig. 4.11, 4.12 y 4.13, la semillas, al estar expuestas a una humedad ideal constante y una

temperatura óptima, su desarrollo ocurrió con mayor rapidez en comparación a las semillas de la maceta RE (Fig. 4.14) las cuales germinaron hasta el día 11.

En la Fig. 4.15 se muestra el desarrollo del rábano dos semanas después, se puede observar una diferencia notoria en cuanto al crecimiento del rábano.

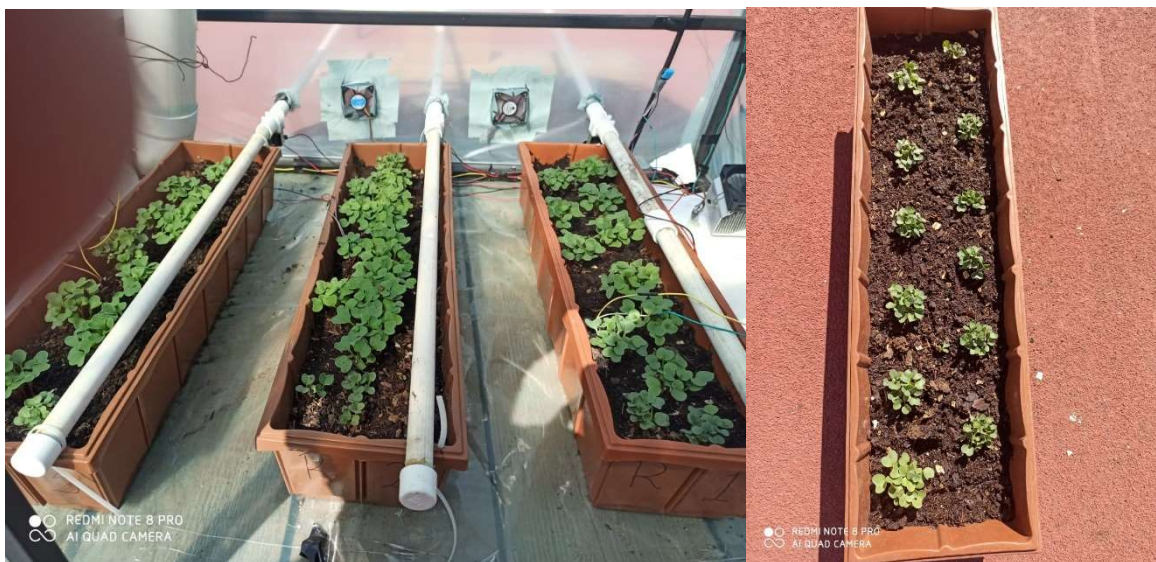


Fig. 4.15. Crecimiento del rábano dos semanas después de plantarlos. En la imagen izquierda se puede observar las macetas dentro del invernadero y del lado derecho la maceta exterior.

Al finalizar el tiempo requerido para el desarrollo del cultivo, de cada maceta, se tomaron 3 muestras de lugares específicos, (orillas y centro) como se muestra en la Fig. 4.16. Se puede observar, que las muestras pertenecientes a la maceta RE, tienen un tamaño inferior en sus hojas y raíces, comparadas con las muestras de las macetas que se encontraban dentro del invernadero.



Fig. 4.16. Comparación de producto final

El rectángulo azul que encierra a los rábanos tomados de la parte central de cada maceta muestra a las raíces con las mejores características físicas y de sabor, este resultado se atribuye al correcto sensado de la humedad del suelo dada la posición en la que se encuentra colocado el dispositivo; en cambio los rábanos situados dentro del rectángulo rojo son los que muestran las peores características, esto se atribuye a la poca humedad del suelo en esa zona provocada por el desnivel del piso, la cual no es posible monitorear por el sensor

La tabla 4.1 muestra las características físicas tales como peso, diámetro de la raíz y largo de los rábanos, donde se puede comparar de una manera cuantitativa lo descrito en el párrafo anterior. También se compara con la tabla de crecimiento de rábano (tabla 4.1a) publicada en un trabajo de investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en

Coahuila, México, titulado “Huerto Familiar Orgánico Bajo Condiciones de Campo Abierto en el Estado de Chiapas, donde se establece un huerto familiar al aire libre para la producción de distintos cultivos, entre ellos el rábano, se evaluó la germinación, el número de hojas, inicio de floración, de fructificación y cosecha (Juárez, 2011)

Tabla 4.1
Características físicas de las muestras de rábano

Muestra	Posición	Peso	Diámetro	Largo
RE	Izq	2,1 gr	4,9 cm	10,5 cm
	Enm	1,1 gr	3 cm	8,5 cm
	Derec	1,4 gr	3,1 cm	8 cm
R1	Izq	4,0 gr	5,4 cm	14,8 cm
	Enm	5,6 gr	6,3 cm	15,5 cm
	Der	3,7 gr	3,7 cm	13,7 cm
R2	Izq	8,5 gr	7,7 cm	15,9 cm
	Enm	7,1 gr	7,5 cm	18,6 cm
	Der	3,2 gr	3,2 cm	11,5 cm
R3	Izq	7,4 gr	7,9 cm	14,5 cm
	Enm	22,7 gr	10,7 cm	21,2 cm
	Der	0,7 gr	3,1 cm	12,7 cm

Tabla 4.1a
Fenología del rábano

Días	Semilla (mm)	Hojas (#)	Raíz Long (cm)	Tallo Long (cm)
1	3 mm	-	0,1	-
2	3,5 mm	-	0,3	-
3	3,5 mm	-	0,6	-
4	3,5 mm	-	1	0,25
5	-	2	1,5	0,3
6	-	2	1,52	0,38
7	Trasplante	2	1,7	0,48
8	-	2	2	0,55
9	-	2	2,3	0,7
10	-	2	2,6	0,85
11	-	2	2,9	1
12	-	2	3	1,3
13	-	2	3,1	1,42
14	-	2	3,3	1,68
15	-	2	3,4	1,8
16	-	2	3,7	2
17	-	2	3,9	2,1
18	-	2	4,1	2,3
19	-	3	4,4	2,8
20	-	3	4,55	3,3
21	-	3	4,8	3,8
22	-	3	4,95	4,2
23	-	3	5	4,6
24	-	3	5,3	5
25	-	3	5,8	5,7
26	-	3	5,95	6
27	-	3	6	6,2

La fig 4.17 muestra las características de siembra de la semilla de rábano dadas por el proveedor, así como el tiempo de germinación y de cosecha el cual, comparado con el obtenido en este trabajo, es mayor.



