

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS
ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

Sistema automatizado de control de un invernadero usando la técnica de hidroponía para el cultivo de huertos

TRABAJO RECEPCIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

PRESENTA

Carlos Alberto Serrano Montiel

DIRECTOR DE TESIS

Lic. David Velázquez Suárez

Ciudad de México, Noviembre del 2018

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

INTEGRACIÓN DEL JURADO:

Presidente: Mtro. Gabriel Eloy Aguilar Pineda

Secretario: Lic. David Velázquez Suárez

Vocal: Dr. Sebastián Ibarra Rojas

1er. Suplente: Dr. Pablo Claudio Rojas Lara

Plantel de adscripción:

CENTRO HISTÓRICO

DIRECTOR DE TESIS:

David Velázquez Suárez

Licenciatura en Ingeniería Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

DEDICATORIA

Este documento se lo dedico con todo mi ser a mi madre y hermana por su apoyo y esfuerzo. Gracias por su contribución para que yo lograra esta meta personal, el cursar una licenciatura, gracias a ellas fue posible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis amigos, que me apoyaron, dedicaron y compartir su tiempo conmigo, gracias a eso, este proceso de aprendizaje fue divertido y enriquecido.

A mis maestros, en particular a Cecilia C. R., Sebastián I. R. y David V. S., que fueron mi guía y ejemplo esencial en mi formación como ingeniero, en especial a David Velázquez Suárez por el financiamiento del proyecto, compartir conmigo su experiencia y filosofía.

Al pueblo de México, que con su contribución al erario público mantuvo mi educación financiando a mi casa de estudios, la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, gracias a su existencia y principio fundamental de dar cabida a todo aquel que quiera estudiar y aprender. Así como el apoyo otorgado para la impresión y empastado del mismo.

SINTESIS

El objetivo principal del presente trabajo fue implementar un modelo de invernadero automatizado con electrónica. El modelo construido es totalmente funcional y se pueden cultivar plantas comestibles en cualquier época del año. Se pueden controlar en él, las variables ambientales de temperatura, humedad e iluminación; además del riego.

Es un modelo abierto en cuanto al control se refiere; es decir; las variables del mismo se pueden conocer y con algoritmos específicos se puede experimentar y controlar las mismas. La adquisición de datos es segura y normalizada para su interpretación; por tanto, se pueden implementar en este modelo algoritmos de control.

Todos los sensores empleados en el modelo del invernadero son denominados " inteligentes" debido a que contienen la amplificación y el acondicionamiento de la señal, su formato electrónico, así como, la trasmisión de datos normalizada (I²C).

Se implementaron en el invernadero tres algoritmos de control, para verificar el funcionamiento y principios de control.

El sistema construido queda totalmente abierto al control de las variables ambientales y riego. De tal manera que se puede hacer el uso de algoritmos específicos de control y ciclos de riego.

RESUMEN

En el presente documento se muestra una investigación e implementación de un sistema de cultivo controlado por medio de electrónica, donde se miden las variables ambientales, que intervienen en el desarrollo de las hortalizas. El sistema está basado en un invernadero reducido para espacios cerrados donde se puedan modificar las variables ambientales.

El invernadero con técnica hidroponía permite controlar las condiciones ambientales y de nutrientes para mantener vivas las plantas en condiciones distintas a las naturales; uso del agua, humedad, temperatura e iluminación. De este modo se optimizan el proceso de cultivo, asegurando la germinación y la cosecha en un espacio reducido.

El modelo de control aplicado al invernadero permite mantener las variables ambientales dentro de límites y leyes establecidas; ejecutando el control específico para generar datos de las variables y la interpretación de los mismos.

Las acciones de control se procesan en una computadora Raspberry Pi 3B (RP) por medio de programación en lenguaje Python. La computadora adquiere las señales ambientales por medio de sensores inteligentes y realiza las acciones con actuadores electrónicos.

Las señales de los sensores se adquieren y procesan de acuerdo a la ley de control; se toman decisiones por medio de los datos obtenidos y acciones con los actuadores. Los actuadores cambian las condiciones ambientales en acciones específicas de acuerdo al algoritmo y generan los datos para interpretación del usuario: quien finalmente toma las decisiones pertinentes.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, MARCO TEÓRICO, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	4
CAPÍTULO II. ANÁLISIS DEL PROBLEMA, HIPÓTESIS Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN	6
CAPÍTULO III. ELEMENTOS EN LAS HORTALIZAS Y CULTIVOS	8
CAPÍTULO IV. SENSORES Y ACTUADORES EMPLEADOS EN EL PROYECTO	16
CAPÍTULO V. CONTROL Y RASPBERRY PI	44
CAPÍTULO VI. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL INVERNADERO	53
CAPÍTULO VII. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	71
ANEXOS	84
ÍNDICE DE TÉRMINOS	97
REFERENCIAS	100
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	106

ÍNDICE

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
SINTESIS	III
RESUMEN	IV
INDICE GENERAL	V
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, MARCO TEÓRICO, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	
1. Introducción	4
1.1 Justificación del proyecto	4
1.2 Objetivo general	5
1.3 Objetivos específicos	5
CAPÍTULO II. ANÁLISIS DEL PROBLEMA, HIPÓTESIS Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN	
2. Análisis del problema	6
2.1 Hipótesis general de la solución	6
2.2 Método propuesto para resolver el problema	6
2.3 Diseño del prototipo de invernadero	7
CAPÍTULO III. ELEMENTOS EN LAS HORTALIZAS Y CULTIVOS	
3. Generalidades de las hortalizas y cultivos	8
3.1 Hidroponia	9
3.1.1 Técnicas de cultivo de hidroponia	9
3.2 Plantas cultivadas por hidroponia	9
3.3 Sustratos	10
3.4 Nutrientes	11
3.5 Riego y oxigenación	12
3.6 Ventilación	13
3.7 Variables ambientales que intervienen en los cultivos	13
3.7.1 Temperatura	13
3.7.2 Humedad (tiempo de riego)	14
3.7.3 Iluminación (luz artificial fija)	15

CAPÍTULO IV. SENSORES Y ACTUADORES EMPLEADOS EN EL PROYECTO

4. Propuesta del desarrollo. Diagrama a bloques	16
4.1 Sensores	17
4.1.1 Definición general de sensor	17
4.1.2 Tipos de sensores	17
4.1.3 Acondicionamiento de la señal de un sensor	18
4.1.4 Sensores inteligentes	18
4.1.5 Características de los sensores	19
4.2 Sensores usados en el desarrollo del sistema	20
4.2.1 Sensor de temperatura ambiental y humedad ambiental	20
4.2.2 Sensor de humedad (medición de humedad en el sustrato)	25
4.2.3 Sensor de luz	27
4.2.4 Sensor de nivel (medición del nivel de agua en tanque de nutrientes)	30
4.3 Actuadores	33
4.3.1 Actuadores eléctricos	35
4.3.2 Actuadores hidráulicos	38
4.3.3 Actuadores neumáticos	39
4.4 Actuadores utilizados en el proyecto	40
4.4.1 Bomba	40
4.4.2 Ventilador	41
4.4.3 Iluminación	41
4.4.4 Calefactor / Enfriador	43

CAPÍTULO V. CONTROL Y RASPBERRY PI

5. ¿Qué es la Raspberry Pi?	45
5.1 Características generales	45
5.2 Lenguaje de programación Python	46
5.3 Sistema operativo (SO) de la RP	46
5.4 Puerto de propósito general de entrada / salida (GPIO)	47
5.5 Comunicación I ² C	47
5.6 Técnicas de control	49
5.7 Control aplicado con Raspberry Pi 3 2B	52

CAPÍTULO VI. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL INVERNADERO

6. Características deseadas	53
6.1 Diseño mecánico	53
6.1.1 Estructura	53
6.1.2 Recipientes de cultivo	54
6.1.3 Mecanismo de riego	54
6.2 Diseño electrónico	55
6.2.1 Acondicionamiento electrónico de sensores	56
6.2.1.1 Sensor de humedad y temperatura ambiente	57

6.2.1.2 Sensor de humedad en sustrato	58
6.2.1.3 Sensor de luz	58
6.2.1.4 Sensor de presión	59
6.2.2 Acondicionamiento electrónico de actuadores	60
6.2.2.1 Controlador de bomba de agua y celda Peltier	61
6.2.2.2 Controlador de ventiladores	64
6.2.2.3 Controlador de iluminación (rojo, azul y blanco)	66
CAPÍTULO VII. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	
7.1 Puesta a punto	71
7.2 Programa principal	71
7.3 Subrutinas	73
7.4 Control en la temperatura variando el tiempo de calentamiento	80
7.5 Resultados	82
7.6 Conclusiones	83
ANEXOS	84
ÍNDICE DE TÉRMINOS	97
REFERENCIAS	100
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	106

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, MARCO TEORICO, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

1. Introducción

Las hortalizas son fundamentales en la alimentación y el consumo de las mismas ha cambiado con el tiempo, se han desarrollado métodos y técnicas para aumentar la producción y calidad en las hortalizas.

En la actualidad se emplean métodos de cultivo que permiten sembrar hortalizas sin tierra en espacios reducidos, sin luz natural y de forma vertical generando una mayor cantidad de cosecha en poco espacio a pesar de no ser cultivados en un medio natural.

La necesidad de aumentar la producción de alimentos ha permitido incorporar la electrónica en la agronomía, incorporando sensores y actuadores para control de las variables que inciden en el cultivo. Se implementan computadoras y programas dedicados a la adquisición y manipulación de datos, que integran nuevos sistemas de control para el desarrollo óptimo de cultivos.

Los invernaderos son un claro ejemplo de cultivo de hortalizas donde se controlan las condiciones ambientales. Tienen el propósito de mantener vivas las plantas en condiciones distintas a las naturales; modificando las variables ambientales como la humedad, temperatura, iluminación y nutrientes.

1.1 Justificación del proyecto

Este proyecto inicia como una propuesta para cultivar hortalizas libres de contaminantes, producidas de forma orgánica, que se puedan cosechar en zonas urbanas donde no se cuenta con espacio para sembrar de manera tradicional.

Así mismo, la propuesta podría tener un impacto en la optimización de recursos agrícolas, como: el uso del agua para riego, evitar el desperdicio de alimentos desde el productor hasta el consumidor final y económico en todo el proceso de cultivo.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) prevé un aumento en la población mundial del 90% entre el 2009-2050 principalmente en los países en desarrollo así como su urbanización, generando una demanda en la producción del 70% en alimentos, aumentando la superficie de tierras de cultivo principalmente en África y América Latina y por ende el uso del agua para riego aumentaría [1]. En ese sentido, si se pudiera cultivar en zonas urbanas a gran escala empleando invernaderos verticales automatizados se podría cosechar hortalizas fuera de temporada con mayor rendimiento de cosecha, de mejor calidad, con ahorro de agua, disminución de plagas y con un impacto directo en el costo beneficio al evitar el gasto que implica sembrarlo en el campo, almacenarlo, refrigerarlo y transportarlo a las ciudades.

1.2 Objetivo general

Construir un micro invernadero controlado por medio de electrónica para la producción de hortaliza sin tierra, sin luz natural, en espacios cerrados y libres de pesticidas, bajo condiciones distintas a las naturales, donde se alimente a las hortalizas por riego a base de nutrientes minerales u orgánicos disueltos en el agua. En la Figura 1.0 se muestra el diagrama general del sistema, mostrando a bloques sus componentes.

1.3 Objetivos específicos

- Calcular, diseñar y construir el acondicionamiento electrónico de los sensores
- Calcular, diseñar y construir el acondicionamiento electrónico de los actuadores
- Gestionar el funcionamiento del invernadero con la computadora Raspberry Pi
- Integrar programación con Python
- Construir un prototipo

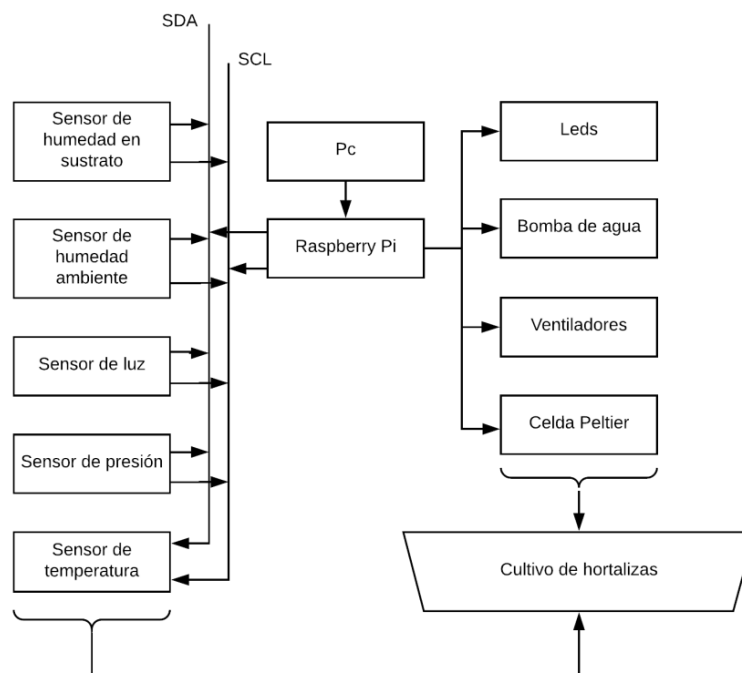


Figura 1.0. Esquema del objetivo general del sistema.

CAPÍTULO II. ANÁLISIS DEL PROBLEMA, HIPÓTESIS Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN

2. Análisis del problema

El problema consiste en cultivar y mantener vivas las hortalizas. Para esto se requiere entender las necesidades hídricas, ambientales y nutritivas del cultivo, dentro de espacios cerrados sin luz natural ni tierra.

Para cultivar hortalizas en espacios cerrados sin tierra se propone implementar el cultivo por hidroponía, donde los nutrientes se aportan por medio del agua y en lugar de tierra se emplean sustratos.

Las condiciones ambientales de temperatura, humedad y luz se pueden medir y modificar implementando sensores y actuadores. Estas variables ambientales se consideran abiertas para su control y manipulación, esto quiere decir que dependiendo del tipo de hortalizas uno puede establecer los límites de las variables basado en las necesidades del cultivo.

Por lo tanto: se propone que las variables a manipular sean la humedad, temperatura, el riego e iluminación. Respecto a los nutrientes se propone establecerlos respecto a una fórmula de uso comercial.

2.1 Hipótesis general de la solución

Se pueden cultivar plantas utilizadas como alimentos dentro de espacios cerrados, en condiciones distintas a la agricultura tradicional, sin tierra, luz solar y sin los nutrientes provistos de manera natural. Implementando un sistema electrónico que se pueda automatizar y controlar para mantener viva a estas plantas.

2.2 Método propuesto para resolver el problema

La propuesta de solución se desarrolla bajo la metodología de arriba a abajo (“Top-Down”, por su nombre en inglés), es una visión de sistemas, que parte de plantear una solución a un sistema en general y resolver (hacia abajo) cada una de sus partes o subsistemas. En lo general no se explica a detalle cómo se solucionará cada una de sus partes que lo integran hasta que se aborde en lo particular. Cada subsistema es parte fundamental de la solución al problema planteado y será explicado con detalle su operación para comprender su función en el sistema.

2.3 Diseño del prototipo de invernadero

Se divide el diseño y la implementación del prototipo en dos áreas:

- a. La parte mecánica del invernadero. Modelado inicialmente en modelado asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) para definir dimensiones, ubicación de elementos y espacios destinados a cultivo, mezcla de nutrientes y agua, así como los sensores y actuadores.
- b. La parte electrónica de control de sensores y actuadores. Se definen circuitos electrónicos, se calculan, modelan, simulan y fabrican prototipos específicos.

CAPÍTULO III. ELEMENTOS EN LAS HORTALIZAS Y CULTIVOS

3. Generalidades de las hortalizas y cultivos

Los cultivos de hortalizas se realizan en huertos de manera habitual donde se riegan y se abonan directamente sobre la tierra, cuentan con la luz del sol y del viento de manera natural. Expuestos a cambios climáticos que afectan su crecimiento. Esta manera de cultivar se ve beneficiada al integrar invernaderos que mejoran las condiciones ambientales del cultivo aumentando las posibilidades de desarrollo de las hortalizas [2] [3].

Las hortalizas que se pueden sembrar dentro de un invernadero pueden ser: frutas, verduras, tubérculos y flores al crear un clima adecuado para su desarrollo, para esto se requiere controlar las variables ambientales como: la temperatura, la humedad e iluminación.

Para cultivar hortalizas se debe tomar en cuenta la época del año, debido a que las hortalizas no se desarrollan de la misma forma todo el año, por lo tanto, es necesario considerar separarlas por temporada fría o caliente. Las hortalizas que se desarrollan mejor en el frío, requieren menos luz y más humedad, contrario a las que requieren más calor, más luz y menos agua. Algunas verduras de temporada fría son el apio, lechuga y acelga las cuales no requieren calefacción e iluminación adicional, pero si una buena ventilación durante el día. Durante la temporada de calor se pueden cultivar apio, cilantro y melón. Las hortalizas en invernadero se pueden cultivar sin importar la temporada del año sí se generan las condiciones climatológicas adecuadas [4].

Los invernaderos son espacios cerrados de paredes translúcidas que permiten el paso de la luz, conservan el calor y la humedad necesarios para el crecimiento de los cultivos en condiciones ambientales distintas exterior, como el granizo, fuertes lluvias, plagas y depredadores que afecten la cosecha. Pueden variar en, tamaño, la forma y los materiales con los que se construyen, no obstante, el propósito es el mismo, proteger para obtener un desarrollo óptimo del cultivo.

Estos espacios pueden ser contruidos con sistemas de ventilación mecánica, materiales ópticos que: regulen el paso de la luz, la filtren, cambien de color o impidan el paso de la misma. Pueden contar con paredes dobles con burbujas de aire para impedir la pérdida de calor. La estructura puede ser construida de forma, tubular, adicionalmente ser fijas y diseñadas para acoplarse con otras, incluso ser móviles y desplazarse sobre rieles.

La forma de cultivo de hortalizas es por medio de invernaderos, que incorporan sistemas de control por medio de computadoras para gestionar la temperatura, humedad e iluminación. Se dosifican los nutrientes para optimizar el tiempo de crecimiento, tamaño y color de los cultivos, así se aumenta la cantidad de cosechas por año sin desaprovechar los recursos [5].

Las ventajas de los invernaderos son: cultivo de hortalizas fuera de temporada, mayor rendimiento de cosecha, mejor calidad, ahorro de agua, prolongación de recolección de cosechas, la disminución de riesgos climáticos y mejor control de plagas. Las desventajas: Especialización técnica del personal, elevados costos de inversión inicial de producción (agua, semillas, tratamientos, abonos, etc.) [6].

3.1 Hidroponia

Otra técnica de cultivo de hortalizas es la hidroponia, donde su característica más importante es el cultivo en soluciones acuosas de minerales con un soporte (sustrato) de arena, grava, arcilla, materiales orgánicos o plástico. Este método consiste en sustentar las plantas en una base y colocar las raíces en sustancias nutritivas que contengan los elementos necesarios para nutrir la planta.

Los cultivos en hidroponia se pueden realizar en invernadero o cualquier espacio abierto o cerrado, instalándose de manera horizontal o vertical, adoptando la técnica que mejor resultados proporcione al crecimiento del cultivo en cuestión. En el presente la hidroponia es la técnica de cultivo que dará sustento al cultivo.

3.1.1 Técnicas de cultivo

Existen dos métodos de cultivo: en agua o en sustrato. El cultivo en agua consiste en el desarrollo de la planta desde su nacimiento hasta la producción en nutrientes disueltos en agua sin soporte mineral o sustrato, sólo se colocan en bases donde las raíces están en contacto directo con el agua o soluciones. En sustrato la planta crece y se desarrolla hasta su producción en un material inerte, ya sea mineral, orgánico, incluso plástico; como arena, grava, fibra de coco o aserrín.

Con el propósito de optimizar los recursos y hacer más eficiente la técnica para obtener más cosechas por metro cuadrado, con el tiempo se han complementado las técnicas de cultivo y creado variantes como raíz flotante (aeronomía), técnica de película de nutriente (NTF, por su siglas en inglés), cultivo en lana de roca, [7].

3.2 Plantas cultivadas por hidroponia

En general las hortalizas se pueden cultivar usando la hidroponia con las técnicas ya mencionadas sin importar la temporada del año, al garantizar las condiciones nutritivas y climáticas. En teoría las hortalizas se desarrollan de manera óptima en hidroponia, pero considerando que en esta técnica de cultivo no importa la temporada, por lo tanto, se clasifican según la parte utilizada para consumo [8] [9]. En la Tabla 3.1 se clasifican las hortalizas según su parte comestible.

Tabla 3.1 Clasificación de las hortalizas según su parte para consumo.

Tipo de Hortaliza	Ejemplos
Hortalizas de raíz	Rábano, zanahoria, betabel, nabo
Hortalizas de tallo	Espárragos, apio,
Hortalizas de hojas	Lechuga, lechuga romana, lechuga de batavia, lechuga iceberg, berros, espinacas, acelgas
Hortalizas de flores	Alcachofas, coles, coliflor, brócoli, coles de brúcelas, espárrago,
Hortalizas de fruto	Calabaza, berenjena, pepino, calabacín, maíz, pimiento, jitomate, chayote, tomate
Hortalizas de vainas	Habas, chicharos, frijol
Hortalizas de bulbo	Ajo, cebolla, puerro
Hortalizas de tubérculos	Papa, camote, yuca

3.3 Sustratos

Los sustratos son el soporte de la planta y de los cuales depende el desarrollo de las raíces, retención de líquidos y la oxigenación correcta; son materiales que carecen de propiedades nutritivas para los cultivos, pero tienen la propiedad de retener grandes cantidades de agua y oxígeno, debido a la porosidad de los materiales. Pueden ser de origen orgánico, mineral, o una mezcla de ambos, y sintéticos diseñados para una mayor retención de agua y oxígeno [10]. Deben tener características deseables para ser considerados adecuados para el cultivo como: orgánicamente estéril, químicamente ligero, con alta retención de humedad y ventilación, además fácil de adquirir, reutilizable, de bajo costo, que no se descomponga ni degrade con facilidad [11] [12]. En la Tabla 3.2 se clasifican los sustratos según su origen y material.

Tabla 3.2. Tipo de sustratos.

Tipo de sustrato	Material	Retención de agua (%)
Sustratos orgánicos	Cáscara de arroz	40 %
	Cascarilla de café	-
	Fibra de coco	57 %
	Turba vegetal	70 %
	Aserrín	54 %
Sustratos minerales	Tezontle	49 %
	Perlita	63 %
	Vermiculita	68 %
	Arena de río	56 %
	Piedra poma	38 %
	Piedra volcánica	-
	Carbón mineral	-
Sustratos sintéticos	Lana de roca	78 %
	Polímeros de gel	-
	Espuma de polietileno	-
	Espuma de poliestireno	-
	Espuma de poliuretano	-
	Espuma de fenólica	-

3.4 Nutrientes

Las soluciones nutritivas son el alimento de la planta y de éstas depende su buena germinación, desarrollo y producción; para esto es fundamental considerar las sales minerales divididas en: macronutrientes y micronutrientes contenidas en la solución. Macronutrientes: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). El carbono es absorbido del aire, el oxígeno y el hidrógeno del agua, por lo tanto, los elementos restantes son los que se suministran en las soluciones. Micronutrientes: hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), molibdeno (Mo) y boro (B) [8][13].

Las plantas absorben los nutrientes dependiendo de su especie y de su etapa de desarrollo, esto quiere decir que se puede suministrar una fórmula dependiendo de la etapa de desarrollo, no obstante, se requiere de una amplia experiencia para hacer fórmulas específicas para cada cultivo y etapa de desarrollo.

Una fórmula propuesta para 100 litros de agua es: nitrato de calcio $(\text{N}_3)_2\text{Ca}$ 118 (g), nitrato de magnesio SO_4Mg 49 (g) y fosfato monopotásico $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$ 29 (g). La fórmula anterior es un

ejemplo de una solución nutritiva comercial, donde se establecen las cantidades de nutrientes necesarios para el desarrollo de hortalizas de mayor consumo, esta fórmula general se establece para obtener un crecimiento, desarrollo y rendimiento, sin embargo esto no asegura que sea una fórmula general para toda clase de cultivos.

3.5 Riego y oxigenación

El sistema de riego es esencialmente la base en la hidroponía; sólo se distingue un método de otro por la forma del riego, sin embargo el propósito es el mismo, nutrir las raíces y oxigenarlas. Por medio del agua se absorben los nutrientes que se aportan en la mezcla, a dicho riego se le denomina fertirriego.

Los sistemas automáticos de riego se denominan sistemas de flujo continuo y se dividen en abiertos o cerrados. En los sistemas abiertos la mezcla de nutrientes se suministra a los cultivos y se cambia la mezcla con frecuencia. En un sistema cerrado la mezcla circula por la tubería y se recupera para analizar su concentración de nutrientes debido a pérdidas por la absorción y evaporación. El sistema de riego a aplicar depende de la técnica de hidroponía y el tipo de cultivo.

Uno de los métodos más comunes de riego es por subirrigación; donde las plantas están en recipientes con una base de sustrato, estos recipientes se inundan cada cierto tiempo para proporcionar los nutrientes que están mezclados en el agua, así las hortalizas puedan absorber los nutrientes por medio de las raíces. Del mismo modo las raíces se oxigenan al drenar los recipientes periódicamente. En el riego por goteo; las plantas son colocadas en recipientes con sustratos, donde se suministra el nutriente con goteros de forma directa en la zona de las raíces por periodos de tiempo cortos y en pequeñas cantidades, evitando pérdidas de líquido por evaporación o derrames. Para el riego por recirculación; la mezcla de nutrientes circula por una serie de tubos donde las raíces de las hortalizas absorben los nutrientes, al final del recorrido la mezcla es recuperada y bombeada para hacerla circular de nuevo por la tubería a intervalos de tiempo para mantener oxigenadas las raíces (ciclos de riego) [14].

La cantidad de agua requerida por una planta se relaciona directamente con la capacidad de retención de líquido del sustrato, el drenado del exceso de agua o humedad del sustrato y la oxigenación de las raíces. La frecuencia del riego se determina por cantidad de agua requerida por la hortaliza en la cual sus intervalos no deben superar el punto de marchite permanente y el exceso de agua, manteniendo hidratada y oxigenada la hortaliza. Conociendo esos límites, se puede establecer la dosis de riego correcto para cada hortaliza.

Para fines de este proyecto se empleará el sistema de riego por goteo localizado de manera experimental, considerando que es uno de los sistemas con mejores resultados y menores pérdidas de agua, fundamentado en que uno de los grandes problemas en la agricultura es la escasez de agua y su aprovechamiento en los cultivos.

3.6 Ventilación

La ventilación en un invernadero puede ser natural o forzada, se puede implementar con ventanas o techos abatibles con mecanismos donde el aire fluye de manera natural. En el caso de mecanismos de ventilación por aire forzado se implementan ventiladores para aumentar el flujo y renovar el aire dentro del espacio de cultivo. La ventilación es necesaria para renovar el aire y evitar la acumulación de humedad que favorece la aparición de enfermedades en el cultivo, por este motivo es importante su implementación más que por motivos de temperatura.

Por la mañana el aire es frío e inicia la evapotranspiración de las plantas con la luz del sol, esto genera que la humedad relativa llegue a ser del 100 % (punto de rocío), si la ventilación natural no es suficiente es necesario implementar ventiladores para renovar el aire caliente y húmedo por aire fresco y seco de acuerdo a los parámetros de humedad y temperatura establecidos y requeridos por el cultivo [15].

Algunos sistemas de ventilación se complementan con mecanismos de refrigeración, humidificación o calefacción del aire dependiendo de las regiones donde se instale o la temporada del año, creando microclimas para los cultivos que se siembran fuera de temporada.

3.7 Variables ambientales que intervienen en los cultivos

3.7.1 Temperatura

La temperatura es una medida que expresa numéricamente qué tan caliente o que tan frío está un objeto, de acuerdo a una escala establecida. Relacionando este concepto físico a la agricultura, se refiere al nivel de temperatura que requieren los cultivos o plantas para poder desarrollarse de una manera óptima. La mayoría de las plantas se desarrollan bien en un intervalo de temperatura de 10 °C a 25 °C, las plantas tropicales requieren temperaturas por encima del promedio y las plantas de clima frío requieren temperaturas entre los 10 °C y los 15 °C, sin embargo la temperatura máxima y mínima dependen de la especie a cultivar.

En el proceso de cultivo, la semilla requiere una temperatura aproximada entre los 10°C y los 25 °C, en el periodo de germinación las plántulas requieren entre 14 °C y 16 °C, y posteriormente para desarrollar las raíces la temperatura puede variar entre los 18 °C y los 27 °C. Al final del crecimiento de las plantas se debe ajustar la temperatura entre 15 °C y 23 °C en su proceso de crecimiento, floración y desarrollo de la hortaliza [16]. El proceso de germinación puede durar entre 6 y 9 días dependiendo del tipo de planta y temperatura requerida.

El intervalo de temperaturas hace referencia a la temperatura mínima alcanzada en la noche y la máxima en el día, estas variaciones se pueden controlar dentro de un invernadero con clima, lo cual es parte a considerar en el proyecto.

3.7.2 Humedad

La humedad del sustrato está estrechamente relacionada con el riego, surgiendo dos variables importantes: la cantidad de agua y el periodo de riego; ambos dependen de la variedad del cultivo, temperatura, evaporación en el sustrato y transpiración de las plantas o evapotranspiración (ET). Para saber cuándo es necesario regar se debe medir la disminución de agua en el suelo para obtener estas variables.

Las plantas se hidratan y nutren del agua a su alrededor, a medida que se hidratan, el nivel de agua disminuye y es necesario regar de nuevo para que la planta no muera. Se puede considerar que el suelo está al 100 % de humedad después del riego y sólo las moléculas de agua retenida en las partículas del sustrato por presión (0.1 bar) y no la drenada, esto se conoce como capacidad de campo (CC). Las plantas pueden utilizar el agua retenida en el sustrato hasta alcanzar el punto de marchite permanente (PMP) pereciendo si no se riegan antes, por lo tanto, el agua disponible para la planta (ADP) es CC-PMP de ahí la importancia de saber cuándo regar de nuevo considerando estos datos.

En estudios relacionados se sugiere que el déficit permitido en el margen de riego (DPM) sea del 40% para hortalizas y la presión no debe ser mayor a 1.5×10^6 [N/m²] (15 bares) [17].

Un método simple para determinar la CC es tomar una muestra de sustrato, dejar drenar, pesar la muestra y posteriormente secarla a 105 °C. Se pesa de nuevo para obtener el porcentaje de humedad en peso sobre suelo seco [18], ecuación 3.1.

$$\%CC = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde:

Psh= Peso muestra suelo húmedo

Pss=Peso muestra suelo seco

Para fines de este sistema se propone emplear un sensor resistivo, donde el contenido de humedad se determina por la resistencia al paso de corriente eléctrica entre dos electrodos en el sustrato, y la programación de riego por computadora relacionados con la CC para determinar el consumo del agua de las plantas.

3.7.3 Iluminación (luz artificial fija)

La luz es indispensable para que las plantas puedan realizar la fotosíntesis, transformando los nutrientes en flores y frutos. En cultivos tradicionales la luz es proporcionada de manera natural por el sol, de modo que el periodo de luz depende de la duración del día y la noche (fotoperiodo). La luz es un factor muy importante que influye directamente en el desarrollo de las plantas así como la oscuridad es necesaria para que crezcan. Un estimado de la cantidad mínima de luz requerida por las plantas es de 6 horas, variando según el cultivo [19]. En general se pueden clasificar las plantas por sus necesidades del fotoperiodo en días largos (hemoperíodo), de más de 12 horas (betabel, espinacas, rábano, zanahoria), de días cortos (nictoperíodo), menores de 12 horas (camote, papa, judías) y las plantas de las que no influye su crecimiento la cantidad de luz (fresas, crisantemos, petunia) [20].

La hidroponía aplicada en espacios cerrados (agricultura integrada) requiere luces de crecimiento que proporcionen las necesidades luminosas de la mayoría de las hortalizas, esta cantidad de luz se encuentra entre 10,000 y 60,000 lux, en general las hortalizas no requieren más de 20,000 lux [21].¹

La luz empleada en la agricultura bajo invernadero es por iluminación artificial. Se emplea iluminación de color rojo y azul, el color azul, cuya longitud de onda está entre (450 - 560 nm), tiene influencia sobre el crecimiento vegetativo y la fotosíntesis. El color rojo (longitud de onda entre 630 - 770 nm) tiene influencia sobre el crecimiento, la fotosíntesis, floración y germinación. Los efectos de seleccionar la longitud de onda o color de iluminación influye en características y propiedades como el tamaño, color, sabor, olor (fotomorfogénesis) de los cultivos, así como el tiempo de crecimiento, por lo cual es importante tener en cuenta el fotoperiodo de las plantas para favorecer la fotosíntesis [22].

Los parámetros relacionados con la luz y el desarrollo de las plantas son: calidad, cantidad y duración de la luz. La cantidad de luz es el número de fotones que influye en la fotosíntesis convirtiendo el CO_2 en carbohidratos por lo cual es importante la intensidad de luz (lux) y el total diario percibida en un área, considerando que estos parámetros cambian en el transcurso del día [23].

En el presente proyecto se empleará iluminación artificial LED de luz color rojo y azul, debido a las longitudes de ondas antes mencionadas, esperando obtener resultados similares a los estudios citados.

¹ El lux se define como la iluminación producida por una fuente puntual de una candela sobre una superficie que dista un metro de la fuente. un lux es igual a un lumen por metro cuadrado $1[\text{lx}]=1[\text{lm}/\text{m}^2]$

CAPÍTULO IV. SENSORES Y ACTUADORES EMPLEADOS EN EL SISTEMA

4. Propuesta del desarrollo. Diagrama a bloques

De acuerdo con el objetivo general, se propone implementar un sistema de control automático con la computadora Raspberry Pi (RP) (ver Capítulo V), y sensores que conviertan un fenómeno físico en una señal eléctrica. Esta señal es procesada por la RP, la cual, dependiendo de estas variables y el algoritmo de control, realizará acciones por medio de los actuadores. De este modo el sistema interactúa con el medio ambiente del invernadero permitiendo mantener las variables a controlar dentro de los límites establecidos en el algoritmo de control.

En la Figura 4.1 se muestra la ilustración de la RP conectada a la PC, con los sensores en las entradas y los actuadores en la salida que monitorean y realizan acciones en el cultivo. El sistema puede funcionar de manera autónoma y la interface con la PC es para comunicación remota; con objetivos de reprogramación, control externo y/o vía web.

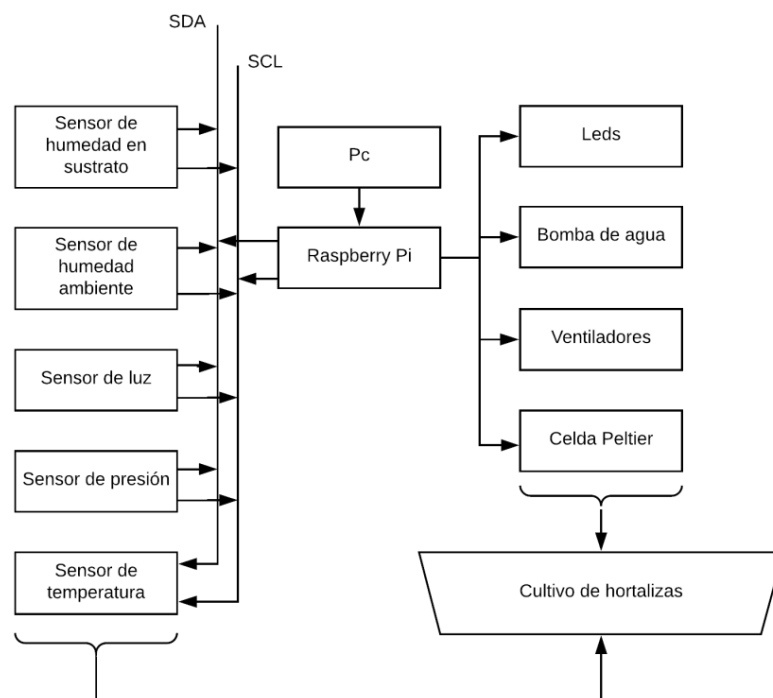


Figura 4.1. Diagrama a bloques del sistema propuesto.

4.1 Sensores

4.1.1 Definición general de sensor

Formalmente los sensores se definen como dispositivos que, a partir de la energía presente en el medio donde se mide, entregan una señal de salida transducible que es función de la variable medida [24]; en otras palabras, permite medir y transformar un fenómeno físico como la temperatura, humedad, etc., en una señal eléctrica.

4.1.2 Tipos de sensores

Existe una amplia gama de sensores y criterios para clasificarlos; por ejemplo: la clasificación realizada por White R. [25], el cual menciona a los sensores según su señal de salida digital o analógica.

Otras clasificaciones: por impedancia, inductivas, capacitivas y resistivas. Por el tipo de variable eléctrica que entregan, que puede ser corriente, carga o tensión.

Con el fin de simplificar, en este trabajo se recurre a su clasificación por la magnitud a medir; sensores de temperatura, humedad, posición, velocidad, aceleración, fuerza, torque, caudal [21]. En la Tabla 4.1 se muestra una clasificación de sensores por su magnitud a medir con relación a su principio de transducción.

Tabla 4.1. Clasificación de sensores por su magnitud a medir.

SENSORES	TEMPERATURA	PRESIÓN	CAUDAL O FLUJO	NIVEL	HUMEDAD
RESISTIVOS	RTD Termistores	Potenciómetros	Anemómetro Galgas Termistor LDR	Potenciómetro Termistores LDR	Humistor
CAPACITIVOS		Condensador variable + diafragma	Condensador variable	Condensador variable	Dieléctrico variable
INDUCTIVOS Y ELECTROMAGNÉTICOS		LVDT + diafragma Reluctancia variable	LVDT + rotámetro	LVDT + flotador	
GENERADORES	Termopares Piro eléctricos	Piezoeléctricos			
DIGITALES	Osciladores de cuarzo	Codificador + tubo Bourdon	Vortices		SAW Piezoeléctricos
ULTRASÓNICO			Efecto Doppler	Reflexión Absorción	
UNION P-N	Diodo Transistor			Fotoeléctricos	

4.1.3 Acondicionamiento de la señal de un sensor

El manejo de sensores requiere de circuitos de acondicionamiento, para que la magnitud a medir sea una señal útil en los procesos de control, como hemos mencionado, la magnitud a medir se debe procesar o convertir a una corriente o voltaje, de tal manera que cumpla con los requerimientos de medición, es decir, linealidad, rango, repetibilidad; características que debe cumplir un sensor.

El desarrollo en acondicionamiento electrónico se hacía habitualmente para sistemas de control en la industria, implementando circuitos de polarización y linealización para lograr que la medición cumpla con los requerimientos del sistema. Estos circuitos de acondicionamiento acoplan la señal, la amplifican, filtran y realizan la conversión analógico a digital si es necesario.

Existen sensores que integran circuitos de acondicionamiento, transmisión y almacenamiento de dato, que actualmente se denominan sensores inteligentes.

4.1.4 Sensores inteligentes

Con los avances tecnológicos y las necesidades en nuevas aplicaciones en la industria automotriz, domótica, medicina, aeronáutica, surgen los sensores inteligentes, estos sensores incorporan acondicionamiento y procesamiento de la señal, su conversión analógica a digital y comunicación con otros dispositivos o sistemas electrónicos. Pueden realizar acciones de pruebas de error y tomar decisiones por si solos al incorporar un microcontrolador.

Los sensores inteligentes integran funciones que corrigen características no deseadas en la medición, corrigen las zona muerta, el cero absoluto y linealidad. Incorporan ajuste de referencia o un punto de partida en su escala de medición, ganancia ajustable, conversión de unidades, auto diagnóstico, y entrar en modo de hibernación para ahorrar energía o activarse si es necesario.

Uno de los aspectos importante de los sensores inteligentes es la comunicación con los sistemas de adquisición de datos (DAQ), por eso el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, por su nombre en inglés) propone el estándar IEEE 1451.4 [26]. En general, el estándar propone que los datos a adquirir por el sensor estén contenidos en lo que llaman hoja de datos electrónicos del transductor (TEDS), en la hoja se incluye el tipo de transductor y la identificación del fabricante, permitiendo que un sistema de datos elija la información correcta para la interpretación de los datos adquiridos por el sensor. El cuerpo de los datos TEDS incluye información de ajustes de calibración a las variaciones en la sensibilidad del sensor y normalizando su respuesta. En el estándar se define una conexión física de interfaz de modo mixto (MMI) que se emplea alternadamente para datos TEDS y señales analógicas, ya sea en dos, tres ó cuatro cables, adaptando el estándar para uso con una amplia gama de sensores. Para el caso del proyecto, se usarán sensores con comunicación serial I²C, que cumplen con el estándar descrito en el capítulo 5, inciso 5.5.

Aplicar sensores inteligentes a sistema para adquirir señales es una alternativa, donde se debe considerar el costo beneficio. Resulta más económico a largo plazo invertir en un sensor inteligente de alta tecnología que un análogo con el acondicionamiento y procesamiento de la señal por separado, por el tiempo e integración de las etapas adicionales, sin embargo la decisión sobre qué tipo de sensor a emplear depende de factores económicos, físicos y mecánicos que son inherentes a la aplicación.