Fig. 4.7. Características dadas por el proveedor.

Como se puede observar los rábanos cultivados en el invernadero automatizado muestran mejores características físicas en comparación de los que son sembrados, comúnmente, al aire libre y cuidado de forma rudimentaria, demostrando así, que el uso de sistemas de control para el óptimo crecimiento y desarrollo de cualquier cultivo es totalmente efectivo.

Conclusiones

En este trabajo de investigación se logró diseñar y desarrollar de acuerdo a los requerimientos edafoclimáticos del rábano, un sistema de control ON-OFF que ayudó a obtener los parámetros de temperatura, humedad relativa, riego e iluminación artificial óptimos para el desarrollo del cultivo seleccionado, así como la implementación de IoT y la plataforma ThinkSpeak para el almacenamiento y monitoreo, de manera remota, de los datos de temperatura, así como la humedad relativa adquiridos por los sensores DHT11, además el

almacenamiento, a través de una memoria microSD, de los datos de la humedad del suelo. Se dimensionó y diseñó un sistema solar fotovoltaico aislado para el sustento energético del prototipo de invernadero.

En la etapa de control de temperatura y humedad relativa, se pudo ajustar e incorporar mecanismos que ayudaron a mantener estos parámetros dentro de un rango de valores entre un máximo y/o mínimo permitido para el crecimiento óptimo del cultivo.

Los sensores DHT11 utilizados para la etapa de control de temperatura, mostraron irregularidades en sus mediciones y funcionamiento cuando eran sometidos a temperaturas cercanas a los 45°, arrojando datos con un porcentaje de error mayor al proporcionado por el fabricante.

El sistema de riego implementado en este trabajo de tesis permitió la utilización óptima de agua, ya que, el promedio de este recurso utilizado por semana, fue de aproximadamente 35 litros para regar las tres macetas que se encontraban dentro del prototipo, manteniendo siempre la humedad adecuada de la tierra.

El tiempo de vida de los sensores HL-69, como se pudo comprobar con los datos obtenidos durante todo el periodo de crecimiento y desarrollo del rábano, es aproximadamente de 13-15 días, verificando que, al ser sometidos al agua potable, estos se oxidan o se desprende de ellos el cobre de sus terminales provocando un daño permanente al dispositivo.

La elección y utilización de la luz artificial tipo LED facilitó irradiar con la longitud de onda específica necesaria para estimular el crecimiento del tallo y las raíces de las plantas de rábano sembradas dentro del invernadero, ya que la luz azul y roja tienen un rango de onda de 400nm y 700 nm respectivamente perteneciente al rango del espectro visible donde las plantas llevan a cabo el proceso de fotosíntesis, como se mencionó anteriormente, esta región lleva por nombre Radiación Fotosintética Activa.

El uso de luces LED permite únicamente la estimulación del crecimiento de la planta sin alterar la temperatura presente en el interior del invernadero, disminuyendo notablemente el consumo de energía comparado con el uso de lámparas incandescentes, comúnmente de 100 watts, por ejemplo, durante el tiempo que se mantiene la iluminación encendida, se tendría un 615% más de consumo en comparación con el arreglo de luces LED.

Se concluye que la estructura implementada del prototipo de invernadero y el material utilizado para este proyecto de investigación es totalmente adecuado para mantener las condiciones óptimas para el cultivo de hortalizas, por lo que se puede implementar sin ningún problema en sitios donde predomine el clima frío.

El diseño empleado para el sistema de control y automatización en el prototipo desarrollado proporciona las bases y conocimientos necesarios para poder escalarlo, en el entendido de que se deben insertar elementos adecuados que nos permitan cumplir con los nuevos requerimientos de control para la obtención de los resultados deseados. Es posible mantener el uso de Arduino como microcontrolador, por ser una plataforma de fácil programación, amigable, económica y efectiva, capaz de ejecutar todas las tareas asignadas para la creación del microclima dentro del invernadero. De esta manera es factible que la implementación de este trabajo pueda llegar al sector agrícola o a personas que tengan el interés de cosechar sus propios cultivos. De igual forma, la implementación de un sistema solar fotovoltaico aislado que proporcione la energía necesaria para alimentar los elementos eléctricos y electrónicos que hacen posible el control de las variables climáticas dentro del invernadero le da un enfoque de alta tecnología y sustentabilidad a este prototipo.

Contar con una plataforma que ayude al almacenamiento de datos para conservar un historial del comportamiento del sistema, así como al monitoreo en tiempo real de los parámetros de manera remota, resulta útil para el operador, pues se puede observar el estado en el que se encuentra el microclima sin necesidad de tener una interacción directa con el prototipo de invernadero.

Recomendaciones

Dada la poca durabilidad de los sensores HL-69, se recomienda emplear sensores más robustos que soporten la degradación debida a la humedad para mantener el monitoreo sin interrupciones.

Si la temperatura que se busca dentro del invernadero es mucho menor a la que se consiguió en este trabajo. Se recomienda aumentar la altura de la estructura o utilizar un sistema de

enfriamiento por parte de las celdas Peltier, advirtiéndole que esto ocasionaría un aumento en el consumo eléctrico del invernadero.

Para el correcto monitoreo de humedad del suelo se recomienda el uso de al menos tres sensores de humedad en cada maceta y promediar sus mediciones para obtener una humedad uniforme, lo cual ayudará a obtener mejores cosechas.

Se debe mantener una conexión activa a Wi-Fi en el lugar donde estará instalado el invernadero o donde se encuentre el módulo ESP-01 para obtener todos los valores medidos por los sensores.

Bibliografía

- Agriculturers. (29 de Noviembre de 2019). *Agriculturers*. Obtenido de ¿Cómo influye la luz en el desarrollo de las plantas?: <https://agriculturers.com/como-influye-la-luz-en-el-desarrollo-de-las-plantas/>
- Alfaluz. (s.f.). *Pastilla Termoelectrica con Riel*. Obtenido de <http://www.alfaluz.com/.store/interruptores-termicos/1068-pastilla-termomagnetica-con-riel-.html>
- Allen, R. (2000). *Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated región as part of an evapotranspiration intercomparision study*. J. Hydrology.
- AOSONG. (24 de Diciembre de 2018). *DHT11 product manual*. Obtenido de http://www.omniblug.com/img/blog/dht11/DHT11_dataSheet.pdf
- Aprendiendo Arduino*. (29 de Junio de 2019). Recuperado el 13 de Agosto de 2019, de Programación Arduino: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/06/29/programacion-arduino/>
- Arauz, S. E. (2018). *Balance Energético de un invernadero a través de una red de sensores supervisada por una computadora de placa reducida*. CDMX.
- Ataruru. (14 de Marzo de 2019). *ARDUINO. SENSOR FOTOELÉCTRICO – KY-018. CÓMO MEDIR EL NIVEL DE LUZ CON UN SENSOR*. Obtenido de <https://www.altaruru.com/arduino-sensor-fotoelectrico-ky-018-como-medir-el-nivel-de-luz-con-un-sensor-ldr/>
- Atlas, G. S. (2017). *Global Solar Atlas*. Obtenido de <https://globalsolaratlas.info/map>
- AutoSolar. (19 de Abril de 2015). *¿Cómo calcular la capacidad en las baterías?* . Obtenido de <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/como-calcular-la-capacidad-de-las-baterias>
- Baille, A. (1986). *Oveview of greenhouse climate control in the mediterranean regions*. Agadir, Marruecos: Actes du Colloque d'Agadir.
- Baskin, C. a. (1998). *Seeds: ecology, biogeography, and, evolution of dormancy and germination*. San Diego, CA: Academic Press.
- BirthLH. (s.f.). *BirthLH*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2020, de ISF06 Diseño, dimensionado y selección de instalaciones fotovoltaicas aisladas: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ISF/ISF06/es_IEA_ISF06_Contentos/website_263_dimensionado_de_los_conductores_y_dispositivos_de_proteccion_para_el_proyecto.html#
- Bullerjahn, G. S. (1993). *The prochlorophytes: are they more than just chlorophyll a/b-containing cyanobacteria?* Recuperado el 24 de Marzo de 2019, de <http://dx.doi.org/10.3109/10408419309113522>.
- CANNA. (s.f.). *CANNA*. Recuperado el 23 de Enero de 2020, de Influencia de la temperatura ambiental en las plantas: http://www.canna.es/influencia_temperatura_ambiental_en_las_plantas

- Comisión Nacional del Agua. (Marzo de 2019). Recuperado el 23 de Mayo de 2019, de <https://www.gob.mx/conagua>
- Creativo, M. (s.f.). *Maker Creativo*. Obtenido de <https://www.makercreativo.com/store/producto/celda-peltier-tec1-12706/>
- Cultivos, H. (26 de Julio de 2017). *Principales tipos de invernaderos*. Obtenido de Horti Cultivos: <https://www.horticultivos.com/featured/principales-tipos-invernaderos/>
- Curiosidades. (s.f.). *Cómo Funciona un LDR o Fotorresistor*. Obtenido de <https://curiosidades.top/como-funciona-un-ldr/>
- D. Valera, F. M. (2008). *Ahorro y eficiencia energética en invernaderos*. Universidad de Almería. España: Departamento de Biomasa del CENER.
- David, L. (2018). *The Grid Beta*. Obtenido de Principales tipos de inversores: <https://thegrid.rexel.com/en-us/knowledge/electricista-wiki-espanol/w/wiki/816/principales-tipos-de-inversores-para-sistemas-solares-fotovoltaicos>
- Díaz, P. (2003). *Confiabilidad de los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos: Aplicación a la electrificación rural*. Madrid.
- Diego L. Valera, F. D. (2008). *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos*. Madrid.
- Distribuidora, D. (s.f.). Obtenido de <https://dymdistribuidora.wixsite.com/website-1/pagina-del-producto/sensor-de-humedad-de-tierra-hl-69>
- Eficiente, A. (8 de Marzo de 2014). *RADIACIÓN DIRECTA, DIFUSA Y REFLEJADA*. Obtenido de <https://pedrojhernandez.com/2014/03/08/radiacion-directa-difusa-y-reflejada/>
- Electrotecnia, O. M. (25 de Febrero de 2019). *Relés*. Obtenido de <http://osmisteriosdaelectrotecnia.blogspot.com/2019/02/reles.html>
- Enoch de Santiago Rojas, F. R. (2013). *Solar Automated Greenhouse*. San Luis Potosí.
- Enoch de Santiago Rojas, J. I. (30 de Agosto de 2013). *Solar Automated Greenhouse*. San Luis Potosí.
- Estremera, D. M. (s.f.). *El color*.
- Faxsa. (s.f.). Recuperado el 23 de Marzo de 2019, de <http://www.faxsa.com.mx/semhort1/c60ra001.htm>
- Faxsa. (s.f.). *Rábano*. Obtenido de <http://www.faxsa.com.mx/semhort1/c60ra001.htm#:~:text=El%20r%C3%A1bano%20es%20propio%20de,oscilar%20entre%20los%2018%2D20%C2%BAC>.
- Flores, C. B. (1997). *Invitación a la Biología*. Uruguay: Editorial Médica Panamericana.
- G, I. J. (Julio de 2020). *Instituto Técnico Superior de Electricidad*. Obtenido de [https://itc.edu.py/Clase%20II%20de%20EQUIPO%20SOLAR%20T%C3%89RMICO%20Ejemplo%20pr%C3%A1ctico%20\(z\).pdf](https://itc.edu.py/Clase%20II%20de%20EQUIPO%20SOLAR%20T%C3%89RMICO%20Ejemplo%20pr%C3%A1ctico%20(z).pdf)