4.1.5 Características de los sensores

Idealmente un sensor debe tener una relación proporcional entre su magnitud física de entrada y su salida, a pesar de ello, los sensores pueden presentar no linealidad, verse afectados con perturbaciones externas, retardo en su respuesta y otras características no deseadas. Las características de los sensores se basan en modelos ideales como referente y de este modo establecer el comportamiento deseado [27] [28]. De manera general se debe contemplar en los sensores, lo siguiente:

- **Campo de Medida:** Rango de valores de la magnitud de entrada comprendido entre el valor mínimo y máximo detectado por el sensor.
- **Resolución:** Distinción entre valores próximos de la variable de entrada medida por el sensor, medida por la diferencia entre dos valores próximos que el sensor es capaz de distinguir.
- **Precisión:** Es la máxima desviación entre la salida de un sensor en determinadas condiciones y el valor ideal correspondiente en igualdad de condiciones, según el patrón de referencia.
- **Repetitividad:** Máxima desviación entre los valores de salida medidos repetidas veces con una misma entrada y bajo las mismas condiciones.
- **Linealidad:** Constante de proporcionalidad única que relaciona los incrementos de la señal de salida con los incrementos de la señal de entrada en su campo de medida.
- **Sensibilidad:** Variación de la salida por unidad de la magnitud de entrada (Sensibilidad = $M_{\text{salida}}/M_{\text{entrada}}$).
- **Ruido:** Perturbación aleatoria del propio sensor, del sistema de medida o ambiente externo, que produce una perturbación en la salida.
- **Histéresis:** Se presenta cuando, teniendo la misma señal de entrada, la salida dependerá de si dicha entrada se alcanzó con aumento en sentido creciente o en sentido decreciente.

4.2 Sensores usados en el desarrollo del sistema

4.2.1 Sensor de temperatura ambiental y humedad ambiental

El sensor de humedad ambiental propuesto para la aplicación es el SHT31-D [29] el cual también mide temperatura. Pertenece a una nueva generación de sensores inteligentes, preciso, calibrado, lineal y con una salida digital compensada.

En la industria la temperatura es una de las variables físicas que se miden y controlan en los procesos, debido a que influye en fenómenos físicos como el volumen. Por ejemplo, el control de temperatura se utiliza en la fabricación de conductores, semiconductores y en pruebas de otros fenómenos empleados en laboratorios (velocidad del sonido en un gas, la frecuencia de resonancia en un gas)[30].

Un sensor de temperatura se define como un dispositivo que detecta la magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de un cuerpo o ambiente, en escala Kelvin (K) y la convierte en una señal medible; en caso de los sensores eléctricos de temperatura, esta señal será eléctrica analógica o digital.

La ecuación 4.1 relaciona la temperatura en Kelvin (T_k) con su equivalente de temperatura en grados centígrados (T_c).

$$T_k = T_c + 273.15 \quad (4.1)$$

T_k : Temperatura en Kelvin

T_c : Temperatura en grados centígrados

Las aplicaciones de los sensores para medir temperatura son casi infinitas debido a que la mayoría de los fenómenos físicos son afectados por la misma, una de las principales es el volumen en los cuerpos (sólidos, líquidos o gases). Una interesante aplicación en la ciencia es la teledetección espacial, que es la obtención de información y análisis de materia a distancia por medio de sensores instalados en satélites meteorológicos para medir la humedad del suelo, radiación de la tierra, temperatura del suelo y la temperatura superficial del mar relacionados con parámetros biológicos, incluso la detección de barcos y sedimentos en una superficie [31].

Las especificaciones técnicas generales del sensor SHT31-D, en lo que respecta a la medición de temperatura ambiental, se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Especificaciones del sensor de temperatura.

Parámetro	Condición de la medición	Valor	Unidad
Tolerancia de precisión	Típica entre 40°C a 90°C	±0.3	°C
Repetitividad	-	0.12	°C
Resolución	Típica	0.015	°C
Rango	-	-40 a 125	°C
Tiempo de respuesta	63%	>2	s
Deriva a largo plazo	máxima	<0.03	°C

En la Figura 4.2. Se muestra el comportamiento del sensor de temperatura. El sensor tiene mejor comportamiento cuando se opera dentro de la temperatura recomendada de -40 °C a 80°C, con una tolerancia típica de ±0.3%.

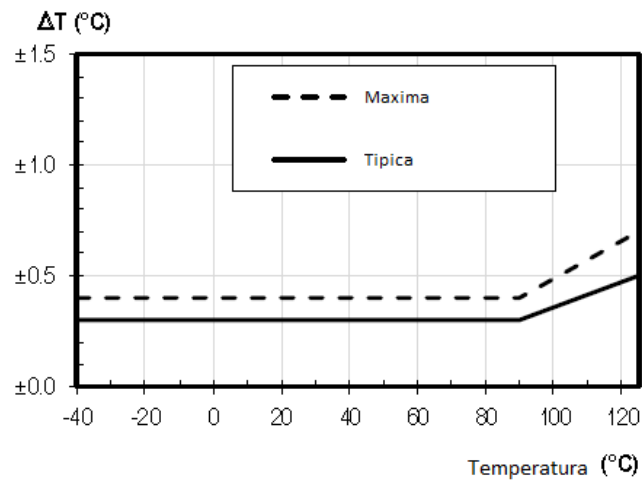


Figura 4.2. Rendimiento del sensor de temperatura.

El sensor de humedad atmosférica (incluido en el STH31-D) es un higrómetro que mide la cantidad de moléculas de agua o vapor en el aire. La cantidad de vapor de agua se debe a la evaporación del líquido que sube al medio ambiente, ya sea en un espacio cerrado o abierto.

Este higrómetro basa su funcionamiento en el cambio de capacitancia de un condensador, el vapor de agua cambia la constante dieléctrica entre placas del capacitor del sensor [32].

Estos sensores están formados por dos materiales dieléctricos como polímeros, sustrato de cerámica o sales higroscópicas, de los más usados son estos últimos, las cuales poseen una alta capacidad de absorción de las moléculas de agua, y por tanto dan una rápida respuesta a los cambios de humedad. Un capacitor se define como dos conductores separados por un aislante o dieléctrico, en el caso de este tipo de sensores, la sal es el dieléctrico, ejemplo el cloruro de litio (LiCl).

La capacitancia (C) se determina con la carga (Q) en las placas y la diferencia de potencial entre placas (V_{ab}), ecuación 4.2.

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} \quad (4.2)$$

El SHT31-D pertenece a una nueva generación de sensores inteligentes, preciso y con una salida digital compensada que incluye un procesamiento digital de señales, comunicación I²C con dos direcciones seleccionables y velocidad de comunicación hasta 1MHz, Figura 4.3.

- Dimensiones: 2.5 x 2.5, altura de 0,9 mm. Montaje superficial.
- Rango de tensión de alimentación de 2,4 V a 5,5 V a 800 μA .
- Salida digital con resolución de 16 bits, interface I²C con velocidades de comunicación de hasta 1MHz y dos direcciones de usuario seleccionable.
- Precisión típica $\pm 1.5 \%$
- Temperatura de operación de -40 °C a 125 °C

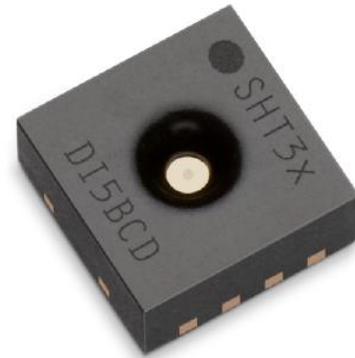


Figura 4.3. Características principales sensor SHT31-D. Sensor de humedad SHT31-D.

Características generales del sensor de humedad ambiental, Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Características del sensor de humedad ambiental.

SHT31-D	Condición	Valor	Unidades
Precisión	Típica	± 2	% RH (Humedad Relativa)
Repetitividad	Baja	0.25	% RH
	Media	0.15	
	Alta	0.10	
Resolución	Típica	0.01	% RH
Histéresis	25°C	± 0.8	% RH
Rango específico	Extendido	0 a 100	% RH
Tiempo de respuesta	63 %	8 ⁶	S
Deriva a largo plazo	Típica	< 0.25	% RH

En la Figura 4.3 se muestra el comportamiento del sensor para medir la humedad ambiental relativa, su máxima tolerancia y la típica a una temperatura de 25 °C. El sensor tiene su mejor comportamiento cuando se opera dentro del rango recomendado del 20 % RH - 80 % RH, sobrepasando estos límites se puede observar que su comportamiento ya no es lineal, el rango de este sensor es el adecuado para los fines de este trabajo.

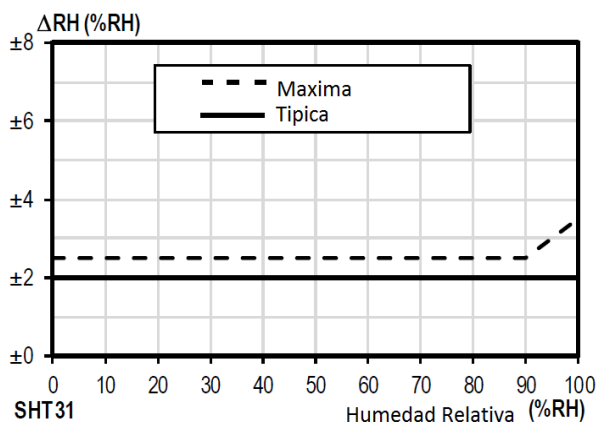


Figura 4.3. Respuesta del sensor de humedad.

Para realizar la aplicación del sensor es necesario conocer su principio de operación, función de las terminales, comunicación etc. La Figura 4.4 muestra las partes constitutivas y el funcionamiento general del sensor.

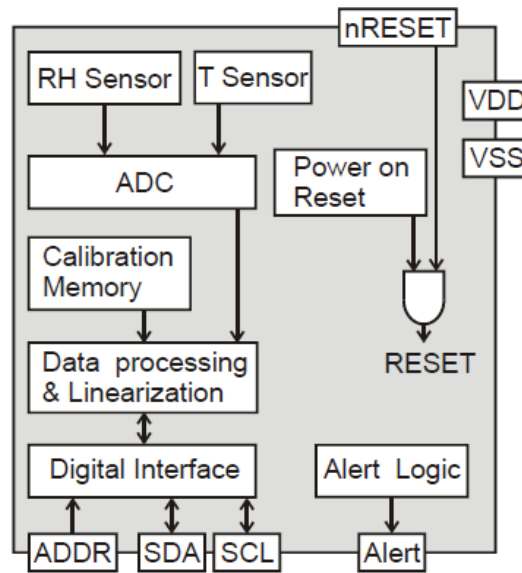


Figura 4.4. Esquemático del sensor DTH31-D.

En la aplicación típica se recomienda colocar un capacitor de 100nF entre VDD y GND para eliminar ruido de la fuente de alimentación.

La descripción de las terminales del sensor STH31-D son:

SCL: Sincroniza la comunicación entre el microcontrolador y el sensor con una frecuencia de reloj configurable de 0 a 1000 KHz, de acuerdo al protocolo de comunicación I²C.

SDA: Se emplea en la transferencia de datos hacia el sensor y desde él, cumpliendo con el estándar I²C en modo rápido con una frecuencia máxima de 400 KHz.

SDA y SCL: Se recomienda colocar una resistencia de levantamiento (Pull-UP) para asegurar el estado lógico alto.

ADDR: Seleccionar la dirección I²C cambiando el nivel lógico, permitiendo conectar más de dos sensores en la misma línea (Dirección A: 0x44 asignada, con ADDR conectado a VSS, dirección B: 0x45 con ADDR conectado a VDD).

ALERT: Envía una señal en alto cuando se cumplen las condiciones de alerta programables, esta se puede conectar a la terminal de interrupción de un microcontrolador, cuando no se emplea se deja sin conexión (flotando), se recomienda utilizar un transistor de conmutación y no conectar directamente para evitar daño por calentamiento.

nRESET: Restablece el sensor con un impulso de mínimo ancho de pulso de 1μs, sino se utiliza se debe dejar flotando.

El funcionamiento y comunicación del sensor SHT31-D está basado en el protocolo I²C con comandos hexadecimales que incluye una suma de comprobación CRC de datos (3bits),

asegurando que los datos enviados y recibidos no fallen en la transmisión. La secuencia de comunicación inicia con una condición START (S), el encabezado de escritura inicia con la dirección A o B más un cero (0) de escritura y el comando de medición de 16 bits, posteriormente la terminal SDA es llevada a un estado lógico bajo en sincronía con el reloj SCL para indicar la recepción y se detiene con STOP (P), de este modo mide la humedad, en caso de no realizar ninguna acción entra en reposo automáticamente.

Para realizar la conversión de los datos a porcentaje, se usa la ecuación 4.3, donde S_{HR} es la señal de salida de humedad, obteniendo el resultado en porcentaje de humedad relativa HR.

$$HR = 100 \frac{S_{HR}}{2^{16}-1} \quad (4.3)$$

S_{HD} : Salida de humedad del sensor

4.2.2 Sensor de humedad (medición de humedad en el sustrato)

El sensor de humedad es un dispositivo que convierte la cantidad de agua acumulada en sustancias, materiales u organismos en una variable eléctrica (higrómetro). La humedad puede alterar las propiedades físicas, químicas y biológicas, alteración medible y usada para controlar procesos industriales como el agrícola, automotriz y alimentario. En la agricultura dicho sensor se emplean para medir la humedad del suelo en los cultivos, automatizando los periodos de riego, manteniendo la humedad necesaria y así evitar el desperdicio de recursos valiosos como el agua en la absorción innecesaria en la tierra, en la evaporación o por fallas en el riego manual.

La magnitud de la humedad se puede expresar de tres diferentes formas: absoluta, relativa y específica.

Humedad absoluta: Es la cantidad de agua en una sustancia en kilogramos y el volumen del sustrato en metros cúbicos (Kg/m^3).

Humedad relativa (h_r): Cantidad de agua o vapor de agua que contiene una sustancia en relación con la cantidad de agua o vapor de la misma en condiciones de saturación completa, se expresa en fracción o porcentaje de acuerdo a la ecuación 4.4, donde: P_v es la porción de agua o vapor medida y P_{sat} es la porción cuando la sustancia está en saturación de agua o vapor de la misma, ecuación 4.4.

$$h_r = \frac{P_v}{P_{sat}} 100(\%) \quad (4.4)$$

h_r : Humedad relativa

P_v : Porción de agua o vapor medido

P_{sat} : Porción de saturación de agua

Humedad específica (h_e): Es la relación entre la masa de agua y la masa de la sustancia seca expresada en Kg.

En estos sensores los más usados son de tipo resistivos y capacitivos. Para el sistema se emplearán dos sensores de humedad, uno que medirá la cantidad de agua en el ambiente y otro que medirá la cantidad de agua en el sustrato.

El sensor de humedad de contacto, también conocido como higrómetro resistivo sirve para medir la cantidad de humedad en una sustancia o gas. Así como cantidad de vapor de agua presente o la cantidad de agua absorbida por un sólido. En el mercado se pueden encontrar distintos sensores de este tipo; para el proyecto se propone el sensor de humedad, modelo V2 [33], Figura 4.5.



Figura 4.5. Sensor de humedad de contacto.

El sensor de humedad de contacto está constituido por dos electrodos depositados en un circuito impreso, y al introducirse en la sustancia varía la resistencia eléctrica entre ellos, así la corriente que circula a través de ellos depende de la cantidad de humedad en la sustancia; con esto se puede determinar que a mayor cantidad de agua mayor conductividad y flujo de corriente. Sus características principales son: Voltaje de polarización de 3.3 V - 5 V, salida analógica preamplificada dentro del rango de la alimentación. Esta señal analógica será acondicionada con una tarjeta específica, para su conversión digital y transmisión I²C, lo cual documentamos en el Capítulo 6.

4.2.3 Sensor de luz

Los transductores fotoeléctricos varían al cambio de la intensidad de la luz, uno de los más conocidos es la fotorresistencia, resistencia dependiente de la luz (LDR) o fotoconductor, su principio de funcionamiento se basa en la variación de la resistencia eléctrica de un semiconductor al incidir en él radiación óptica [34]. Otro tipo de sensores de luz son los fotodiodos, consistentes en la unión de semiconductores que cambian su conductividad eléctrica al hacer incidir la luz en ellos, excitando a los electrones, provocando un salto de la banda de valencia a la banda de conducción, aumentando la conductividad. Para definir el modelo matemático del sensor se requiere calcular la energía de la radiación óptica necesaria para mover los electrones y generar un efecto fotoconductor.

El modelo matemático de la LDR se representa con la ecuación, donde R es la resistencia en ohm [Ω], A y α constantes que dependen del semiconductor empleado por el fabricante y E es la densidad superficial de energía recibida por el sensor y expresada en luxes [lx].

$$R = AE^{-\alpha} \quad (4.5)$$

R: Es la resistencia [Ω]

A: Constante, valor depende del tipo de semiconductor

α : Constante, valor depende del tipo de semiconductor del sensor

E: Densidad superficial de energía recibida [Lx]

Las características de evaluación eléctricas, se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Características eléctricas - ópticas de una fotorresistencia.

Resistencia a exposición de 10 Luxes (a 25 °C)	45~140 K ohm
Resistencia en la oscuridad a 0 Luxes	10M ohm (min)
Evaluado en una gama de 100 - 10 Lux	0.8 lx
Potencia disipada (a 25 °C)	100 mW
Voltaje máximo (a 25 °C)	150 V
Pico de respuesta espectral (a 25 °C)	540 nm
Rango de temperatura ambiental	-30 ~ +70 °C

Para el acondicionamiento electrónico de estos sensores resistivos se implementan divisores de voltajes y/o un puente de Wheatstone, solos o con un amplificador operacional para ajustar la ganancia y en caso de ser necesario, se convierte el dato a digital.

Su aplicación es amplia, comúnmente se emplean para contar objetos en la industria automotriz y la domótica para el control de luminarias. Existen otros tipos de sensores sensibles a la luz como el fotodiodo o el fototransistor los cuales implican sus propios métodos de polarización y acondicionamiento de la señal.

Para medir la luz se propone el sensor inteligente TSL2591 [35], el cual es un sensor fotoeléctrico de dos canales. Consta de un fotodiodo de luz visible, un fotodiodo de luz infrarroja y cuenta con comunicación I²C.

El sensor de luz digital TSL2591 de la marca AMS [36], es un circuito que convierte la luz en una salida de señal digital I²C. Combina un fotodiodo de banda ancha de luz visible y un fotodiodo de respuesta infrarroja en un circuito integrado CMOS. Por medio de dos convertidores analógicos a digital (ADC) convierte las corrientes de los fotodiodos en una salida digital [37]. En la Tabla 4.5 se describe la función de las terminales del sensor.

Tabla 4.5. Descripción funcional de las terminales del sensor.

Terminal	Nombre	Descripción
1	SCL	Terminal de entrada serial I ² C, reloj de la comunicación
2	INT	Interrupción - Salida de drenaje abierto (Activo en bajo)
3	GND	Tierra de la fuente
4	NC	No se conecta
5	VDD	Voltaje de la fuente
6	SDA	Dato serial I ² C

En la Figura 4.6 se muestra el diagrama a bloques del sensor TSL2591, el sensor cuenta con una terminal de salida de "drain" abierto, con la finalidad de interface con el sistema que recibe el dato, esta señal se puede configurar para diferentes funciones de acuerdo a necesidades de usuario y aplicación.

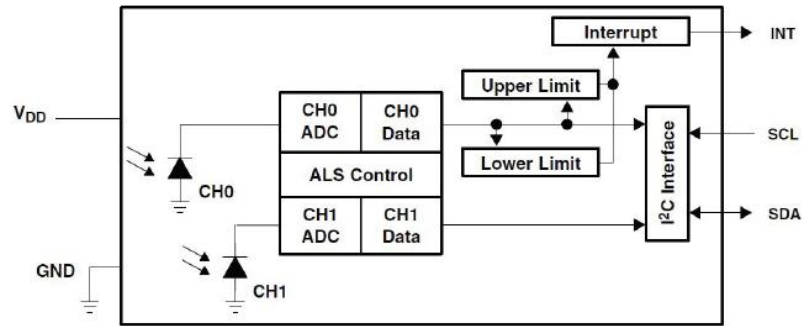


Figura 4.6. Diagrama a bloques del sensor TSL2591.

Los ADC convierten las corrientes de dos fotodiodos simultáneamente. Al finalizar el ciclo de conversión, el resultado se transfiere a los registros de datos del Canal 0 y del Canal 1. La transferencia se realiza con doble búffer para asegurar la integridad de los datos. Después de la transferencia, el dispositivo inicia automáticamente el siguiente ciclo de adquisición de datos.

La comunicación con el dispositivo se realiza por un bus serie I²C estándar de dos hilos. No se requieren circuitos externos para el acondicionamiento de la señal debido a que la salida del dispositivo es digital.

El sensor tiene una función de interrupción que simplifica y mejora la eficiencia del sistema, el propósito principal de la función es detectar un cambio significativo en la intensidad de la luz, definido por el usuario en términos de intensidad de luz y tiempo, o llamado “persistencia del cambio de intensidad”, Esta función de interrupción programable, se puede usar para aplicaciones de sensores de presencia, entre otras.

La programación de interrupción del sensor, tiene la capacidad de definir dos conjuntos de umbrales, tanto por encima del nivel de luz actual como por debajo.

Tabla 4.6. Características principales del sensor de luz TSL2591.

Doble diodo
Ganancia analógica programable
Interrupción interna de las fuentes
Umbral superior e inferior programable
Uso selectivo de reposo (3.0 μ A)
Tasa de datos de hasta 400 K bits/s
Voltaje de entrada 3.0V (3 - 3.8 max V)
Compatible con modo rápido I ² C.

El sensor de luz digital TSL2591 se considera un sensor inteligente y que a diferencia de un sensor analógico se encuentra acondicionado.