- G. Papadakis, A. F. (1992). *Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover*. J. Agric. Engng Res.
- García, E. B. (2014). *Invernadero Inteligente*. Ciudad de México.
- GmbH, W. K.-&. (s.f.). *Safe Travels*. Obtenido de Image Vienna: <https://www.imagevienna.com/es/inicio.html>
- Google. (s.f.). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com.mx/maps/place/Facultad+de+Ciencias+de+la+Electr%C3%B3nica/@19.0025621,-98.2043731,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x85cfbf5ef8acadcb:0x824733b6d98d646d!8m2!3d19.002557!4d-98.2021844>
- greenhouses, N. P. (s.f.). *Agricultura Ecológica*. Recuperado el 16 de Enero de 2020, de https://www.infoagro.com/hortalizas/materiales_cubierta_invernaderos.htm
- Hardwarelibre. (s.f.). *Transistor BC547: todo lo que necesitas saber*. Obtenido de <https://www.hwlibre.com/transistor-bc547/>
- Hernández, L. (13 de Diciembre de 2010). *Ciencia Online*. Obtenido de El aire caliente no sube, es el frío el que baja: <https://www.cienciaonline.com/2010/12/13/el-aire-caliente-no-subes-el-frio-el-que-baja/>
- Hernández, L. d. (23 de Marzo de 2018). *Escoger el mejor sensor de temperatura para Arduino*. Obtenido de https://programarfácil.com/podcast/82-escoger-mejor-sensor-temperatura-arduino/?fbclid=IwAR1UU_ELb8BKlAGT5UGj6pPMHiXFhNpJDCg1XRKcNCOSSm3oiLLVnQ9pEw
- Hernández, L. d. (2018). *ProgramarFácil*. Recuperado el 12 de Enero de 2020, de ESP8266 todo lo que necesitas saber del módulo WiFi para Arduino: <https://programarfácil.com/podcast/esp8266-wifi-coste-arduino/>
- Hidroponía, C. (11 de Enero de 2017). *Conoce Hidroponía*. Obtenido de INVERNADERO TIPO VENLO, ¿CUÁLES SON SUS CARACTERÍSTICAS?: <https://hidroponia.mx/invernadero-tipo-venlo-cuales-son-sus-caracteristicas/>
- Hontoria, J. A. (s.f.). Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. Jaén, España.
- Hyperphysics. (s.f.). *Hyperphysics*. Recuperado el 13 de Julio de 2019, de Espectro electromagnético: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/ems1.html>
- iluminet. (25 de Octubre de 2016). *¿Cómo funcionan las celdas fotovoltaicas?*. Obtenido de <https://www.iluminet.com/funcionamiento-paneles-fotovoltaicos-energia-solar/>
- INVENTABLE. (9 de Julio de 2017). *El Transistor BC548*. Obtenido de <https://www.inventable.eu/2017/07/09/transistor-bc548/>
- Inventable. La electrónica simple y cara*. (Noviembre de 2013). Recuperado el 12 de Marzo de 2019, de Como controlar un relé con un transistor: <https://www.inventable.eu/controlar-rele-con->

transistor/?fbclid=IwAR0ApgAFaWEq5IpiSKhyJYD3xLx05Ra3G_i9u0MQevhZh5pvPcADfz29
Gmo

- J. Doorenbos, W. P. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. Roma: FAO Irrigation and Drainage Paper 24.
- J., W. (1965). *Predicting temperature in ventilated greenhouses*. Transactions of the ASAE.
- Javier Belmonte Sánchez, Z. G. (24 de Aril de 2017). *Mi Periodico Digital*. Obtenido de <http://www.miperiodicodigital.com/2017/grupos/carraschoy-36/invernadero-automatizado-energia-renovable-330.html>
- Juárez, L. A. (2011). *HUERTO FAMILIAR ÓRGANICO BAJO CONDICIONES DE CAMPO ABIERTO EN EL ESTADO DE CHIAPAS*. Coahuila, México.
- Lazada. (s.f.). Obtenido de <https://www.lazada.vn/products/tphcm-module-cam-bien-nhiet-do-do-am-dht11-i249169723.html>
- Led, S. G. (2019). *HOW TO GROW ORCHIDS INDOORS WITH FULL SPECTRUM LED GROW LIGHTS*.
- Lincoln Zotarelli, M. D. (2019). *Interpretación del Contenido de la Humedad del Suelo para Determinar Capacidad de Campo y Evitar Riego Excesivo en Suelos Arenosos Utilizando Sensores de Humedad*. Florida.
- Liotta, M. (24 de Diciembre de 2018). *Manual de capacitación. Riego por goteo*. Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_manual_riego_por_goteo.pdf
- Llamas, L. (16 de Octubre de 2016). *LEER Y ESCRIBIR EN UNA TARJETA SD O MICRO SD CON ARDUINO*. Obtenido de <https://www.luisllamas.es/tarjeta-micro-sd-arduino/>
- Llamas, L. (19 de Enero de 2016). *Medir la Humedad del Suelo*. Obtenido de <https://www.luisllamas.es/arduino-humedad-suelo-fc-28/>
- Llamas, L. (18 de Octubre de 2016). *RELOJ Y CALENDARIO EN ARDUINO CON LOS RTC DS1307 Y DS3231*. Obtenido de <https://www.luisllamas.es/reloj-y- calendario-en-arduino-con-los-rtc-ds1307-y-ds3231/>
- Llamas, L. (29 de Julio de 2019). *Generar frío con Arduino y un placa Peltier*. Obtenido de <https://www.luisllamas.es/arduino-peltier/>
- Lopez, J. C. (5 de Octubre de 2018). *Pro-Mix*. Recuperado el 24 de Marzo de 2019, de La influencia de la luz en el crecimiento del cultivo: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-influencia-de-la-luz-en-el-crecimiento-del-cultivo/>
- Lorenzo, J. A. (s.f.). *Sun Fields Europe*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2020, de ¿Cómo calcular la sección de conductores para instalaciones de paneles solares?: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/calculo-seccion-de-cable-para-paneles-solares/>
- Luiten. (s.f.). *Luiten Greenhouses*. Obtenido de <https://www.luiten-greenhouses.com/de/produktionsgewachshauser/breitschiff-gewachshaus/>