4.2.4 Sensor de nivel (medición del nivel de agua en tanque de nutrientes)

En la industria la medición de niveles es muy importante para mantener el control y el balance de las sustancias que pueden ser sólidos, líquidos o una mezcla de ambos; como es el caso de las aguas negras. Los sensores de nivel son aplicados en sistemas de envasado de sustancias, en la industria automotriz estos sensores se emplean en la medición de niveles de líquidos de frenos, agua, aceite y gasolina que son esenciales para la seguridad y el buen funcionamiento del automóvil.

Esencialmente un sensor de nivel es un dispositivo que detecta la medida de una cantidad con referencia a una escala determinada y la transmite adecuadamente.

Existen distintos métodos para medir nivel de sustancias como son: capacitivos, inductivos, piezoeléctricos, resistivos, magnéticos, ultrasónicos y ópticos. El principio de funcionamiento del sensor determina la forma en que se mide la cantidad de sustancia ya sea directa o indirectamente. La forma más simple es introducir una escala en el tanque, relacionando la cantidad de líquido y el volumen, pero este método no es muy útil en la automatización de sistemas electrónicos, por lo cual se emplea sensores que proporcionan una señal eléctrica en su salida.

Para determinar el nivel de agua en el depósito del sistema, se empleará el sensor de presión MPX10 de Freescale Semiconductor [38]. El objetivo es determinar la presión que ejerce el agua del tanque respecto a la presión del medio ambiente; relacionando la cantidad de agua, el volumen del tanque y por consecuencia el nivel.

El sensor de presión MPX10 tiene un principio de funcionamiento piezorresistivo. Consiste en el cambio de resistencia cuando se somete a estrés mecánico y sufre deformación. Está constituido por una membrana de silicio sujeto a una oblea de silicio, sobre otra membrana,

cerca de los extremos, se integra la piezorresistencia junto con otras tres resistencias para formar un puente de Wheatstone, al aplicar una diferencia de presión se deforma produciendo una tensión o compresión en la resistencia. La variación de la resistencia es proporcional a la diferencia de presión, por lo que, conociendo la constante de proporcionalidad se puede determinar la presión a partir del cambio de resistencia registrado; La polarización y valores de las resistencias depositadas presentan una salida diferencial lineal dentro del rango de operación, también contiene una compensación a variaciones por temperatura [39].

La Figura 4.7 muestra un esquema de la membrana de silicio donde se depositan la piezorresistencias.

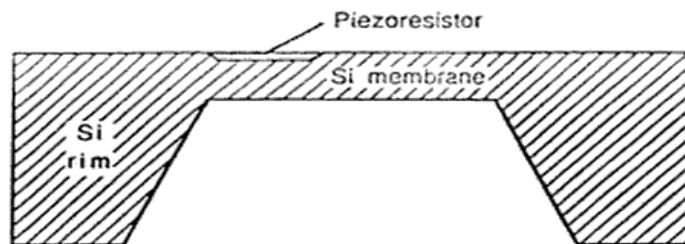


Figura 4.7. Sensor de presión piezorresistivo.

La base teórica para medir el desbalance de las resistencias eléctricas R dentro del puente de Wheatstone considera las propiedades físicas de las áreas depositadas en la membrana: la longitud l , la sección A y resistividad ρ del material. La Figura 4.8 muestra el esquemático del sensor, de tal manera que el voltaje diferencial de salida (entre $+V_o$ y $-V_o$) es de acuerdo a la gráfica que se muestra la Figura 4.9 (diferencial de presiones y voltaje de salida del puente).

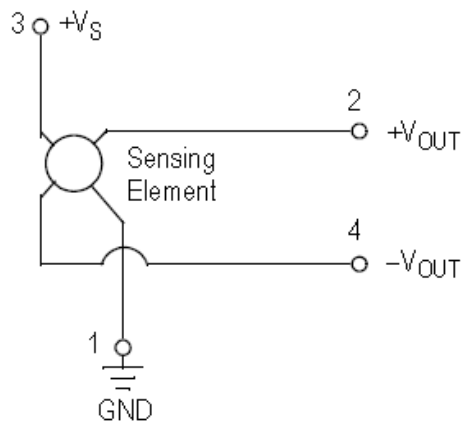


Figura 4.8 Esquemático del sensor.

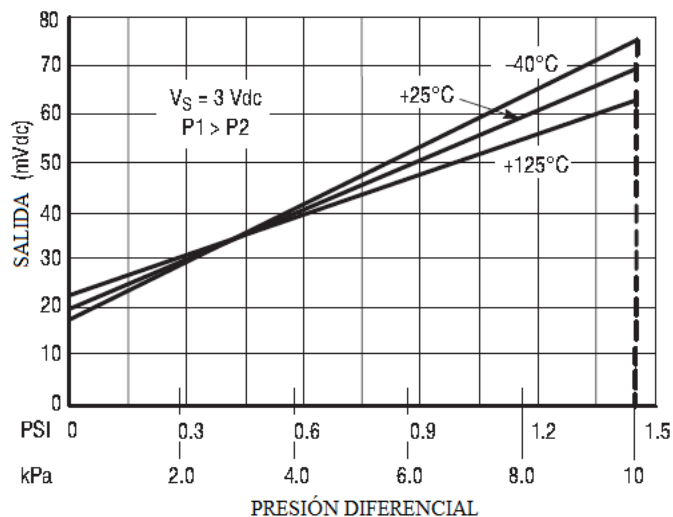


Figura 4.9 Gráfica de voltaje de salida.

El MPX10 es un sensor de presión de bajo costo, de fácil acondicionamiento electrónico, su salida es un voltaje directamente proporcional a la diferencia de presiones. El sensor está dentro de un encapsulado entre las dos presiones, la atmosférica y la presión a medir.

El voltaje diferencial de salida del sensor aumenta con la presión creciente aplicada en (P1) respecto al lado de vacío (P2). De forma similar, la tensión diferencial de salida aumenta a medida que se aplica un vacío creciente en (P2) con respecto al lado de presión (P1). Debido al medidor de deformación que es parte integral del diafragma de silicio, no hay efectos de la temperatura ambiental, sólo en caso extremo debe ser compensado.

La presión debe estar en el rango de funcionamiento especificado. En caso de requerir medir la linealidad del sensor, en aplicaciones específicas, algunos fabricantes de este sensor proponen diferentes métodos, para considerar escala, pendiente de la recta, punto medio de medición y el rango medido de la presión.

En razón de que el fabricante designa a P1 como entrada y a P2 como el vacío, se debe considerar, colocar la presión mayor a la entrada P1 ($P1 > P2$). [40].

En la Figura 4.10 se muestra un esquema del encapsulado del sensor MPX10D, así como un corte transversal donde se muestra el interior.

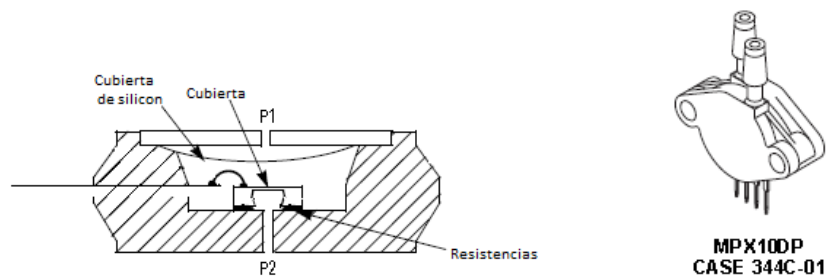


Figura 4.10. Sensor de presión MPX10D.

En la Tabla 4.7 se muestran las principales características de operación del sensor.

Tabla 4.7. Principales características del sensor de presión MPX10D.

Características	Símbolo	Mínimo	Típica	Máxima	Unidades
Rango presión diferencial (1)	Pop	0	-	10	KPa (Kilo pascales)
Voltaje de fuente (2)	Vs	-	3.0	6.0	VDC
Escala máxima (3)	Vfss	20	35	50	mV
Offset (corrimiento) (4)	Voff	0	20	35	mV
Sensibilidad	$\Delta V/\Delta P$	-	3.5	-	mV/KPa
Linealidad	-	-1.0	-	1.0	% Vfss
Histéresis de la presión (0 a 10 KPa)	-	-	∓ 0.1	-	% Vfss
Histéresis de la temperatura	-	-	∓ 0.5	-	% Vfss

1. 1.0 K Pa (kilo Pascal) es igual a 0.145 psi.

2. Debe estar dentro del rango para evitar agregar error en la medición.

3. El Vfss se define como la diferencia algebraica entre la tensión de salida a plena presión nominal y la tensión de salida a la presión nominal mínima. Para uso en medición de la linealidad.

4. Offset (Voff) se define como la tensión de salida a la presión nominal mínima.

Una aplicación interesante se da en los sistemas automotrices, en el motor, específicamente en el colector (múltiple) de admisión por donde fluye el aire a las cámaras de combustión, se coloca un sensor denominado sensor de presión de aire del colector (MAP) (Manifold Air Pressure) [41]. Este sensor mide la presión de los gases y envía una señal a la computadora que controla la combustión; que en conjunto con el compresor, inyectores, y bobinas de

corriente, mantiene la combustión del motor. Otras áreas de implementación: sistemas de control ambiental, instrumentación médica, sistemas neumáticos y robóticos, etc.

Este sensor en conjunto con un amplificador diferencial y además un convertidor analógico/digital con comunicación I²C se implementó para enviar el dato de nivel de agua en el tanque del invernadero, circuito que se muestra en el Capítulo 6.

4.3 Actuadores

Los actuadores a emplear en el presente sistema son los siguientes: bomba de agua, ventiladores y los LEDs.

Los actuadores son dispositivos que transforman la energía presente en el medio a movimiento, capaz de generar una fuerza, cambio de posición, velocidad y aceleración, provocando variaciones de estado en un sistema. Se pueden clasificar por el tipo de energía que utilizan: eléctricos, hidráulicos y neumáticos, esta clasificación se resume en la Tabla 4.8.

Se emplean en la automatización de procesos, generan movimiento rotacional o lineal accionando mecanismos de sistemas para la manipulación de objetos o sustancias.

A continuación se hace una descripción del principio de funcionamiento según su clasificación por energía empleada.

Tabla 4.8. Clasificación de actuadores.

Tipo de actuador	Energía empleada	Ejemplo
Actuadores Eléctricos	Electricidad <ul style="list-style-type: none"> • CD • CA • Paso a paso • Lineales 	Conmutación Solenoides Motores
Actuadores Hidráulicos	Fluidos <ul style="list-style-type: none"> • Lineales • Giro 	Cilindros Motores Válvulas
Actuadores Neumáticos	Aire a presión <ul style="list-style-type: none"> • Lineales • Giro 	Cilindros Motores Válvulas

El desarrollo tecnológico actual ha creado actuadores híbridos modernos, que incluyen a los sensores, formando un par sensor/actuador, se les agrupa en tres sectores: electromecánicos, electrohidráulicos y electroneumáticos. Los electromecánicos tienen una parte mecánica que permite la conmutación de corrientes y tensiones mayores a las de control, por ejemplo los relevadores y motorreductores que integran un conjunto de engranes que reducen la velocidad del motor pero a su vez proporciona torque en el eje del motoreductor. En los tres tipos de actuadores se han integrado sensores para determinar su posición, velocidad, aceleración, par y circuitos electrónicos inteligentes, que permiten guardar información del actuador para ajustes, diagnóstico, referencias de inicio/protección, entre otros.

Lo más reciente en actuadores son los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS), fabricados con procesos similares a los circuitos integrados, creando microdispositivos mecánicos, microsensores, microactuadores y circuitos auxiliares dentro de los mismos. Los MEMS son creados en distintos materiales: vidrio, cerámica, polímeros, metales y silicio. Con la tecnología MEMS se pueden crear microsistemas que incluyen sensores, actuadores, circuitos electrónicos, que procesen las señales del sensor y realice acciones por medio del actuador [42].

4.3.1 Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos transforman la energía eléctrica en energía mecánica, su principio de funcionamiento se basa en la fuerza sobre elementos mecánicos sometidos a campos magnéticos variantes con el tiempo. De acuerdo a la ecuación de Lorentz, mostrada en la ecuación 4.6.

$$\mathbf{F}_E = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (4.6)$$

Donde:

q : Carga eléctrica [C]

\mathbf{v} : Vector de velocidad [m/s]

\mathbf{E} : Campo eléctrico [N/C]

\mathbf{B} : Campo magnético [T]

Los actuadores eléctricos se clasifican por la naturaleza de la energía, ya sean de corriente alterna (CA), corriente directa o continua (CD / CC). Dentro de cada clase se dividen en categorías de acuerdo a sus elementos comunes. Para fines del presente sistema se emplearán máquinas eléctricas (motores de CD), aunque estrictamente no son actuadores se emplean como tal debido a que transforman la energía en movimiento. En la Tabla 4.9 se muestra la clasificación de los motores de CD por el tipo de excitación.

Tabla 4.9. Clasificación motores CD.

Motor eléctrico	Tipo Excitación
CD/CC	<ul style="list-style-type: none">• Independiente• Serie• Paralelo• Compuesta

Los actuadores eléctricos más empleados son los motores y el tema a desarrollar se centra en los motores de CD de imán permanente debido a su aplicación en el proyecto. Sería muy extenso abordar cada uno de estos actuadores, por tal motivo sólo se realiza la descripción del motor de interés.

Motor de corriente directa: Un motor de CD recibe corriente eléctrica directa y la transforma en energía mecánica de rotación, conocida como la fuerza de Lorentz, donde en lugar de la fuerza mecánica sobre una carga, se sustituye por la fuerza sobre un conductor de corriente. La fuerza mecánica sobre un conductor de corriente dentro de un campo magnético se representa en la ecuación 4.7.

$$F = l IB \quad (4.7)$$

Donde:

F: Fuerza mecánica [N]

l: Longitud del conductor [m]

I: Corriente [A]

B: Densidad de campo magnético [T]

La ecuación de Lorentz es indispensable para comprender el funcionamiento de un motor, donde se especifica en términos vectoriales la dirección de la intensidad del campo magnético, el flujo de la corriente y la fuerza mecánica; para entender esta relación se puede utilizar la mano derecha (regla de la mano derecha), ponga su dedo pulgar, índice y medio con un ángulo recto (90°) entre sí, el dedo índice apunta en dirección de la corriente, el dedo medio apunta en dirección del flujo del campo magnético, por lo tanto el dedo pulgar indica la dirección de la fuerza mecánica.

Otro apoyo importante que ayuda a comprender como funciona el motor [43], es la posición, permite entender cómo se realiza el giro y la conmutación de los devanados del rotor al girar sobre su eje, considerando que la fuerza mecánica produce un par en sentido de las manecillas del reloj. El esquema de la Figura 4.11 ilustra este principio de funcionamiento, y la ecuación 4.8 la fuerza generada de acuerdo a la posición angular.

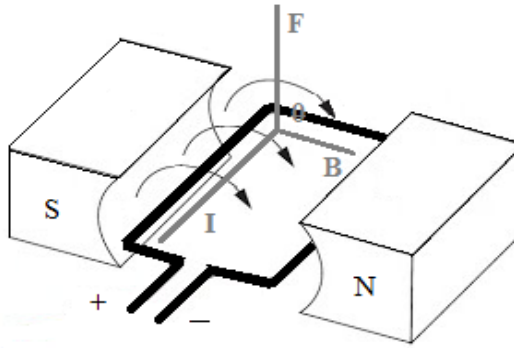


Figura 4.11 Esquema de posición.

$$F = BLI \text{ sen } \phi \quad (4.8)$$

F: Fuerza [N]

I: Corriente [A]

L: Longitud del conductor [m]

ϕ : Ángulo entre L y B

Iniciando el análisis en 90° , el conductor del lado derecho conecta al borne positivo de la fuente externa, conduce corriente hacia dentro de la página (\times), la corriente circula por el conductor y sale del lado izquierdo de la página (\bullet) que se conecta al negativo de la fuente; al aplicar la ecuación de Lorentz al conductor del lado derecho, resulta una fuerza hacia abajo, siguiendo la corriente en el conductor hasta el lado izquierdo se obtiene una fuerza hacia arriba y por lo tanto la fuerza mecánica mueve el rotor en sentido de las manecillas del reloj.

El rotor sigue girando hasta los 120° sin que haya cambio entre terminales, la fuerza sigue siendo de igual magnitud; pero la corriente, intensidad de campo magnético y el par no son los mismos debido a que la línea de aplicación de fuerza le produce un brazo de momento menor respecto al centro del eje, como el par es igual al producto de la fuerza por el brazo de momento, el resultado es la reducción del par.

En 180° se encuentra la posición de conmutación, las terminales hacen contacto con ambos lados del conmutador produciendo un par de giro cero debido a que las fuerzas pasan por el eje de rotación, por lo tanto tiene brazo de momento cero y no produce par, sin embargo sigue girando por inercia realizando la conmutación entre las escobillas y las secciones del conmutador.

En los 210° las escobillas han cambiado de segmento del conmutador, invirtiendo la dirección de la corriente en ambos lados del conductor, no obstante se mantiene el sentido del giro; la corriente entra por la escobilla positiva y sale por la escobilla negativa, de este modo, el campo magnético nunca cambia su dirección [44].

Los motores de CD de imanes permanentes están contruidos principalmente por dos partes, el rotor y el estator. Contiene otros elementos que a menudo no se mencionan al analizar el principio de funcionamiento pero son indispensables en la realidad para un correcto funcionamiento, estos son: armazón, colector, escobillas, rodamientos y tapas.

En los motores de CD se puede ajustar la velocidad, al regular el voltaje que alimenta la bobina, ya que el par de giro es directamente proporcional a la corriente que circula en el devanado. Así, al controlar la corriente aplicada se puede controlar la velocidad².

Los motores de CD deben tener mantenimiento en sus partes, para que su ciclo de vida se alargue, por ejemplo: los carbones que hacen contacto con el conmutador se desgastan por fricción [45].

Con una amplia área de aplicación en la automatización, control de procesos, robótica, vehículos inteligentes, celdas de manufactura, por mencionar algunas; son los motores eléctricos los dispositivos actuadores de mayor uso en la actualidad.

Específicamente en el proyecto se emplearán actuadores con motores de CD en una bomba de agua para controlar el riego de los cultivos, y también en dos ventiladores para mantener la temperatura y humedad ambiental al hacer circular el aire en el espacio de cultivo.

4.3.2 Actuadores hidráulicos

Los actuadores hidráulicos transforman la energía almacenada en un fluido a presión en trabajo mecánico, generando un desplazamiento lineal o angular, tienen una ventaja por su relación de potencia / peso. Su principio de funcionamiento se basa en hacer fluir un caudal por una red de tubos que provoca cambios de energía y presión en el sistema, y por el bajo valor de compresibilidad permite una alta precisión del movimiento y fuerza. El caudal del fluido establece la velocidad de desplazamiento y en combinación con la fuerza aplicada se produce trabajo, que combinado con el tiempo nos permite conocer la potencia. La ley de Pascal [46] es el principio de funcionamiento de los actuadores hidráulicos de transmisión, Pascal fue el primero en exponer el principio de transmisión uniforme: "la presión en un

² Sugerencia: Para comprender de una manera gráfica el principio de funcionamiento y las partes de las maquinas eléctricas de corriente directa de imanes permanentes, visita la página <http://www.learnengineering.org/> donde se muestran videos y animaciones tridimensionales de máquinas, entre ellas, los motores de CD.

líquido contenido dentro de un recipiente cerrado se transmite en todas direcciones con la misma magnitud", y se representa con la ecuación 4.9.

$$P = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (4.9)$$

Donde:

P: Presión [Pa]

F: Fuerza [N]

A: Área [m^2]

4.3.3 Actuadores neumáticos

Los actuadores neumáticos transforman la energía almacenada en el aire u otro gas comprimido, en trabajo mecánico, propiciando un desplazamiento lineal o angular. El aire se comprime ejerciendo fuerza sobre las paredes del recipiente, generando presión (principio de Pascal), esta presión se puede aprovechar en cualquier momento para generar fuerza.

Estos actuadores se clasifican en: cilindros lineales simples o de doble efecto, formados por el cilindro que contiene la presión y émbolos que se desplazan por el efecto de ésta, en movimiento rectilíneo de avance y retroceso realizando trabajo mecánico. La otra clase son de desplazamiento angular: motores neumáticos, que a su vez pueden ser de giro limitado y múltiples vueltas, con aletas o pistones radiales.

los actuadores neumáticos funcionan bajo el mismo principio de Pascal, la diferencia es el tipo de fluido, su compresión y por consecuencia la construcción mecánica.

En general tienen grandes ventajas, se pueden usar en condiciones ambientales adversas, son resistentes al calor, polvo y humedad, incluso en ambientes donde existe riesgo de explosión, o donde la temperatura es extrema. Son fáciles de controlar colocando reguladores de caudal y presión en las tuberías de alimentación. Las desventajas de estos sistemas son el costo energético, las instalaciones necesarias y elementos adicionales para su buen funcionamiento [47].

Los actuadores hidráulicos y neumáticos no se abordan con mayor profundidad debido a la competencia del tema proyecto de este trabajo, por lo cual sólo hicimos referencia a su principio de funcionamiento, características principales, clasificación, algunas ventajas y desventajas.

4.4 Actuadores utilizados en el proyecto

4.4.1 Bomba

Es una máquina o dispositivo electromecánico que se utiliza para impulsar agua u otro líquido o sólido en una dirección determinada. La bomba de agua hace el cambio de líquido de un lugar a otro, impulsando o succionando, de este modo trasfiere el trabajo del motor al líquido, realizando un desplazamiento por tuberías y elevándolo a determinada altura. Su característica básica de la bomba es su caudal o flujo volumétrico [48]. De manera general se puede decir que las bombas están compuestas de dos elementos esenciales, el cuerpo de la bomba y el impulsor formado por álabes, engranes o pistones que impulsan el agua, mecanismos que transportan el líquido con mínima transferencia de energía al fluido. Las bombas se clasifican en rotodinámicas y volumétricas. Las rotodinámicas son de flujo continuo y se dividen en centrifugas o radiales, axiales y de flujo mixto. Las volumétricas son mecanismos que impulsan el flujo de manera discreta, o sea, un volumen a la vez. [49].

El principio de funcionamiento de las bombas usa la ecuación de continuidad de flujos incompresibles ($A_1 v_1 = A_2 v_2$), donde A_1 y A_2 son las áreas de la sección transversal de las tuberías y v_1 y v_2 las velocidades respectivas del fluido. Si se quiere hacer un análisis tomando en cuenta la densidad, volumen y presión, la ecuación de Bernoulli [50], que no es otra cosa que la conservación de la energía, es la base para hacerlo. Ecuación 4.10.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2 \quad (4.10)$$

Donde:

P = Presión atmosférica

ρ = Densidad del líquido

v = Velocidad

g = Gravedad

y = Altura de la superficie del líquido

Con la ecuación de continuidad aplicada a la bomba se puede calcular el gasto volumétrico para mantener la bomba trabajando un determinado tiempo. En el proyecto vamos a considerar un control simple de niveles con el sensor de presión, y controlar la humedad necesaria para mantener el cultivo vivo.

4.4.2 Ventilador

Aparato con aspas o álabes montadas en un eje giratorio que impulsa o remueve aire u otros gases. Los ventiladores remueven el aire en sistemas de ventilación, calefacción o aire acondicionados. Se pueden clasificar en ventiladores centrífugos, axiales y de propulsión. Los ventiladores empleados en el sistema, están formados por un motor y rotor con aletas o hélices, como los que se emplean en las viviendas [51]. Su característica principal es que impulsan el aire de forma paralela al eje del motor moviendo grandes cantidades de fluidos (aire), pero con poca presión.

El cálculo del caudal del aire se analiza como si fuera agua en una máquina hidráulica considerando incompresible el gas, por lo tanto, la densidad permanece constante [52].

La aplicación de ventiladores en los invernaderos es necesaria para renovar y mantener un ambiente deseado, cuando la temperatura y la humedad están por encima de lo establecido se introduce aire del exterior para bajar la temperatura y la humedad, funcionando como extractor. En caso contrario si la temperatura se encuentra por debajo de lo establecido se introduce aire caliente desde un calefactor externo controlando el clima del invernadero, adicionalmente se cambia la humedad en el aire y el suelo al aplicar ventilación forzada en combinación con la corriente natural del aire por ventanas [53].

4.4.3 Iluminación

En física la iluminación es el efecto que produce la luz. Luz se define como la parte del espectro radioeléctrico de frecuencias ópticas y por tanto descrito por la teoría electromagnética; un campo magnético que varía en el tiempo origina un campo eléctrico, y un campo eléctrico que cambia con el tiempo genera un campo magnético, de este modo, ambos campos forman una onda electromagnética que se propaga a través del espacio o línea de transmisión, como las ondas de radio o luz de una fuente luminosa.

Una característica importante de las ondas radioeléctricas, incluidas las ópticas, es la frecuencia (f). Se mide en Hertz, que es la cantidad de repeticiones de una onda en un segundo. Otra característica importante es la longitud de onda (λ), que es la medida de desplazamiento de la onda en el espacio o línea de transmisión. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, esto quiere decir que una onda electromagnética a mayor frecuencia tiene menor longitud de onda e inversamente. La longitud de onda es la velocidad de la onda entre la frecuencia, ecuación 4.11.

$$\lambda = v/f. \quad (4.11)$$

v : Velocidad de la luz [Km/s]

f : Frecuencia [Hz]

La luz incluye las frecuencias visibles para el ojo humano, tiene una longitud de onda entre 400 (color violeta) a 700 (color rojo) nm o frecuencias de 750 a 430 THz ($1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$) aproximadamente [54]. El comportamiento de la luz se analiza a partir de la teoría de ondas descrita por las ecuaciones de Maxwell; no es el objetivo de este proyecto dicho análisis, simplemente es entender que es la luz, elemento sustancial necesario para el desarrollo de cultivos.

La iluminación artificial en los invernaderos, en sí misma, un área que ha sido objeto de investigación muy amplia en los cultivos. La selección de determinadas frecuencias de ondas o colores a cultivos específicos, tiempos de exposición del cultivo, ciclos, entre otros, no son tema del presente proyecto; se propone un sistema de tres colores para que en su momento se puedan realizar algunos algoritmos de control sobre la iluminación del cultivo.

La iluminación artificial se produce con lámparas cuyo principios físicos de funcionamiento permiten una clasificación: las lámparas incandescentes, que usan el principio de incandescencia, es decir, se calienta un elemento hasta que produce luz visible. Las lámparas de descarga en gas, que produce un arco eléctrico en un gas que al ionizarse produce luz. Las lámparas de inducción, producen luz al ionizar gases dentro de un campo magnético. Las lámparas fluorescentes, son lámparas de descarga que producen luz ultravioleta y esta luz incide en una cubierta de fósforos que transforman la luz ultravioleta en luz visible (fosforescencia). Y actualmente las lámparas de estado sólido LED (Light Emitting Diode), Diodo Emisor de Luz, semiconductores como arseniuro, que al circular corriente en él se desprenden fotones, tienen un cubierta de fósforo para transformar la emisión de fotones (emisión en color azul) en luz visible.

Los parámetros básicos de las fuentes luminosas artificiales son: el flujo luminoso, energía total irradiada por unidad de tiempo, se mide en lumen (lm). La intensidad luminosa, es el flujo luminoso emitido en una dirección determinada y se mide en candelas (cd). La iluminación, es la densidad de flujo luminosos sobre una superficie (lm/m^2), su unidad de medición es el lux [55].

Otros dos parámetros para determinar la calidad de iluminación en las fuentes artificiales son la Temperatura de Color y el Rendimiento de Color; la temperatura de color es una analogía con el color que se ve cuando se calienta un cuerpo a determinada temperatura, yendo del rojo hasta el azul (de 2000 hasta 7000 K); el rendimiento de color es la capacidad de la lámpara para reproducir fielmente los colores que ilumina, depende mucho del tipo de lámpara, en las que usan fósforo, la calidad de los mismos fijan este rendimiento, se expresa con valores de 70 a 100 Ra (índice de reproducción cromática), donde 100 es la reproducción cromática fiel al 100 %.

Lámpara: rojo, azul y blanco

Para la iluminación en el invernadero propuesto usaremos un sistema de tres LED: rojo, azul y blanco. El LED es un dispositivo formado por la unión de dos cristales, con elementos naturales específicos, como el Arsénico y Galio, entre otros. Su principio de funcionamiento se basa en la liberación de electrones del cristal N (cargas libres negativas o electrones) que saltan la banda de conducción al cristal tipo P (cargas libres positivas o huecos) liberando energía al aplicar un potencial de CD. La energía liberada en radiación electromagnética (fotones) es proporcional a la frecuencia de radiación y por consecuencia da un color emitido [56]. Los LEDs tienen ventajas sobre los otros sistemas de iluminación como eficiencia energética (lm/Watt) superiores a 90%, amplia gama de colores, libres de mantenimiento, baja emisión de CO_2 , tamaño y peso reducido, mínimas pérdidas de energía en calor (luminiscencia), tiempo de vida prolongado (mayor a 10,000 hrs) y mejor control de iluminación [57].

El objetivo de emplear iluminación artificial en invernaderos es aumentar la exposición a la luz (fotoperiodo) y acelerar el crecimiento de los cultivos por medio de la fotosíntesis, para producir cultivos fuera de fecha o producir todo el año incluso en espacios sin exposición a la luz del sol. Para fines del proyecto se emplearán lámparas LED debido a las características antes mencionadas, y de este modo cubrir los requerimientos de iluminación de un cultivo de vegetales.

Para la investigación de este proyecto, se tiene como propuesta el uso de los colores rojo, azul y blanco, ya que se usan el rojo y el azul en cultivos específicos y para emular lo más posible la luz natural, el blanco (con sus respectivas limitantes en temperatura de color y rendimiento de color).

4.4.4 Calefactor / Enfriador

Celda Peltier: El módulo de Peltier está formado por semiconductores P-N conectados entre sí con dos soldaduras de metales diferentes (uniones de Peltier) y térmicamente en paralelo, provocando una diferencia de temperatura en la unión de los semiconductores (en la unión), al aplicar una diferencia de potencial, un extremo se enfría y el otro se calienta [58]. Este fenómeno se conoce como efecto termoeléctrico. Genera una diferencia de temperatura a causa del flujo de una corriente por la unión de dos metales diferentes, por lo cual la absorción o emisión de calor es proporcional al flujo de corriente.

En la celda Peltier intervienen otros efectos físicos: el efecto Seebeck (conversión de diferencia de temperatura en potencia eléctrica) y el efecto Joule (calentamiento de un conductor por circulación de una corriente eléctrica, pérdidas). Los efectos se relacionan de la manera siguiente: intervienen las temperaturas de las uniones de Peltier (metales), materiales,

resistencia eléctrica, flujo de corriente; dando una potencia en la celda de acuerdo a la ecuación 4.12 [59].

$$P = \alpha I \Delta T + I^2 R \quad 4.12$$

Donde:

P = Potencia ($P=IV$) [W]

α = Coeficiente Seebeck (variación de la fuerza electro motriz en la diferencia de temperaturas entre dos uniones) [V/K]

ΔT = Diferencia de temperaturas entre el lado caliente y el lado frío de la unión ($T_c - T_f$) [°C]

I = Corriente [A]

R = Resistencia eléctrica de la celda Peltier [Ω]

Para abundar en los principios y aplicaciones de la celda Peltier, referirse a la hoja de datos técnicos que vamos a usar en el proyecto y sus aplicaciones [60] [61]. En el referido documento se presenta una gráfica que proporciona el calor generado en la celda de acuerdo a la corriente que fluye en la unión. La Figura 4.12 muestra un esquema de la superficie donde se absorbe la energía térmica que enfría y la superficie opuesta donde se libera la energía térmica que calienta.

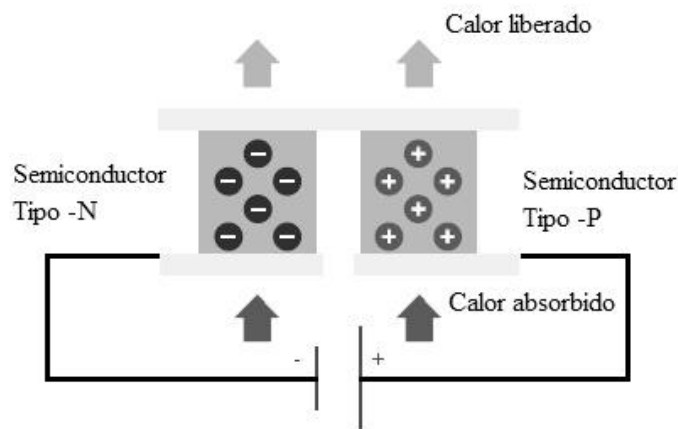


Figura 4.12. Celda Peltier.

Este fenómeno es más usado para la refrigeración y pocas veces para la calefacción, sin embargo, se puede emplear en un mismo espacio con ventilación forzada para modificar el clima; el cual se define como el conjunto de condiciones atmosféricas producidas por el hombre, como la temperatura, la humedad y el viento, regulada en lugares cerrados por medio de máquinas de calefacción o refrigeración para generar condiciones ambientales deseadas.

CAPÍTULO V. CONTROL Y RASPBERRY PI

5. ¿Qué es la Raspberry Pi?

La Raspberry Pi (RP) es una computadora de bajo costo del tamaño de una tarjeta de crédito, utiliza un monitor, teclado y mouse como cualquier otra computadora, integra puertos y periféricos. Diseñada con el propósito de la enseñanza a niños y adultos en el campo de la computación, informática y programación. Una de las cualidades agregadas relevantes para hacer aplicaciones, es su puerto general de interface (General Purpose Input Output, GPIO), que permite interactuar con el exterior por medio de entradas y salidas digitales, a este puerto se pueden conectar periféricos como: Sensores, actuadores, display, teclados, entre otros; permitiendo adquirir señales o interactuar con el exterior [62].

5.1 Características generales

Esta pequeña computadora cuenta con características de hardware que la hacen veloz y versátil por su conectividad. Sus principales especificaciones técnicas son:

- Procesador (CPU) Quad Core 1.2 GHz Broadcom BCM2837 64 bit
- Memoria RAM de 1G
- Comunicación inalámbrica, LAN y Bluetooth
- Entradas y salidas de propósito General (GPIO) 40 terminales
- Cuatro puertos USB 2.0
- Salida de video compuesto y HDMI
- Puerto de cámara CSI
- Puerto de memoria Micro SD
- Alimentación micro USB 5 V, 2.5 A
- dimensiones 85x56 mm

En la Figura 5.1 se muestra una fotografía de la computadora Raspberry Pi. A simple vista se puede observar los puertos GPIO, USB HDMI y LAN.

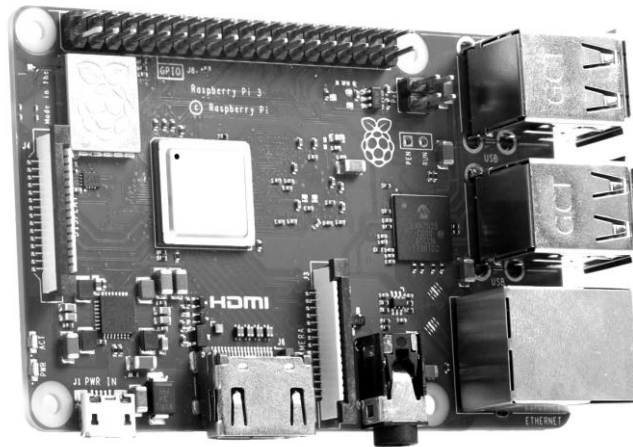


Figura 5.1 muestra la computadora Raspberry Pi.

Las RP es parte fundamental del presenté sistema, ya que realiza las funciones de control del invernadero, además de la interface con la PC, usuario, web entre otras.

5.2 Lenguaje de programación Python

Python es un lenguaje de programación con una sintaxis clara que favorece un código legible, es un lenguaje interpretado que se ejecuta utilizando un programa intermedio (interprete) en lugar de compilar el código en lenguaje máquina directamente, por lo tanto el código fuente se traduce a un pseudo código máquina, generando archivos (.pyc o .pyo) que se pueden ejecutar posteriormente. No es necesario declarar el tipo de dato que va a contener una variable, este se determina en la ejecución según el valor asignado; y el tipo de variable puede cambiar si se le asigna otro tipo (una misma variable puede tomar distintos valores en distintos momentos), tampoco permite tratar a una variable como si fuera de un tipo distinto al que tiene, es necesario cambiar de forma dicha variable previamente (no se permiten violaciones de los tipos de datos); además es un lenguaje orientado a objetos donde el modelo de programación es trasladar las ideas en clases y objetos [63].

Python es un lenguaje de programación que nos permitirá configurar los puertos GPIO, configurar los sensores y asignar una salida a los actuadores; es decir, es la plataforma de programación, en la cual se construirán los algoritmos de control del sistema.

5.3 Sistema operativo (SO) de la RP

La distribución oficial de sistema operativo para RP es Raspbian, debido a que está diseñado específicamente para la misma y se actualiza constantemente, sin embargo existen otras plataformas, como: Ubuntu Mate, Snappy Ubuntu Core, Windows 10 IOT CORE, Centro de Medios de Código Abierto (OSMC), LIBREELEC, son alternativas para usuarios experimentados en el software libre.

El SO es el programa base de una PC que facilita la interacción entre el usuario y los demás programas como Python y los dispositivos de hardware conectados a los puertos, en nuestro caso los sensores, actuadores, teclado, mouse y monitor.

5.4 Puerto de propósito general de entrada / salida (GPIO)

El puerto GPIO es una interface con el exterior de terminales digitales de la RP, configuradas como entradas que reciben señales de sensores o algún otro dispositivo, en configuración de salida se puede enviar una señal a algún dispositivo, con los dos estados: alto (3.3V) o bajo (0V). De los 26 pines, diecisiete son GPIO; los otros son tierra (GND) y alimentación (3.3 o 5V). Casi todas las terminales de este puerto son multifuncionales. Para entender la función de cada terminal se debe consultar el diagrama correspondiente, donde se especifica las funciones que puede realizar cada terminal del puerto GPIO [64]. Las terminales pueden proporcionar o recibir hasta 50 [mA] con alimentación a 3.3V.

5.5 Comunicación I²C

El bus I²C (Circuito interintegrado) es un protocolo de comunicación que permite a los circuitos comunicarse por medio de dos cables (línea del bus) bidireccionales, resuelve de manera eficiente la comunicación entre circuitos inteligentes de control digital. Este bus de comunicación tipo industrial lo contiene la RP. Sus características principales son: requiere dos líneas de comunicación; la línea de datos en serie (SDA) y una línea de reloj en serie (SCL) conectadas a un voltaje de suministro por medio de una fuente de corriente o una resistencia pull-up; cada dispositivo conectado al bus se reconoce por una dirección única y puede funcionar como transmisor y receptor, los dispositivos mantienen relaciones maestro / esclavo (más de un dispositivo es capaz de controlar el bus), la comunicación incluye detección de colisiones y el arbitraje de datos, transferencias de datos bidireccionales en serie de 8 bits con una velocidad de transmisión de hasta 100 kbit/s en el modo estándar. Las líneas del bus incluyen filtrado en el circuito integrado (CI) para rechazar picos y ruido en la línea de datos.

Para entender el funcionamiento de la interface I²C es necesario hacer la diferencia entre cómo se conectan los dispositivos y cómo se transmiten los datos. La transferencia de datos del maestro al esclavo, funciona de la siguiente forma: El maestro como transmisor llama al esclavo receptor por su nombre (dirección única) solicitando realice una función (R/W), posteriormente el maestro finaliza la transferencia. En un segundo caso el maestro como receptor llama al esclavo solicitando mande los datos requeridos, en ese instante el maestro se comporta como receptor y el esclavo como transmisor. Terminada la transmisión de datos el maestro finaliza la transferencia (el maestro siempre genera el reloj y finaliza la transferencia). Este es el funcionamiento estándar del protocolo I²C.

Toda transmisión de datos comienza con un instrucción de inicio (START) (S) y termina con un alto (STOP) (P). Un cambio de estado de alto a bajo en la línea SDA mientras SCL es alto define una condición de inicio considerando a la línea ocupada. Un cambio de bajo a alto en SDA mientras SCL es alto define una parada considerando libre la línea. Cada dígito binario (Bit) en la línea SDA debe tener ocho Bit iniciando por el bit más significativo (BMS), cada Bit debe ir seguido por un bit de reconocimiento o acuse de recibo (acknowledge del ingles) (ACK), caso contrario no lo reconoce (NACK), este bit permite al receptor indicar al transmisor que el dato fue recibido y se puede enviar otro byte, la Figura 5.2 muestra los ciclos de transmisión, de acuerdo al protocolo descrito.

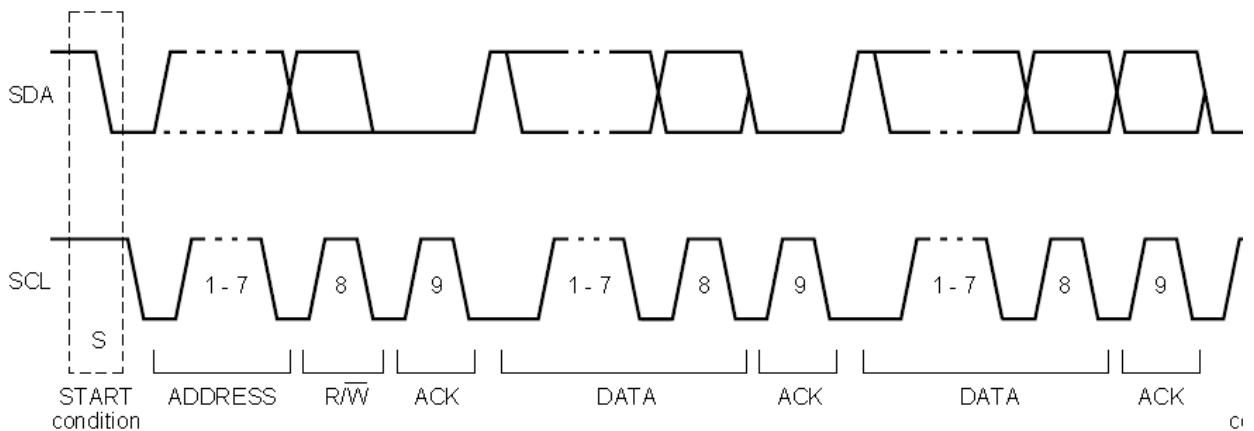


Figura 5.2. Trasmisión de datos por protocolo I²C.