- M. Donatelli, G. B. (2006). *Sharing knowledge via software components: models on reference evapotranspiration*. European Journal of Agronomy.
- M. Donatelli, G. B. (2006). *Sharing knowledge via software components: models on reference evapotranspiration*. European Journal of Agronomy.
- M. Jensen, R. B. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. . New York.: American Society of Civil Engineers. .
- M. Ožbolt, A. K. (2014). *Electrocaloric refrigeration: Thermodynamics, state of the art and future perspectives*. (Vol. 91).
- Mercedes Ballesteros Perdices, M. d. (2008). *Fuentes de energía para el futuro*. España.
- Mersen. (s.f.). *HP10M30*. Obtenido de <https://ep-us.mersen.com/es/products/product/hp10m30>
- Mieg, S. T. (Abril de 2006). *Técnica Industrial*. Recuperado el 23 de Octubre de 2019, de Termoelectricidad, la energía del desequilibrio: <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/22/41/a41.pdf>
- Moderna, A. (20 de Agosto de 2018). *En auge, la agricultura protegida en México*. Obtenido de Hablemos de campo: <https://www.hablemosdelcampo.com/en-auge-la-agricultura-protegida-en-mexico/>
- Moreno, L. P. (2009). Plant responses to water deficit stress. *Agronomía Colombiana*, 179-191.
- Nájera, A. R. (2017). *Diseño de un sistema de instrumentación y medición para los parámetros físicos de un módulo de invernadero*. Hidalgo.
- NASA. (s.f.). *POWER Single Point Data Access*. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- News, A. (28 de Mayo de 2018). *Grupo Sacsa*. Recuperado el 14 de Enero de 2020, de <http://www.gruposacsa.com.mx/humedad-del-suelo-se-comporta-importancia/>
- Nicola, S. T. (2009). *Fresh-cut Produce Quality: Implications for a Systems Approach*. Academic Press.
- Notch, A. T. (s.f.). *SENSOR DIGITAL DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DHT11*. Obtenido de <https://alltopnotch.co.uk/product/dht11-digital-humidity-temperature-sensor-ntc-thermal-arduino-pi-pic-arm/>
- Novetec, S. (s.f.). *BATERIA 12V HOPPECKE 7OPZS490*. Obtenido de <https://novetec.com.webnode.es/p/bateria-12v-hoppecke-7opzs490/>
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. A Simon & Schuster Company.
- Ortega, L. P. (2019). *Agricultura Protegida en México*.
- Parra, J. C. (2006). *Publicaciones Cajamar*. Obtenido de Evolución de las estructuras de invernadero: <http://www.publicacionescajamar.es/pdf/series-tematicas/centros-experimentales-las-palmerillas/evolucion-de-las-estructuras.pdf>

- Paul W. Stackhouse, J. P. (s.f.). *POWER Data Access Viewer*. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Pesquera, S. d. (07 de Mayo de 2018). *En 2017 México exportó 37 mil 571 toneladas de rábano*. Obtenido de <https://www.gob.mx/siap/es/articulos/en-2017-mexico-exporto-37-mil-571-toneladas-de-rabano?idiom=es>
- Prometec. (s.f.). *Arduino y los Relés*. Obtenido de <https://www.prometec.net/relés/>
- Purves, W. S. (2004). *Photosynthesis: energy from the sun* (7° ed.). MA: Sinauer Associates, Inc.
- Quiroz, E. P. (2006). *Estimación de la irradiancia solar total extraterrestre en función del número de manchas solares*.
- R. Allen, L. P. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- RASHID, V. H. (s.f.). *Electronica de potencia*.
- Reece, J. B. (2011). *Photosynthesis*. San Francisco, CA: Pearson, 193.
- Rezende, T. (1 de Junio de 2016). *Tecnología Rezende*. Obtenido de Sensores y Actuadores Domésticos: <http://tecnoguillepereira.blogspot.com/2016/06/sensores-y-actuadores-domesticos.html>
- Rizo, E. (6 de Julio de 2015). *Agricultura, evolución y éxito en México*. Recuperado el 24 de Diciembre de 2018, de <https://www.inforural.com.mx/agricultura-prottegida-evolucion-y-exito-en-mexico/>
- Rizo, E. (21 de Agosto de 2018). *Inforural*. Recuperado el 4 de Marzo de 2019, de Agricultura protegida, evolución y éxito en Mexico.: <https://www.inforural.com.mx/agricultura-prottegida-evolucion-y-exito-en-mexico/>
- Robaina, G. C. (2018). *Estimación del agua disponible para las plantas en suelos cubanos en función de la textura predominante*. La Habana: RCTA.
- Sánchez, E. A. (3 de Marzo de 2020). *ThinkSpeak*. Obtenido de Invernadero: https://thingspeak.com/channels/968357/private_show
- SanDoRobotics. (s.f.). *Módulo WIFI ESP8266 ESP-01*. Obtenido de <https://sandorobotics.com/producto/hr0307/>
- Sandoval, A. E. (2010). *Construcción de sistemas de enfriamiento*. Huajuapán de León, México.
- Santos, M. Q. (2017). *Interaction of Compounds*.
- Selvin, S. S. (2018). *A Step Towards Smart Ration Card System Using RFID & IoT*. Mumbai, India: IEEE.
- Serna, M. C. (s.f.). *Introducción a la refrigeración termoeléctrica o efecto Peltier*.
- Serrano, R. (18 de Agosto de 2017). *Tritec Intervento*. Obtenido de Tipos de paneles fotovoltaicos: <https://tritec-intervento.cl/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>