Uno de los propósito de este protocolo es saber a quién se le va a dar la orden de escribir o leer datos (bit Read/Write). Dada la condición de inicio se envía una dirección de un esclavo (siete bits) seguida de un octavo bit (bit R/W) donde cero '0' indica escribir y uno '1' leer indicando la acción, seguido de un bit de reconocimiento, posteriormente el byte de datos y el bit de reconocimiento repetidamente hasta terminar la orden con una condición de parada dejando la línea libre de nuevo. Los niveles lógicos de SDA y SCL son cero '0' (bajo) y uno '1' (alto), se establecen basados en el nivel de VCC a un 30% y 70%, por lo tanto, el voltaje de entrada bajo es $0.3 \times VCC$ y el voltaje de entrada alto es $0.7 \times VCC$.

En caso de tener dos o más maestros conectados, existe un procedimiento de arbitraje para evitar corrupción de los datos, el primero en generar un uno lógico cuando el otro genera un cero lógico pierde el arbitraje, por medio de este mecanismo los maestros saben que está ocupado el bus y ningún dato es transmitido arbitrariamente, debido a que los relojes de los maestros se sincronizan, así la línea de datos sólo puede cambiar de estado cuando la señal de reloj es baja [65] [66].

Utilizar circuitos integrados con bus I²C tiene ventajas en el desarrollo de aplicaciones, por ejemplo: La interface I²C está integrada en los CI como microcontroladores, sensores y

actuadores considerados inteligentes, los sistemas se pueden modificar o actualizar simplemente conectando o desconectando los dispositivos del bus, el protocolo integrado de direccionamiento y transferencia de datos permite definir el funcionamiento del sistema por software, así como el diagnóstico de fallas de manera inmediata, consumo de corriente baja del orden de 3 [mA], inmunidad al ruido, amplio rango de voltaje y funcionamiento a temperaturas altas.

5.6 Técnicas de control

El control es una rama de las ciencias de la ingeniería mediante el cual se regulan sistemas (un sistema es un conjunto de elementos que interactúan con un fin común). En ingeniería, el control permite controlar procesos de manufactura en la industria como el control de flujo, humedad, presión, temperatura o pH. Su propósito es lograr el funcionamiento adecuado de sistemas dinámicos que realizan operaciones complejas, como la estabilidad y mando en barcos, aviones, naves espaciales y aplicaciones militares. El control no sólo se aplica a la ingeniería, también a campos como la biología, economía, medicina y sociología optimizando costos y tiempos.

El control tiene una base sólida de métodos donde su aplicación depende de los objetivos a alcanzar, por ejemplo: respuesta en frecuencia y el lugar geométrico de las raíces, métodos que se aplican a sistemas de una entrada una salida (SISO) con resultados esperados. Por su parte, la evolución de sistemas de control con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) los hace más complejos, debido a la cantidad de ecuaciones implicadas para encontrar una solución. Por último, existen métodos de control óptimo de sistemas determinísticos, estocásticos, así como: control complejo adaptativo y con aprendizaje, son considerados control moderno.

Para que un sistema de control se considere útil debe ser estable, con velocidad de respuesta amortiguada y reducir el error. El problema esencial del control es determinar una señal representada matemáticamente llamada ley de control, que sea óptima y cumpla con un índice de funcionamiento deseado, tome en cuenta las perturbaciones (señal que afecta la salida del sistema) y desviaciones respecto a un funcionamiento ideal. En el diseño del control es necesario conocer el funcionamiento, la dinámica del sistema y cada uno de sus elementos. Obteniendo el modelo matemático se puede simular en una computadora con señales y perturbaciones de prueba para observar su respuesta, así se puede proceder a realizar un sistema físico (prototipo) [67].

Una clasificación simple de control puede ser si-no (ON-OFF), proporcional (P), integral (I), proporcional e integral (PI), proporcional y derivativo (PD) y proporcional derivativo e integral (PID). Los sistemas de control automático consisten de un detector de error y amplificador de la señal de referencia y de error para obtener una señal que modifica la entrada del sistema y por tanto, la salida se ve afectada o controlada de acuerdo a la acción de la señal de control en correlación con la señal de realimentación y la señal de entrada (referencia). En la Figura 5.3 se muestra el diagrama a bloques de un control PID.

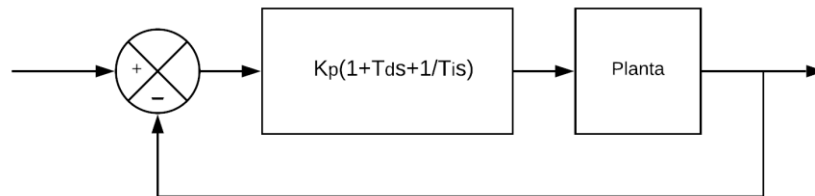


Figura 5.3. Diagrama a bloques de un control PID.

El propósito de introducir el tema de control PID es ampliar la posibilidad de aplicación a variables del sistema de este proyecto, ya sea en la temperatura, humedad, o iluminación como señal de referencia. Considerando los sistemas antes mencionados el controlador para cada una de estas variables se debe mantener dentro de un intervalo establecido empleando un sensor como elemento de medición de la salida. Si el controlador detecta cambios en la variable por medio de la salida del sensor determinando una señal de error, el controlador automático debe tomar una decisión para accionar el actuador y aumentar o disminuir la acción de corrección para mantener (control) la variable en un punto establecido u objetivo definiendo acciones.

Un controlador PID es un mecanismo con lazo de realimentación utilizado en sistemas de control industrial. El controlador PID calcula continuamente un valor de error (temperatura por ejemplo) $e(t)$ como la diferencia entre un punto deseado (SP) y una variable de proceso medida (PV) y aplica una corrección basada en términos proporcional, integral y derivada (denotados P, I y D, respectivamente) que dan su nombre al controlador.

Un control proporcional, integral y derivativo es un mecanismo de comprobación por realimentación que calcula la desviación entre un valor medido y el valor deseado, para ejecutar una acción correctiva que ajuste el proceso.

A continuación se realiza una breve descripción del control PID con el propósito de introducir y dar claridad de su operación, este control combina los resultados de la acción proporcional, integral y derivativa de la señal de error o desviación del objetivo, representado por la ecuación 5.1.

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (5.1)$$

Donde:

$m(t)$: Salida

K_p : Ganancia (sensibilidad proporcional)

$e(t)$: Señal de error actuante

T_d : Tiempo derivativo (intervalo de tiempo donde la velocidad se adelanta al efecto de acción proporcional)

T_i : Tiempo integral

Cuya función de transferencia se representa por la ecuación 5.2.

$$\frac{M(s)}{1E(s)} = K_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (5.2)$$

$M(s)$: Salida

$E(s)$: Entrada

La característica principal del controlador PID es que no necesita el modelo de la planta, utiliza los tres términos de error para el control, la parte proporcional, integral y derivada de la señal de salida, realiza su acción de control. Así el controlador intenta minimizar el error a lo largo del tiempo mediante el ajuste de una variable de control.

En este modelo de control el término P es proporcional al valor actual del error. Por ejemplo, si el error es grande y positivo, la salida de control será proporcionalmente grande y positiva, teniendo en cuenta el factor de ganancia K_p de la ecuación 5.1. El uso del control proporcional es un proceso de compensación, dando como resultado un error entre el punto de referencia y el valor real del proceso, ya que requiere un error para generar la respuesta proporcional. Si no hay error, no hay respuesta correctiva.

El término I representa los valores pasados del error y los integra con el tiempo para producir el término I. Por ejemplo, si hay un error residual después de la aplicación del control proporcional, el término integral busca eliminar el error residual agregando un efecto de control debido al valor acumulativo histórico. Cuando se elimine el error, el término integral dejará de crecer. Esto hará que el efecto proporcional disminuya a medida que el error disminuye, pero esto se compensa con el efecto integral creciente.

El término D es una mejor estimación de la tendencia futura del error SP-PV, en función de su tasa de cambio actual. A veces se denomina "control anticipatorio", ya que busca efectivamente reducir el efecto del error SP-PV al ejercer una influencia de control generada por la tasa de cambio de error. Cuanto más rápido sea el cambio, mayor será el efecto de control o amortiguación.

Sintonización: este ajuste se realiza para producir la función de control. Las constantes de sintonización se muestran como K y deben sintonizarse para cada aplicación de control, ya que dependen de las características de respuesta del lazo completo externo al controlador. Estos dependen del comportamiento del sensor de medición, el elemento de control final (como una válvula de control), cualquier retraso en la señal de control y el proceso en sí. Los valores aproximados de las constantes generalmente se pueden ingresar conociendo el tipo de aplicación, pero normalmente se sintonizan o ajustan al proceso en la práctica, al introducir un cambio de punto de referencia y observar la respuesta del sistema.

5.7 Control aplicado con Raspberry Pi 3 2B

Diferentes métodos de control se pueden aplicar a las variables del invernadero propuesto. Estas variables obtenidas mediante sensores se consideran entradas al sistema para obtener objetivos específicos en el mismo; mediante modelos matemáticos y técnicas de control, la Raspberry Pi podría dar las respuestas específicas con los actuadores para realizar y ejecutar las acciones de control.

Como ejemplo la humedad requiere de un sensor que mande una señal a un convertidor analógico/digital para que la RP adquiera (vía I^2C) estos datos, aplicando la ley de control a los mismos, la RP activa un actuador por medio de una señal, en este caso un relevador que a su vez permitirá el paso de corriente a una bomba de agua realizando la acción de riego a las plantas. Cuando se alcance el objetivo de humedad, el sensor indica a la RP que el error de humedad está dentro de límites establecidos por la ley de control y, así detendrá al actuador [68].

En el Capítulo 7 se muestran 2 ejercicios de control orientados a la temperatura ambiente del invernadero.

CAPÍTULO VI. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL INVERNADERO

6 Características deseadas

6.1 Diseño mecánico

La concepción de un pequeño invernadero dentro de espacios cerrados sin tierra y con luz artificial está pensado para viviendas que no cuentan con terreno para la siembra como en las ciudades, donde la falta de espacio, tiempo y conocimientos de agricultura son factores importantes que impiden dicha actividad. Basado en las condiciones antes mencionadas se busca que el invernadero albergue cultivos por hidroponía con iluminación, riego y ventilación artificial, automatizado con una computadora, habilitada con sensores para medir las condiciones climáticas y actuadores que lleven a cabo las acciones de cuidado. Instalado en una estructura metálica de aluminio con paredes de acrílico transparente.

6.1.1 Estructura

Para el diseño de la estructura metálica se empleó un perfil de aluminio modular 30x30 mm. La estructura tiene un ancho de 65 cm por 35 cm de profundidad y 70 cm de altura, ensamblado por medio de sujetadores estándar, provisto de bases niveladoras para superficies irregulares y manija en la puerta de acceso. Las paredes son de acrílico transparente con ranuras para facilitar la ventilación natural y forzada.

Antes de su compra y construcción se realizó el modelado en software especializado DAC (modelado asistido por computadora) con el fin de visualizar el modelo, proporcionando una idea clara de cómo se verá el prototipo. Hacer un modelo 3D tiene ventajas, permite hacer ajustes en diseño, dimensiones, color, textura de cada uno de sus elementos. La Figura 6.1 muestra el modelo de la estructura en 3D. Donde se tiene una idea clara de cómo se ve el modelo antes de construirlo.

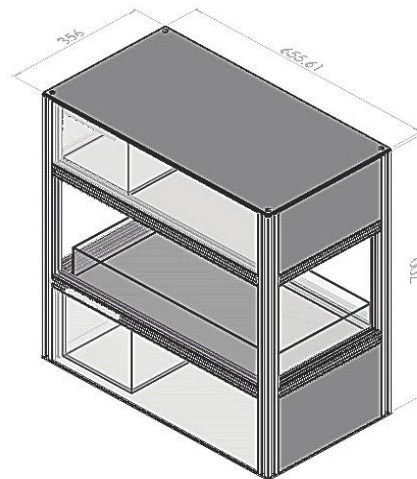


Figura 6.1 Modelado 3D de la estructura del invernadero.

El dibujo presenta la estructura donde se instalarán los componentes básicos que son parte del sistema; los cuales son: depósito de agua, charola de cultivo.

Como se observa, el modelo tiene tres niveles, en la parte inferior se instalará el sistema de riego compuesto por el tanque, la bomba de agua y las mangueras para los goteros, en el nivel central se implementará el cultivo dentro de una charola y recipientes individuales por cultivo, además del sistema de iluminación, ventilación y sensores; en la parte superior: la Raspberry Pi, fuentes de alimentación y tarjeta electrónica de actuadores. En el índice de ilustraciones C figura uno y dos se puede observar como quedo armada la estructura.

6.1.2 Recipientes de cultivo

Los recipientes donde se depositan las semillas están hechos de poliestireno (PS), termoplástico que se obtiene a partir del benceno y el etileno, es un plástico resistente a golpes, calor ~ 70 °C; dependiendo del proceso y la combinación con otros químicos se pueden obtener, plásticos rígidos, flexibles y espumas, entre otros [69]. Se emplea en la fabricación de artículos de uso diario como vasos para beber agua o artículos desechables.

Los recipientes empleados son de PS fabricados en color negro, diseñadas con el espacio para la germinación y desarrollo de las plántulas [70]. Algunos recipientes se emplean específicamente para la germinación (charolas de germinación) y para que posteriormente se realice el trasplante a un recipiente diferente donde se desarrolle la planta.

En el proyecto se empleará una charola para evitar derrames de líquidos y contenedor de los recipientes para el sustrato y depositado de las semillas, dejando que germinen y crezcan las plántulas en el recipiente permanente.

6.1.3 Mecanismo de riego

El mecanismo de riego se encarga de suministrar el agua a las plantas en un determinado tiempo en base al nivel de humedad, que se debe de mantener para lograr la germinación de las semillas y el desarrollo de las plántulas.

El conjunto de elementos de riego localizado consiste en: depósito de agua, bomba de agua, red de distribución, uniones y derivaciones de la tubería, emisores (goteros, microaspersores, y difusores), fertilización (incorporación de nutrientes al agua), filtros (de arena, de malla, y de anillos) para evitar sedimentos y por consecuencia la obstrucción de la red [71][72].

Debido a la incorporación de bombas en los sistemas de riego, éstas deben cumplir con determinada potencia para vencer las alturas geométricas (distancia vertical desde la bomba hasta un punto superior) y las manométricas (altura geométrica más las pérdidas por carga) e

impulsar el agua hasta el gotero más retirado. La Figura 6.2 muestra el esquema de un mecanismo de riego, donde se puede observar los depósitos de agua, bomba y red de distribución.

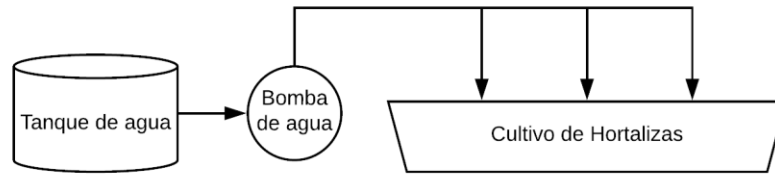


Figura 6.2 Esquema de mecanismo de riego.

Con la ecuación 6.1 se calcula la potencia requerida de la bomba.

$$P = \frac{rQH}{75n} \quad 6.1$$

Donde:

r= Peso del líquido [Kg/m³]

Q= Caudal [m³/s]

H= Altura de descarga [m]

n= Eficiencia de la bomba [0<n<1]

P= Potencia requerida en la bomba [Hp]

6.2 Diseño electrónico

El sistema electrónico está compuesto por una computadora Raspberry Pi, sensores electrónicos para la adquisición de las variables físicas, actuadores que ejecuten las acciones de control, acondicionamiento electrónico de los sensores e interfaces de conversión de señales de analógico a digital (ADC), amplificación y acondicionamiento de señales; y acoplamiento de las señales de entrada y salida hacia la Raspberry Pi. En la Figura 6.3 se muestran un diagrama a bloques de las etapas que componen al sistema.

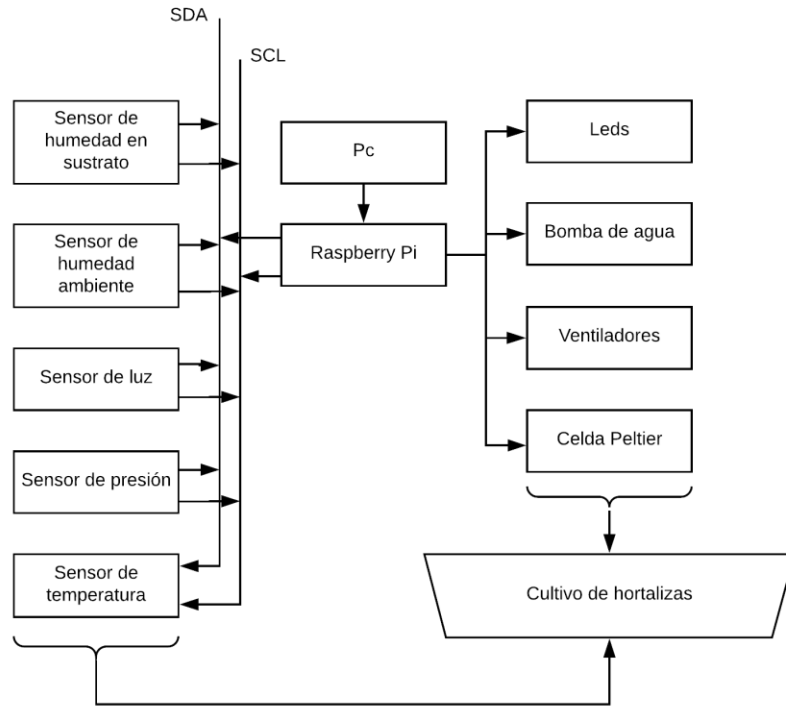


Figura 6.3 Diagrama a bloques del sistema electrónico.

En las secciones siguientes se describe el acondicionamiento electrónico para cada uno de los sistemas de sensores y actuadores.

6.2.1 Acondicionamiento electrónico de sensores

Para la instalación de los sensores (temperatura, luz, humedad ambiente y humedad en sustrato) se diseñó una placa de circuito electrónico donde se interconectan, las fuentes de alimentación y la comunicación I²C. Este diseño de tarjeta electrónica permite mantener un orden, reducir espacios de conexión y cableado. Para los sensores se emplearon tarjetas de previamente acondicionadas con la configuración recomendada por el fabricante, los llamados Smartsensors, con la ventaja de que son circuitos integrados (CI) en tarjetas acondicionadas y de montaje superficial, su aplicación se enfoca en la programación, referirse al Índice de ilustraciones A. En la Figura 6.4 se muestra un esquema de la placa de circuito impreso donde se montaron los sensores de temperatura, humedad ambiente, humedad del sustrato y luz.

En el índice de ilustraciones C figura cuatro se puede observar la tarjeta instalada en el sistema donde se instalaron los sensores.

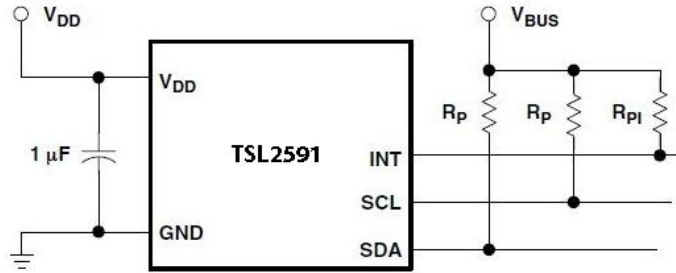


Figura 6.7. Acondicionamiento electrónico sensor de luz.

6.2.1.4 Sensor de presión

Para medir el nivel de agua en el tanque que contiene la solución nutritiva se emplea un sensor de presión, de este modo se determina la cantidad empleada y de solución disponible para el cultivo. El sensor MPX10DP (4.2.4 Sensor de nivel) se acondiciona electrónicamente con un circuito amplificador operacional (AO) LM124D en configuración de amplificador de Instrumentación con ganancia ajustable para la señal de salida, empleando los valores recomendados por el fabricante.

El LM124D consta de cuatro AO independientes, de alta ganancia e internamente compensados, funciona con una fuente de alimentación dual o simple de 6V a 32V [74]. Este circuito integrado se emplea en la configuración de amplificador de instrumentación (AI); es un amplificador diferencial básico [75] con ganancia unitaria (amplifica la diferencia de sus dos entradas y rechaza las señales comunes) y con dos AO no inversores de aislamiento a las entradas diferenciales de ganancia ajustable. La aplicación de la configuración AI tiene grandes ventajas al amplificar pequeñas señales: la ganancia se controla con una sola resistencia, alta impedancia de entrada, rechazo de ruido y la salida sólo depende de la diferencia de entradas [76]. La ganancia se obtiene con la siguiente fórmula, ecuación 6.2.

$$V_o = \left[1 + \frac{2R_1}{R_2} \right] (e_1 - e_2) \quad (6.2)$$

Donde:

Vo: Salida [V]

R2: Ganancia ajustable [Ω] (Resistencia que permite ajustar la ganancia)

R1: 100K [Ω]

e1: Entrada uno [V]

e2: Entrada dos [V]

Amplificada la señal del sensor de presión se acondiciona para su comunicación y procesamiento digital, la señal pasa por una conversión de señal analógica a digital (AD) (ADC es el proceso de convertir la salida del circuito de muestreo en códigos binarios que representan la amplitud de la señal analógica en ese instante de tiempo; donde se convierte el valor analógico muestreado en un valor binario llamado cuantificación, entre más bits se empleen para caracterizar una muestra, mayor será la resolución y aproximación al valor real) [77].

Para la ADC se emplea el circuito ADS1115 con longitud de palabra de 16 bits, muestreo de 8 hasta 860 muestras por segundo, rango de entrada de ± 256 mV a ± 6.144 V; contiene un amplificador de ganancia programable por software, un comparador digital, un voltaje de referencia interno, cuatro entradas individuales o dos diferenciales seleccionables por software y comunicación I²C [78].

Amplificada y digitalizada la señal del sensor de presión se realiza la adquisición de la señal con la RP empleando programación en Python (Apéndice A4), de este modo se puede procesar, almacenar y mostrar la señal que caracteriza el nivel de liquido en el tanque de agua.

En la Figura 6.8 se muestra el diagrama del acondicionamiento electrónico del sensor de presión MPX10D con el AO LM124D en configuración de amplificador de instrumentación. Posteriormente la salida del AO se conecta a la entrada AN0 del ADC ADS1115³.

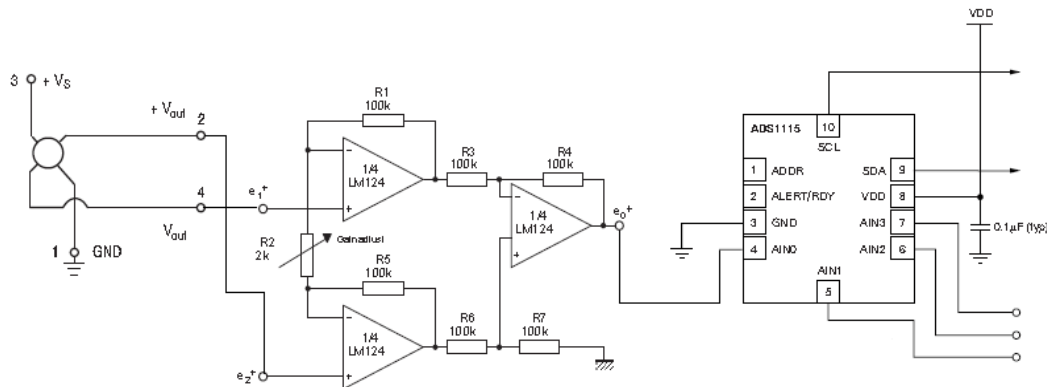


Figura 6.8. Acondicionamiento electrónico de sensor de presión.

6.2.2 Acondicionamiento electrónico actuadores

Para los actuadores se realizó el diseño de una tarjeta electrónica modular pensando en reducir espacios y conexiones entre sistemas; control de la bomba de agua, control de iluminación LED, control de ventiladores y un amplificador de instrumentación con ADC para la señal del sensor de nivel del tanque de agua.

³ Nota: El acondicionamiento electrónico del sensor de presión se incluyó en la placa de los actuadores.

Cada etapa se diseñó por separado y se integró en una sola tarjeta, los circuitos electrónicos se diseñaron de acuerdo a cada aplicación, y especificaciones de las hojas de datos de los componentes, configuraciones características de transistores, complementado con optoacopladores en los circuitos de iluminación y relevadores; que proporcionan aislamiento a las salidas de la RP de potenciales superiores evitando daños en el puerto GPIO. Referirse al índice de ilustraciones B, así como al índice de ilustraciones C tres, donde se observa la tarjeta instalada en el sistema.

En la Figura 6.9 se muestra un esquema del circuito impreso de los actuadores; bomba de agua (relevadores), control de ventiladores (control de motores) y control de iluminación LED. En esta placa se incluye el AO del sensor de presión y su ADC.

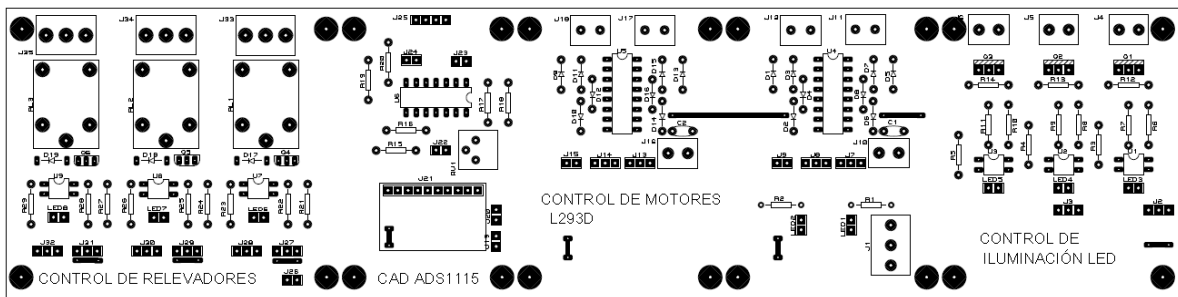


Figura 6.9 Esquema del circuito impreso de los actuadores.

A continuación se hace una descripción funcional de los actuadores electrónicos y su acondicionamiento. Se presentan los diagramas electrónicos, cálculos matemáticos y condiciones de operación que debe cumplir.

6.2.2.1 Controlador de bomba de agua y celda Peltier

La etapa de control de la bomba de agua y la celda Peltier se realiza con un relevador, usando el contacto normalmente abierto, y accionado por un circuito de acoplamiento, el cual está integrado por un optoacoplador (OA) y un transistor bipolar NPN funcionando en las regiones de corte y saturación; este circuito proporciona aislamiento entre la señal de salida de la RP, que es de nivel 5V y la fuente para la bomba del agua y la celda Peltier, que son de 12V.

La Figura 6.10 muestra el esquemático de este actuador, el funcionamiento de este circuito es el siguiente: Al mandar la RP una señal de encendido por una terminal de sus puerto GPIO, pasa por un LED indicador de encendido, esta señal entra al cátodo del diodo interno del optoacoplador (U7) polarizando la base del transistor interno; de este modo se crea un flujo de corriente entre colector y el emisor del transistor del opto acoplador, polarizando de esta manera la base del transistor externo Q4, creando un flujo de corriente entre el colector y el

emisor (saturación de Q4). De este modo se energiza la bobina del relevador, accionando su mecanismo (cerrando el contacto normalmente abierto) y conecta la fuente de voltaje de 12V a la bomba de agua o la celda Peltier. El circuito se repitió en la placa de circuito impreso, para accionar los actuadores por separado con distintas señales según su función en el sistema.

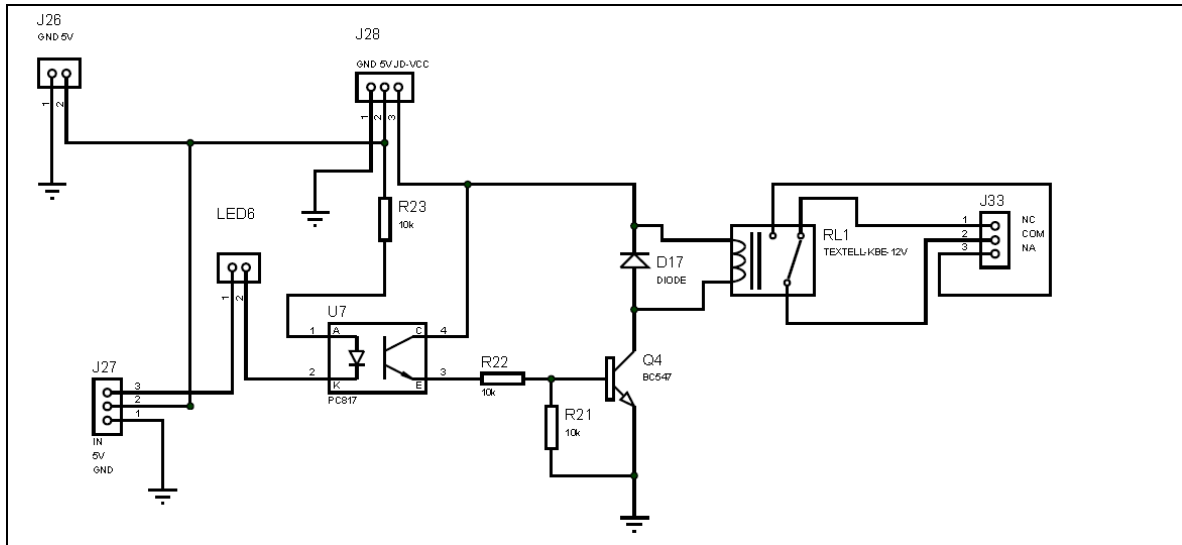


Figura 6.10. Acondicionamiento electrónico de la bomba de agua y la celda Peltier.

Antes de realizar el cálculo matemático, es necesario obtener las características eléctricas de las hojas de datos (datasheets) de cada componente electrónico empleado en el circuito propuesto para el controlador de la bomba de agua y celda Peltier, tabla 6.1.

Tabla 6.1. Características eléctricas de los componentes controladores de bomba de agua y celda Peltier.

Componente	Voltaje [V]	Corriente [I]	Impedancia [Ω]
Relevador SDR-05VCD-SL-C	V= 5 V Nominal V= 3.7 V Inserción 28 VCD 240 VCA, 120 VCA	I= 89.3 mA. Nominal 7 A 7 A, 10 A	55 ohm. Bobina 100 m Ω . Resistencia de contacto
Transistor BC547	$V_{CE}(sat)$ 200 mV $V_{BE}(sat)$ 900 mV	$I_C=100$ mA $I_B=5$ mA	
Optoacoplador PC817	$V_F = 1.4V$ in $V_{CE}(sat)$ 0.2V out	If=20 mA Ic=7 mA	
LED Verde LED-G5D-PP-R30	1.8V Min-2.2V Max		

El análisis se realiza siguiendo el circuito propuesto de la salida a la entrada Figura 6.10. Comenzando con la malla formada por la bobina del relevador y colector-emisor del transistor BC547, por Ley de Voltaje de Kirchhoff, se tiene que:

$$-V_{cc1} + V_L + V_{CE} = 0 \quad (a)$$

Donde V_{cc1} es 5V, V_L el voltaje en la bobina del relevador y V_{CE} es el voltaje de saturación del transistor BC547. Despejando V_L , el potencial requerido para activar el relevador:

$$V_L = V_{cc1} - V_{CE} = 5V - 200mV = 4.8V \quad (b)$$

Como $V_L = 4.8V >$ al voltaje de mínimo de activación (3.7V), se energiza la bobina y mantendrá cerrados los contactos del relevador.

Analizando la malla de la base del transistor con el objetivo de calcular la resistencia R_2 que permite el flujo de corriente necesario para polarizar el transistor en corte y saturación, se tiene que:

$$-V_{cc1} + V_{CE} + V_{R2} + V_{BE} = 0 \quad (c)$$

Donde V_{cc1} es 5V, V_{CE} es 0.2V, V_{R2} el voltaje en la resistencia R_2 y V_{BE} el voltaje del diodo base-emisor del BC547. Sustituyendo V_{R2} por la ley de ohm, se tiene:

$$-V_{cc1} + V_{CE} + R_2 I_C + V_{BE} = 0 \quad (d)$$

Considerando de la hoja de datos a $I_C = 7mA$ (corriente suficiente para saturar el transistor) y sustituyendo los demás valores, se obtiene que R_2 :

$$R_2 = \frac{+V_{cc1} - V_{CE} - V_{BE}}{I_C} = \frac{5V - 0.2V - 0.7V}{7mA} = \frac{4.1V}{7 \times 10^{-3}} = 582.71 \Omega \quad (e)$$

Análisis de la malla de entrada del optoacoplador para obtener R_1 que permitirá el flujo de corriente necesario para polarizar el diodo interno del optoacoplador, el LED indicador de encendido del circuito y satura el transistor del optoacoplador:

$$-V_{cc1} + V_{R1} + V_{DOP} + V_{LED} = 0 \quad (f)$$

Donde V_{cc1} es 5V, V_{R1} el voltaje en la resistencia R_1 , V_{DOP} el voltaje de LED del optoacoplador necesario para saturara al transistor y V_{LED} el voltaje del diodo LED. Sustituyendo V_{R1} por la ley de Ohm:

$$-V_{cc1} + R_1 I_{DOP} + V_{DOP} + V_{LED} = 0 \quad (g)$$

Despejando R1, y sustituyendo valores:

$$R_1 = \frac{V_{cc1} - V_{DOP} - V_{LED}}{I_{DOP}} = \frac{5V - 1.4V - 2V}{16mA} = \frac{1.6V}{16 \times 10^{-3}} = 87.5 \Omega \quad (h)$$

Para evitar el encendido en falso del transistor BC547 se propone introducir una resistencia de Pull-Down en la base del mismo, se sugiere que por R3 circule 5% de la corriente de base del transistor, es decir 350uA, por tanto:

$$R_3 = \frac{V_B}{I_{R3}} = \frac{900mV}{350uA} = 2572 \Omega \quad (i)$$

Para evitar daños en el transistor se coloca un diodo en antiparalelo a la bobina, que suprime los efectos inductivos debidos al cambio de dirección de la corriente al pasar del estado encendido del transistor al apagado, el voltaje de la bobina se invierte polarizando el diodo en directa transfiriendo la corriente inductiva al diodo, evitando el daño del transistor [79].

6.2.2.2 Controlador de ventiladores

Para controlar los ventiladores en el proyecto se emplea un circuito integrado L293D, el cual contiene cuatro medios puentes H con transistores Darlington [80] en configuración totem-pole. Son transistores con baja impedancia de salida (V_{CE} de saturación muy bajo, resistencia CE baja) [81], es decir, contiene dos puentes H de potencia que se pueden controlar individualmente, con las entradas de señales digitales respectivas.

El puente H es un circuito formado por cuatro transistores del mismo tipo (BJT, Darlington, MOSFET) que se emplea para controlar cargas de potencia alta, como solenoides, relevadores, motores CD y motores paso a paso. Este circuito tiene ventajas, soporta flujos de altas corrientes y voltaje, se puede invertir el sentido de flujo de la corriente que pasa por la carga con dos transistores, usa una fuente de alimentación simple y señales de control para determinar la dirección o paro (en el caso que la carga sea un motor). Se pueden controlar con estados lógicos 1 o 0 en la entrada o con un circuito adicional de control por modulación por ancho de pulsos (PWM). Debido a su construcción requiere diodos de protección en la salidas para suprimir las corrientes inductivas transitorias en inversa generadas por las inductancias que pueden dañar los transistores del puente H [82][83].

El objetivo del puente H en aplicaciones con motores es realizar el cambio de sentido del giro o paro del motor. Este circuito se puede realizar y modelar con cuatro interruptores para explicar su funcionamiento, como explicamos en seguida [84], la Figura 6.11 muestra el esquemático.

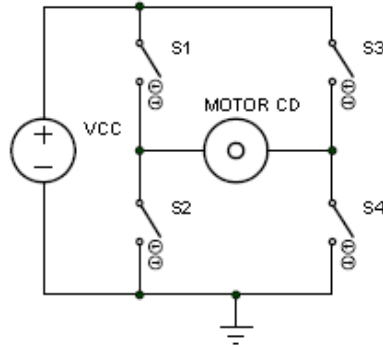


Figura 6.11. Puente H.

Si en el circuito se cierran los interruptores S1 y S4 manteniendo S2 y S3 abiertos el motor va a girar en un sentido, si se quiere invertir el sentido, se deben abrir S1 y S4 cerrando los interruptores S3 y S2. Existen dos condiciones más para el puente H, en alta impedancia donde todos los interruptores están abiertos, y estado prohibido, donde se puede poner en corto la fuente si se cierran los interruptores S1 y S2 o S3 y S4 [85].

El circuito integrado L293D es un controlador de cuatro medios puentes H que proporcionan un flujo de corriente bidireccional de 1A a 36V máximo, las entradas son TTL de 1.5V hasta 7V máximo. Este circuito no requiere los diodos de protección en la carga, debido a que están integrados en el encapsulado; las entradas de control y de habilitación requieren un potencial de 5V y la fuente de tensión para la carga puede estar dentro de los límites de 4.5V a 36V [86].

Los controladores se habilitan en pares, con los controladores 1 y 2 se habilitan con 1,2EN y los controladores 3 y 4 se habilitan con 3,4EN. Cuando una entrada de habilitación es alta, los controladores relacionados están habilitados, así como sus salidas y en fase con sus entradas. Cuando la entrada de habilitación es baja, por consecuencia esos controladores están deshabilitados, y sus salidas están apagadas. Con las señales de entradas adecuadas, cada par de controladores forma un puente H completo adecuado para aplicaciones de motores.

Para su aplicación se empleó la configuración recomendada por el fabricante, este circuito sólo requiere proporcionar las señales de entrada y potenciales requeridos por el integrado y la carga.

Acondicionado el circuito, se emplea programación con Python para generar las señales de control de encendido de los motores y la señal de habilitación, la Figura 6.12 muestra esta parte del actuador.

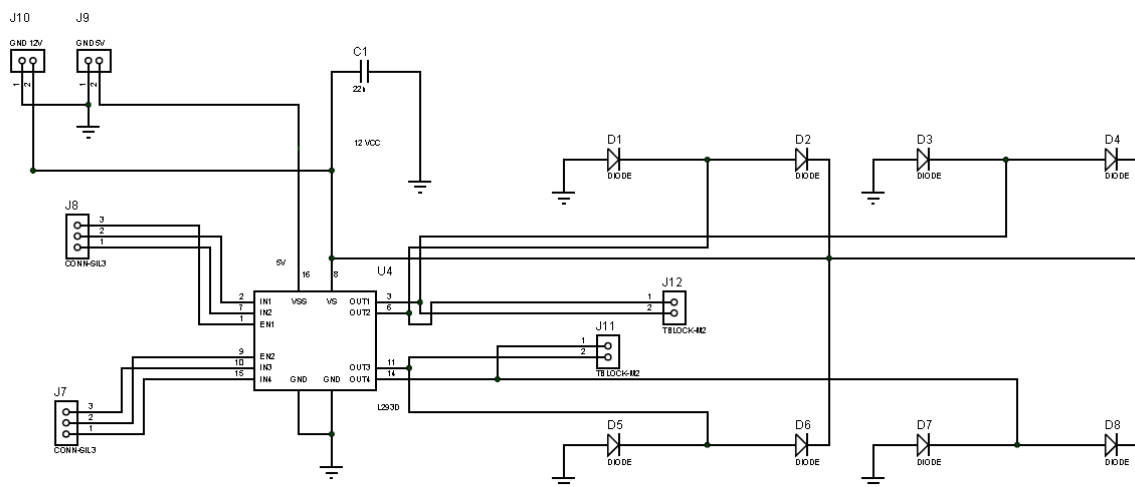


Figura 6.12. Actuador electrónico para los ventiladores.

6.2.2.3 Controlador de iluminación rojo, azul y blanco

La etapa de control de iluminación LED se basa en transistores MOSFET en la configuración de saturación o como interruptor, accionado por un circuito optoacoplador que proporciona aislamiento entre la señal de RP y el potencial de alimentación de los LED.

El análisis de circuitos electrónicos se realiza de la salida a la entrada, considerando la salida de DRAIN-SOURCE del MOSFET donde se conecta la carga, en este caso los LEDs. Para el análisis se requiere saber el voltaje de polarización en directa del LED, que en este caso es específico dependiendo del color del LED, la Tabla 6.2 es el resumen de características de los LEDs.

Tabla 6.2. Especificaciones técnicas LEDs.

Color	Longitud de onda [nm] / TC[K]	Voltaje [V] Min-Max	Consumo [mW]	Intensidad Luminosa [m cd]	. Dimensiones [mm] . Angulo de apertura [°] . Temperatura [°C] . Corriente nominal [I]
Rojo	600-6500	2.0-2.4	40	1000-3000	LED SMD 3.5X2.8 mm 120° 40-70 °C 20 mA
Azul	450-500	3.0-4.0	60	1000-3000	-
Blanco	5000-7000	3.0-4.0	60	1000-3000	-

Para el invernadero se proponen dos tarjetas de iluminación, con segmentos de 3 LEDs en serie y de estos segmentos dos en paralelo. Cada tarjeta tendrá una operación y consumo de acuerdo a la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Voltajes de operación.

Color	Voltaje [V] Min - Max	Corriente [I]	Flujo Luminoso [lm]
Rojo	2.2(3)= 6.6	40 mA	628.32 lm
Azul	3.5(3)=10.5	-	-
Blanco	3.5(3)=10.5	-	-

la Figura 6.13 muestra el circuito electrónico de una lámpara donde se montaron los LEDs rojo, azul y blanco.