- Solar, E. (s.f.). *Controlador Ep Solar PWM p/Bateria con pantalla 30A 12/24V AU*. Obtenido de <https://www.exelsolar.com/Productos/Detalle/CONEPS1S151>
- Style, O. (2012). *Energía Solar Autónoma*. ITACA.
- SUBFIELDS. (s.f.). *Equipos solares: Regulador-Controlador de Carga*. Obtenido de <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/equipos-solares-regulador-controlador-de-carga/>
- Swibank, S. (1963). *Long-wave radiation from clear skies*. T. Royal Meteorology Society.
- T. Boulard, A. B. (1995). *Modelling of air Exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents*. Agric.
- Tarascó, D. D. (s.f.). *Efecto termoeléctrico. Descripción y aplicación*.
- Technology, E. (s.f.). *Different Types Of Relays, Their Construction, Operation & Applications*. Obtenido de <https://www.electricaltechnology.org/2018/12/what-is-relay-different-types-of-relays-its-operation-applications.html>
- Técnica, T. (s.f.). *Tecnología Técnica*. Obtenido de Sistemas Electrónicos: http://www.tecnologia-tecnica.com.ar/sistemaselectronicos/indexsistemaelectronicos_archivos/Page362.htm
- Tecnosolab. (s.f.). *Blog Tecnosol*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2020, de Instalación solar aislada: CÁLCULO DE LA SECCIÓN DECABLE: <https://tecnosolab.com/noticias/instalacion-solar-aislada-seccion-cable/?fbclid=IwAR0B6qx8MncgVeZTcb8xksdB1Aau07fvedYrwcWO65OxYWYDKNiHvosb7-4>
- Tetens, V. (1930). *Über einige meteorologische*. Zeitschrift für geophysic.
- Trejo, N. S. (1 de Octubre de 2013). *4vientos*. Obtenido de Los invernaderos, en plena expansión en México, ¿son la solución agrícola ante el rigor climático?: <http://www.4vientos.net/2013/10/01/los-invernaderos-en-plena-expansion-en-mexico-son-la-solucion-agricola-ante-el-rigor-climatico/>
- Urritia, M. I. (2004). *Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica*. Madrid: Ministerio de ciencia y tecnología: Ciemat.
- Villajulca, J. C. (18 de Junio de 2019). *CURSO CONTROL PID PRÁCTICO*. Obtenido de Control ON/OFF o Todo/Nada: <https://instrumentacionycontrol.net/control-on-off-o-todo-nada/>
- Woods, M. (1996). *Glass Houses: A History of Greenhouses, Orangeries and Conservatories*. United States: Aurum Pr Ltd.
- Xemphimtap. (s.f.). Obtenido de https://www.xemphimtap.com/channel?id=UCiYeWMMUA0r0tV7e_vQ-8FA
- Yumpu. (s.f.). *Sunmodule SW 130/135/140 poly R6A - SolarWorld*. Obtenido de <https://www.yumpu.com/en/document/view/34015930/sunmodule-sw-130-135-140-poly-r6a-data-sheet-solarworld>

Yun Kong, Y. Z. (23 de October de 2018). Variation of phenotypic responses to lighting using a combination of red and blue light-emitting diodes versus darkness in seedlings of 18 vegetable genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*, 159-172.

Anexos

Anexo 1. Código de programación en Arduino

//Librerías

```
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
#include <Time.h>
#include <TimeAlarms.h>
#include <DS1307RTC.h>
#include "DHT.h"

#define SSID "TP-LINK_7D0E84"
#define PASS "81266579"
#define IP "184.106.153.149"
#define SSpin 28

#include <LiquidCrystal.h>

String GET_TEMP = "GET
/update?key=FA0RZE4K0TZU2YW4&field
1="; //Campo de temperatura
String GET_HUM = "GET
/update?key=FA0RZE4K0TZU2YW4&field
2="; //Campo de humedad
DHT dht1 (2, DHT11);
DHT dht2 (3, DHT11);
LiquidCrystal lcd(7, 23, 24, 25, 26, 27);
File myFile;
RTC_DS3231 rtc;

int cal=4;
int vent = 8;
int vent_celda=9;
int elect1 = 10;
int elect2 = 34;
int elect3 = 35;
int luz = 32;
int pinLDR = A0;
int valorLDR = 0;
int alimentacion = 11;
const int sensorPin1 = A1;
const int sensorPin2 = A2;
const int sensorPin3 = A3;
String daysOfTheWeek[7] = { "Domingo",
"Lunes", "Martes", "Miercoles", "Jueves",
"Viernes", "Sabado" };
String monthsNames[12] = { "Enero",
"Febrero", "Marzo", "Abril", "Mayo",
"Junio",
"Julio", "Agosto", "Septiembre", "Octubre", "N
oviembre", "Diciembre" };

void setup ()
{
```

```

Serial.begin(115200);
Serial.println("ATr");
{
while (!Serial);
Serial.print("Initializing SD card...");
if (!SD.begin()) {
  Serial.println("initialization failed!");
  return;
}
Serial.println("initialization done.");
delay(2000);
}
dht1.begin();
dht2.begin();
lcd.begin(20,4);
lcd.print("T=   H=");
pinMode(cal,OUTPUT);
pinMode(vent,OUTPUT);
pinMode(vent_celda,OUTPUT);
pinMode(elect1,OUTPUT);
pinMode(elect2,OUTPUT);
pinMode(elect3,OUTPUT);
pinMode(alimentacion, OUTPUT);
pinMode(luz,OUTPUT);
digitalWrite(cal,LOW);
digitalWrite(vent,LOW);
digitalWrite(vent_celda,LOW );
digitalWrite(elect1,LOW);
digitalWrite(elect2,LOW);
digitalWrite(elect2,LOW);

```

```

digitalWrite(alimentacion, LOW);
{
delay(1000);
setSyncProvider(RTC.get());
if (!rtc.begin()) {
  Serial.println(F("error"));
  while (1);
}
}

// Si se ha perdido la corriente, fijar fecha y
hora
if (rtc.lostPower()) {

// Fijar a fecha y hora de compilacion
  rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__),
F(__TIME__)));
}

Alarm.alarmRepeat(19, 00, 00,
EventoEnciendeLuz); // Evento a las 19:00
diario (enciende luz)

Alarm.alarmRepeat(23, 00, 00,
EventoApagaLuz); // Evento a las 23:00
diario (apaga luz)

delay(5000);
if(Serial.find("OK")){
  connectWiFi();
}
}

void printDate(DateTime date)
{
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("F:");

```

```

lcd.setCursor(2,1);
lcd.print(date.year(), DEC);
lcd.print('/');
lcd.print(date.month(), DEC);
lcd.print('/');
lcd.print(date.day(), DEC);
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("H:");
lcd.setCursor(2,2);
lcd.print(date.hour(), DEC);
lcd.print(':');
lcd.print(date.minute(), DEC);
lcd.print(':');
lcd.print(date.second(), DEC);
lcd.println();
Serial.print(date.year(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(date.month(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(date.day(), DEC);
Serial.print(" ");

Serial.print(daysOfTheWeek[date.dayOfThe
Week()]);
Serial.print(" ");
Serial.print(date.hour(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(date.minute(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(date.second(), DEC);
Serial.println();
}
void loop()
{
delay (5000);
float h1 = dht1.readHumidity();
float t1 = dht1.readTemperature();
float h2 = dht2.readHumidity(); // Leer
humedad
float t2 = dht2.readTemperature(); // Leer
temperatura

float hTotal = (h1+h2)/2;
float tTotal = (t1+t2)/2;
if (isnan(hTotal) || isnan(tTotal)) {
return;
}
// Imprimir resultados al monitor serial
lcd.setCursor(2,0);
lcd.print(tTotal);
lcd.print("C");
lcd.setCursor(12,0);
lcd.print(hTotal);
lcd.print("%");

if(tTotal>=18 && tTotal<=35){
//Pregunta si la temperatura es mayor o igual
que 18 grados y menor o igual que 35 grados
//digitalWrite(IN3_ enf,LOW); // apaga
enfriar
//digitalWrite(IN4_ cal,LOW); // apaga
calentar
digitalWrite (cal,LOW);
digitalWrite(vent,LOW); // apaga
ventilador
}
}

```

```

    digitalWrite(vent_celda,LOW); // apaga
    ventilador celda
}
if(tTotal >35){ // pregunta si la
    temperatura es mayor a 35 grados centigrados
    digitalWrite(vent,HIGH); // enciende
    ventiladores
    digitalWrite (cal,LOW);
    digitalWrite(vent_celda,LOW);
}
if(tTotal <7){ // pregunta si la
    temperatura es menor o igual a 9 grados
    centígrados
    digitalWrite(IN4_cal,HIGH); // enciende
    calentar
    digitalWrite(cal,HIGH);
    digitalWrite(vent_celda,HIGH); //
    enciende ventiladores
    delay(10000);
}
{
int humedad1 = analogRead(sensorPin1);
Serial.print("La lectura del sensor 1 : ");
Serial.println(humedad1);

int lecturaPorcentaje1=map(humedad1,
1023, 0, 0, 100);

    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("R1=");
    lcd.setCursor(2,3);
    lcd.print(lecturaPorcentaje1);
    lcd.print("%");
    delay(10000);
}

```

```

    if (isnan(humedad1) ||
    isnan(lecturaPorcentaje1)) {
        Serial.println("Falla al leer el sensor 1!");
        return;
    }

    if(lecturaPorcentaje1>=60 &&
    lecturaPorcentaje1<=80){ // Pregunta si la
    humedad del suelo es mayor o igual que 60%
    y menor o igual que 80%
        digitalWrite(elect1,LOW);
        // Desactiva la electroválvula.
    }

    if (lecturaPorcentaje1<60){
        // Pregunta si la humedad del suelo es menor
        que el 20%
        digitalWrite(elect1,HIGH); //
        Activa la electroválvula
    }

    if (lecturaPorcentaje1>80){
        // Pregunta si la humedad del suelo es mayor
        que 80%
        digitalWrite(elect1,LOW);
        // Desactiva la electroválvula
    }
}

{
int humedad2 = analogRead(sensorPin2);
    Serial.print("La lectura del sensor 2 : ");
    Serial.println(humedad2);

    int lecturaPorcentaje2=map(humedad2,
    1023, 0, 0, 100);
    lcd.setCursor(7,3);
}

```

```

lcd.print("R2=");
lcd.setCursor(9,3);
lcd.print(lecturaPorcentaje2);
lcd.print("%");
delay(10000);
if (isnan(humedad2) ||
isnan(lecturaPorcentaje2)) {
Serial.println("Falla al leer el sensor 2!");
return;
}
if(lecturaPorcentaje2>=60 &&
lecturaPorcentaje2<=80){ // Pregunta si la
humedad del suelo es mayor o igual que 60%
y menor o igual que 80%
digitalWrite(elect2,LOW); //
Desactiva la electroválvula.
}
if (lecturaPorcentaje2<60){
// Pregunta si la humedad del suelo es menor
que el 60%
digitalWrite(elect2,HIGH); //
Activa la electroválvula
}
if (lecturaPorcentaje2>80){
// Pregunta si la humedad del suelo es mayor
que 80%
digitalWrite(elect2,LOW); //
Desactiva la electroválvula
}
}
{
int humedad3 = analogRead(sensorPin3);
Serial.print("La lectura del sensor 3 : ");
Serial.println(humedad3);
int lecturaPorcentaje3=map(humedad3,
1023, 0, 0, 100);
lcd.setCursor(14,3);
lcd.print("R3=");
lcd.setCursor(16,3);
lcd.print(lecturaPorcentaje3);
lcd.print("%");
delay(10000);
if (isnan(humedad3) ||
isnan(lecturaPorcentaje3)) {
Serial.println("Falla al leer el sensor 3!");
return;
}
if(lecturaPorcentaje3>=60 &&
lecturaPorcentaje3<=80){ // Pregunta si la
humedad del suelo es mayor o igual que 60%
y menor o igual que 80%
digitalWrite(elect3,LOW);
// Desactiva la electroválvula.
}
if (lecturaPorcentaje3<60){
// Pregunta si la humedad del suelo es menor
que el 60%
digitalWrite(elect3,HIGH); //
Activa la electroválvula
}
if (lecturaPorcentaje3>80){
// Pregunta si la humedad del suelo es mayor
que 80%
digitalWrite(elect3,LOW); //
Desactiva la electroválvula
}
}
}

```

```

}
}
{
{
valorLDR = analogRead(pinLDR);
int lecturaLUZLDR=map(valorLDR, 1023, 0,
0, 100);
if (valorLDR > 750) {
digitalWrite(luz, HIGH);
}
else {
digitalWrite(luz, LOW);
}
delay(100);

Alarm.delay(1000);
}

DateTime now = rtc.now();
printDate(now);
}
{
myFile = SD.open("DATOS4.txt" ,
FILE_WRITE);
if (myFile) {
int humedad1 = analogRead(sensorPin1);
int lecturaPorcentaje1=map(humedad1,
1023, 0, 0, 100);

int humedad2 = analogRead(sensorPin2);
int lecturaPorcentaje2=map(humedad2,
1023, 0, 0, 100);

```

```

int humedad3 = analogRead(sensorPin3);
int lecturaPorcentaje3=map(humedad3,
1023, 0, 0, 100);

Serial.print("Escribir SD; ");
myFile.print("Humedad: ");
myFile.print(hTotal);
myFile.print(" % ");
myFile.print("Temperatura: ");
myFile.print(tTotal);
myFile.print(" *C");
myFile.print("R1: ");
myFile.print(lecturaPorcentaje1);
myFile.print(" % ");
myFile.print("R2: ");
myFile.print(lecturaPorcentaje2);
myFile.print(" % ");
myFile.print("R3: ");
myFile.print(lecturaPorcentaje3);
myFile.println(" % ");
myFile.close();

}else {
Serial.println("Error al arir archivo");
}

delay(100);
}

char bufferTemp[8]; //Crear buffer temporal
para convertir float a string
String temperatura = dtostrf(tTotal, 4, 1,
bufferTemp); //Convertir de float a String 8 =

```

longitud de String, 3 = número de decimales.
(e.g. 1234.567)

```
updateTemp(temperatura); //Actualizar
temperatura
```

```
char bufferHum[8]; //Crear buffer temporal
para convertir float a string
```

```
String humedad = dtostrf(hTotal, 4, 1,
bufferHum); //Convertir de float a string 8 =
longitud de String, 3 = número de decimales.
(e.g. 1234.567)
```

```
updateHumedad(humedad); //Actualizar
humedad
```

```
delay(40000);
```

```
}
```

```
void EventoEnciendeLuz()
```

```
{
```

```
Serial.println("Encendiendo Luz!!!");
```

```
digitalWrite(alimentacion, HIGH);
```

```
}
```

//Función que desactiva el relevador (apaga la luz)

```
void EventoApagaLuz()
```

```
{
```

```
Serial.println("Apagando Luz!!!");
```

```
digitalWrite(alimentacion, LOW);
```

```
}
```

//Funciones para la impresión del reloj al monitor serial de Arduino

```
void updateTemp(String temp){
```

```
String cmd = "AT+CIPSTART=\"TCP\",\";
```

```
//Crear el comando para comenzar una
conexión TCP
```

```
cmd += IP; //IP del sitio a conectarse
(thingspeak.com)
```

```
cmd += "\",80"; //Puerto (80)
```

```
Serial.println(cmd); //Crear conexión
```

```
delay(2000);
```

```
if(Serial.find("ERROR")){
```

```
return; //No se pudo conectar
```

```
}
```

```
cmd = GET_TEMP; //Crear datos a enviar
```

```
cmd += temp; //Agregar la temperatura leída
```

```
cmd += "\r\n";
```

```
Serial.print("AT+CIPSEND="); //Indicar
cuantos datos se enviarán por TCP
```

```
Serial.println(cmd.length()); //Tamaño de los
datos a enviar por TCP
```

```
if(Serial.find(">")){
```

```
Serial.print(cmd); //Enviar datos
```

```
}else{
```

```
Serial.println("AT+CIPCLOSE"); //No se
pudo ejecutar, cerrar conexión TCP
```

```
}
```

```
}
```

```
void updateHumedad(String humedad){
```

```
String cmd = "AT+CIPSTART=\"TCP\",\";
```

```
cmd += IP;
```

```
cmd += "\",80";
```

```
Serial.println(cmd);
```

```
delay(2000);
```

```
if(Serial.find("ERROR")){
```

```

return;
}
cmd = GET_HUM;
cmd += humedad;
cmd += "\r\n";
Serial.print("AT+CIPSEND=");
Serial.println(cmd.length());
if(Serial.find(">")){
Serial.print(cmd);
}
else{
Serial.println("AT+CIPCLOSE");
}
}
}
//Función para crear conexión Wifi. Regresa
true si se conecta exitosamente, si no false.
boolean connectWiFi(){

```

```

Serial.println("AT+CWMODE=1");
//Configurar Modulo Wifi en Modo 3 =
Station + Access Point (Trasmitir y Recibir)
delay(2000);
String cmd="AT+CWJAP=\"";
cmd+=SSID;
cmd+="\", \"";
cmd+=PASS;
cmd+="\"";
Serial.println(cmd);
delay(5000);
if(Serial.find("OK")){
return true; //Conexión existosa
}
else{
return false; //No se pudo conectar
}
}
}

```