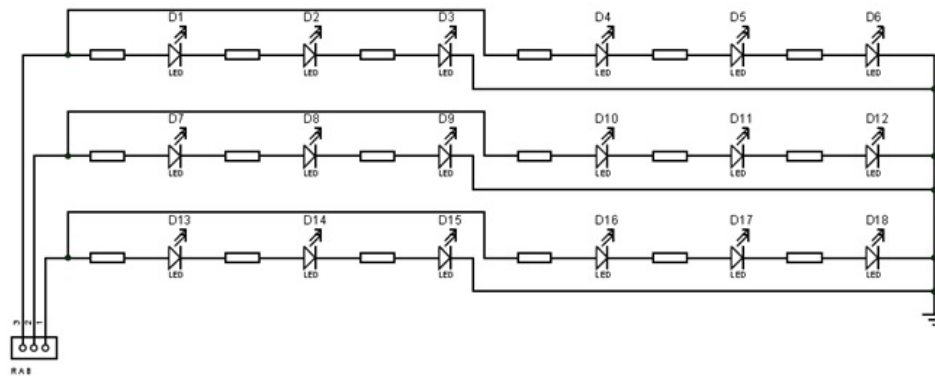


Figura 6.13. Circuito electrónico de lámparas de LEDs.

El circuito propuesto como actuador de los LEDs es el siguiente, la Figura 6.14 muestra el esquemático esquemática de encendido/apagado de LEDs.

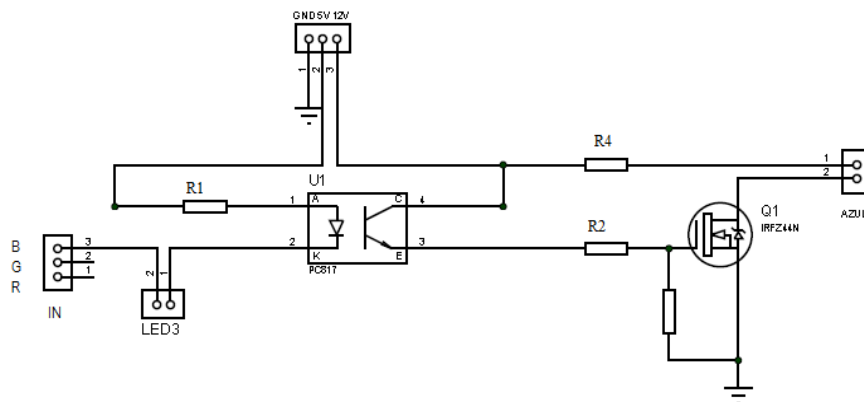


Figura 6.14. Acondicionamiento electrónico de iluminación.

Antes de realizar el cálculo matemático es necesario obtener las características eléctricas de las hojas de datos de cada componente electrónico empleado en el diseño del circuito controlador de iluminación, la Tabla 6.4 es el resumen de estas características.

Tabla 6.4. Características eléctricas.

Componente	Voltaje [V]	Corriente [I]	Impedancia [Ω]
Transistor Mosfet STP20NM50	$V_{DSS} = 0.2 \text{ V}$ $V_{GS(th)} = 4 \text{ V}$	$I_D = 100 \text{ mA}$	$R_{DS} = 0.22 \Omega$
Transistor BC547	$V_{CE}(\text{sat}) 200 \text{ mV}$ $V_{BE}(\text{sat}) 900 \text{ mV}$	$I_C=100 \text{ mA}$ $I_B=5 \text{ mA}$	
Optoacoplador PC817	$V_F = 1.4\text{V in}$ $V_{CE}(\text{sat}) 0.1\text{V out}$	$I_f=20 \text{ mA}$ $I_c=7 \text{ mA}$	
LED Verde LED-G5D-PP-R30	$1.8 \text{ V, Min-}2.2 \text{ V}$ Max		

El análisis se realiza en la malla de salida del MOSFET considerando la carga:

$$V_{CC} + R_{lim} I_D + 3V_D + V_{DS} = 0 \quad (j)$$

Despejando de la ecuación anterior R_4 es la resistencia limitadora de los LEDs, y considerando para los LEDs rojos, tenemos:

$$R_4 = \frac{V_{CC} - 3(V_{LED}) - V_{DSS}}{I_D} = \frac{12\text{V} - 6\text{V} - 0.2\text{V}}{100\text{mA}} = 58\Omega \quad (k)$$

Despejando de la ecuación anterior R_4 es la resistencia limitadora de los LEDs, y considerando para los LEDs azul y blancos, tenemos:

$$R_4 = \frac{V_{CC} - 3(V_{LED}) - V_{DSS}}{I_D} = \frac{12\text{V} - 9\text{V} - 0.2\text{V}}{100\text{mA}} = 2.8\Omega \quad (l)$$

Con los valores de resistencia, calculamos la potencia disipada en estas resistencias $P = RI^2$. Para los LEDs rojos es 5.8mW y para los azules y blancos 0.28mW.

Analizando la malla del gate del mosfet

$$V_{cc1} + V_{CE} + V_{R2} + V_{GS(th)} = 0 \quad (m)$$

$$V_{cc1} + V_{CE} + I_C R_2 + V_{GS(th)} = 0 \quad (n)$$

Despejando R_2 , la resistencia limitadora de voltaje, considerando $V_{GS} = 4 = V_{GS(th)}$ asegurando el encendido del Mosfet, tenemos:

$$R_2 = \frac{V_{cc1} - V_{CE} - V_{GS}}{I_C} = \frac{5V - 0.2V - 4V}{7mA} = \frac{0.8V}{7mA} = 114.28\Omega \quad (\tilde{n})$$

Considerando una resistencia de Pull-Down en el gate del mosfet para evitar encendido por potenciales transitorios o ruido, considerando en ella sólo el 5% de la corriente de gate (350uA), tenemos que:

$$R_3 = \frac{V_{GS(th)}}{0.05 I_C} = \frac{4V}{350\mu A} = 11428.57\Omega \quad (o)$$

Analizando la malla de entrada del optoacoplador

$$V_{cc1} + V_{R1} + V_{Dop} + V_{LED} = 0 \quad (o)$$

$$V_{cc1} + R_1 I_{Dop} + V_{Dop} + V_{LED} = 0 \quad (p)$$

Despejando R_1 , para saturar el transistor del optoacoplador, tenemos que:

$$R_1 = \frac{V_{cc1} - V_{Dop} - V_{LED}}{I_{Dop}} = \frac{5V - 1.4V - 2.2V}{16mA} = 87.5\Omega \quad (q)$$

En resumen para el circuito de iluminación: Se calcularon las resistencias para polarizar los circuitos de encendido de la iluminación del invernadero, basado en las regiones de operación y funcionamiento típico propuesto por el fabricante de los componentes electrónicos empleados. Considerando los resultados obtenidos se modificaron los valores de las resistencias calculadas a valores comerciales, la Tabla 6.5 siguiente muestra los valores usados en el circuito específico.

Tabla 6.5. Resistencias comerciales para el circuito de iluminación.

Resistencia	R. Calculada [Ω]	R. Propuesta [Ω]
R_4	LEDs rojos 58 LEDs azul y blanco 2.8	56 2.8
R_3	11428.57	12 k
R_2	114.28	120
R_1	87.5	82

Además de los cálculos teóricos realizados en este capítulo, se hicieron las siguientes actividades para armar el prototipo:

Construcción, maquinados, recorte de plásticos, armado de gabinete.

- Instalación de los sensores.
- Instalación de los actuadores.
- Implantación del cultivo.

CAPÍTULO VII PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

7.1 Puesta a punto

Realizado el diseño mecánico, se implementa la estructura, se instalan los dispositivos electrónicos realizados en el Capítulo 6. Los sensores y lámparas se instalan en la parte interior superior del área de cultivo por encima del mismo. La celda Peltier y ventiladores de calefacción y enfriamiento se instalan en la pared exterior posterior del área de cultivo. La bomba de agua y su depósito en la parte inferior exterior para evitar derrames en la electrónica. El acondicionamiento electrónico, computadora y fuentes se instala en la parte superior exterior, fuera del cultivo con el propósito de tener acceso a conexiones y ajustes.

Para las primeras pruebas fue necesario conectar un monitor, teclado y mouse a la Raspberry Pi. De este modo se instala la plataforma de software Raspbian, que nos permite ejecutar el programa hecho en Python, donde se introduce el programa general, librerías y subrutinas realizadas para cada variable ambiental, de este modo se realizan las acciones pertinentes con los actuadores.

Cada sensor fue probado por separado para garantizar su correcto funcionamiento. De este modo adquirir las variables: humedad en sustrato, temperatura y luz ambiente. Las primeras pruebas de los sensores se realizaron haciendo programas de cómputo que adquirieran las señales y las presenten en pantalla, los datos de estas variables sirvieron para establecer un control simple On-Off, donde se proponen intervalos de operación, definiendo los máximos y mínimos a alcanzar dentro del ambiente del cultivo. Al adquirir los datos de las variables y establecer dichos intervalos, se realizaron acciones en los actuadores para aumentar, disminuir o mantener estables las variables en un punto deseado.

Probado cada sensor, se realizó un programa general secuencial de lazo cerrado para la adquisición de datos de los sensores, presentarlos en pantalla y hacer la acción específica de los actuadores.

A continuación se muestran los diagramas de flujo de los programas implementados.

7.2 Programa principal

En el siguiente diagrama de flujo se muestra cómo se realiza la prueba de las variables a controlar, cada bloque representa una subrutina para cada variable ambiental donde se leen y se ejecutan acciones para mantener las variables ambientales en los intervalos establecidos, Figura 7.1.

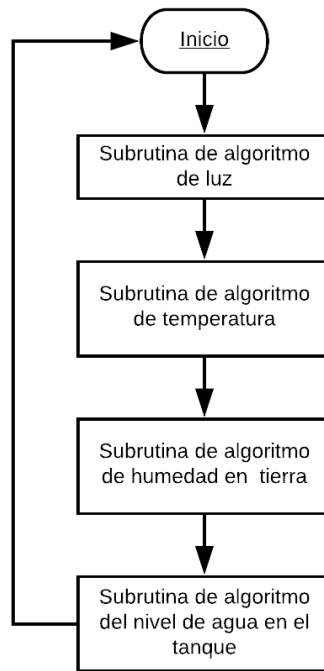


Figura 7.1. Diagrama de flujo del programa principal.

El programa se inicia obteniendo la variable del sensor respectivo, configurando los puertos como entrada o salida de la Raspberry Pi, dando formato al dato y presentándolo en pantalla, en algunos casos se muestra la acción realizada. Posteriormente continúa con la subrutina siguiente, y consecutivamente hasta regresar al inicio. Cada bloque representa una subrutina de inicialización de cada variable ambiental a controlar.

El algoritmo principal es una prueba de funcionamiento, su función es configurar las salidas de la Raspberry Pi, realizar una prueba de funcionamiento de cada sensor y actuador, el objetivo es que adquieran la variable física para lo que fueron diseñados, así como que cada uno de los actuadores realice la acción correspondiente, es decir, verificar su operación, esto se puede consultar en el **anexo A**. El algoritmo cumple la función para el que fue programado. La programación en Python se puede consultar en el **anexo B**.

A continuación se explica cada subrutina a partir del diagrama de flujo de las mismas; es importante notar que estos algoritmos de prueba se implementaron después de caracterizar en algunos casos los sensores y actuadores.

7.3 Subrutinas

Subrutina del sensor de luz

En el siguiente diagrama de flujo se representa el funcionamiento de la subrutina de luz, ver Figura 7.2.



Figura 7.2. Diagrama de flujo de subrutina del sensor de luz.

El diagrama de flujo del algoritmo de iluminación inicia, tomando la lectura de la luz ambiente, la luz infrarroja y con estos datos calcula la cantidad de luz en luxes. Pasa a la primera condición; si lux es mayor o igual a 32 lux enciende luz blanca, sino se cumple la condición imprime cantidad de lux. Lee de nuevo la luz, si lux es menor a 20 lux enciende la luz azul y roja, imprime la cantidad lux y regresa al programa principal.

En la tabla 7.1 se puede observar la medición de la luz emitida por los LEDs y sus combinaciones. En la segunda y tercer columna de izquierda a derecha se observan las mediciones de la luz reflejada por la superficie donde se encuentran las macetas, medición realizada con el sensor TSL 2591 y el luxómetro HER-410 a una distancia de 30 cm, y en la cuarta columna la medición directa a 30 cm de la luz emitida por las lámparas.

Tabla 7.1. Medición de luz emitida por los LEDs

Color de Luz	Medición de Luxes con el sensor TSL2591	Medición de luxes con luxómetro (STEREN HER-410)	Luxes emitidos por los LEDs a 30 cm de distancia (STEREN HER-410)
Roja	12.2	4	62
Azul	8.2	15	407
Blanca	17.8	16	387
Roja y azul	16.6	15	440
Roja, azul y blanca	23.3	32	811

Subrutina del sensor de temperatura

En el siguiente diagrama de flujo se representa el funcionamiento de la subrutina del sensor de temperatura ambiente, ver Figura 7.3.

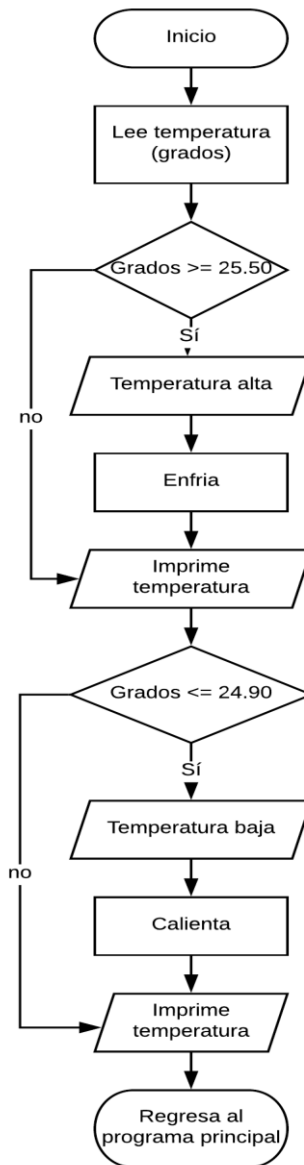


Figura 7.3. Diagrama de flujo del algoritmo de temperatura.

El diagrama de flujo del algoritmo de temperatura inicia tomando la lectura de la temperatura en grados Celsius (nombrado en el algoritmo sólo como grados), pasa a la primera condición; si la temperatura es mayor o igual a 25.50 entonces enfriar. Para a la siguiente condición, si la temperatura es menor o igual a 24.90 inicia el calentamiento y regresa al programa principal.

Subrutina del sensor de humedad en tierra

En el siguiente diagrama de flujo representa el algoritmo de la humedad en el sustrato, ver Figura 7.4.

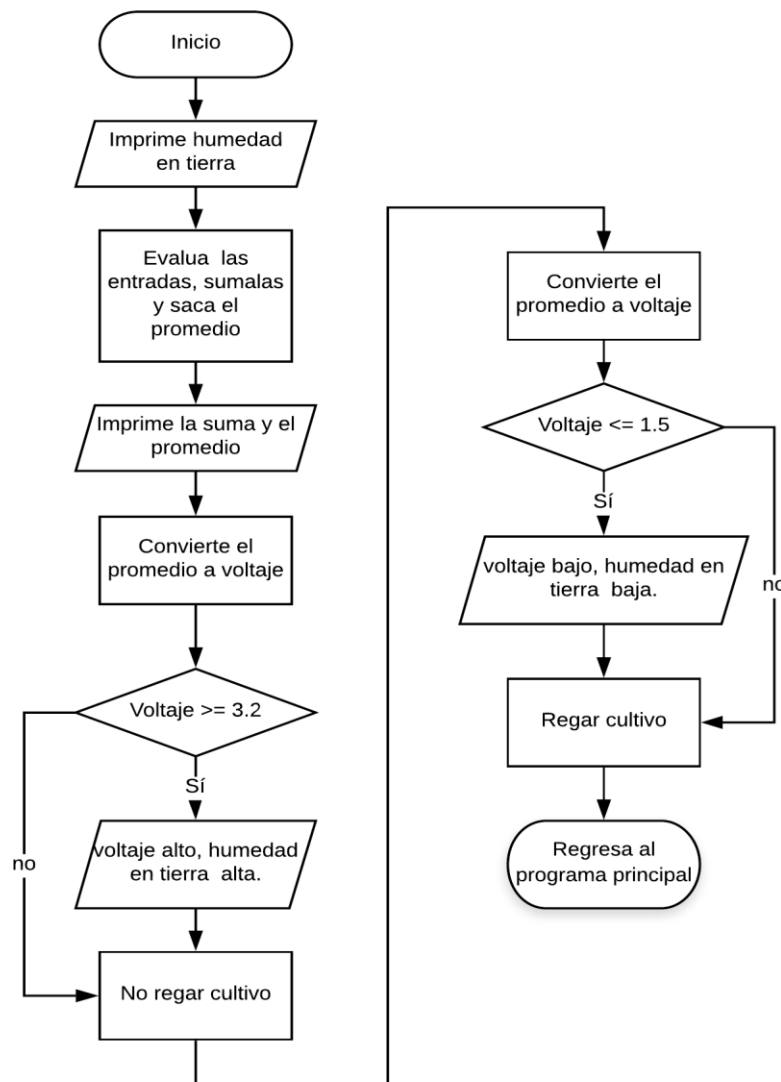


Figura 7.4. Diagrama de flujo del algoritmo de humedad en sustrato.

El diagrama de flujo del algoritmo de humedad en el sustrato tiene dos puntos de prueba o condiciones, la primera condición; si la humedad promedio de los sensores es mayor o igual a 3.2 V de salida en el sensor, imprime el valor promedio y no se riega el cultivo. La siguiente condición, si la humedad promedio es menor o igual a 1.5 V de salida en el sensor, imprime humedad baja e inicia el riego. Si la rutina decide regar: hasta que se alcance la humedad promedio alta, deja de hacerlo y finalmente regresa al programa principal o cuando decide no regar.

En la tabla 7.2. se puede observar la medición de humedad en el sustrato. En la primer columna se puede observar el sustrato a humedad ambiente, en saturación y secado después de saturar a 100°C durante 10 minutos, en la segunda columna se puede observar el peso de las muestras a determinada humedad. En la tercer columna se obtuvieron las lecturas de los cuatro sensores en un valor hexadecimal de la humedad del sustrato. Esta tabla muestra la relación que existe entre la humedad en el sustrato y la lectura obtenida por los sensores.

Tabla 7.2 Medición de humedad en el sustrato

Humedad de sustrato (Musgo de turba)	Peso de la muestra	Medición sensor (16 Bits)			
Ambiente	50 g	N°0 15	N°1 1	N°2 5	N°3 10
Saturado	105g	N°0 24098	N°1 22547	N°2 25857	N°3 27154
Secado a 100°C durante 10 min	94g	N°0 24001	N°1 25205	N°2 25781	N°3 23274

Subrutina del sensor de humedad ambiental

En el siguiente diagrama de flujo se representa el funcionamiento de la Subrutina del sensor de humedad ambiental, ver Figura 7.5.

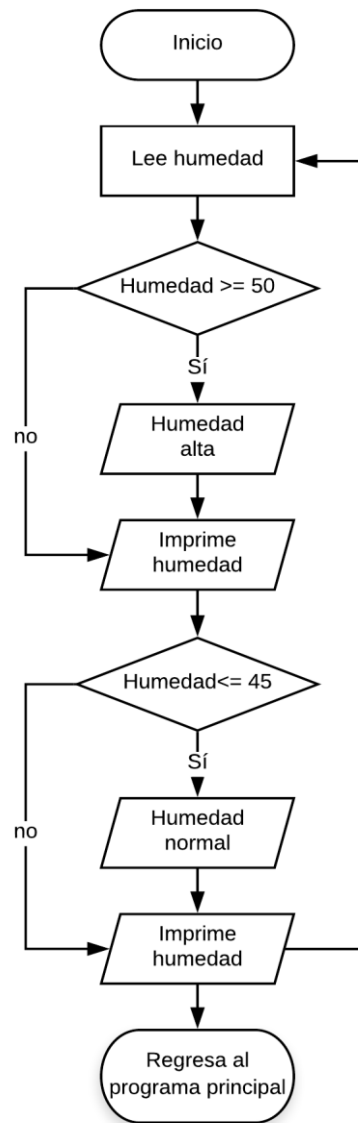


Figura 7.5. Diagrama de flujo del algoritmo de humedad ambiente.

El diagrama de flujo del algoritmo de humedad ambiente tiene dos puntos de prueba o condiciones, la primera condición; si grados es mayor o igual a 50% de humedad relativa, imprime humedad alta, sino se cumple la primera condición imprime la humedad. Pasa a la siguiente condición, si la humedad es menor o igual a 45% imprime humedad baja y regresa al programa principal.

En este caso de la humedad ambiental no se incluyen acciones a realizar con los actuadores, debido a que esta cambia al variar la temperatura ambiente lo que resulta más complejo. Para este caso se tendrá que realizar un análisis prioritario para controlar la temperatura o la humedad si es necesario.

Subrutina del sensor de nivel de agua en el tanque

En el siguiente diagrama de flujo se presenta el funcionamiento de la subrutina del sensor de nivel de agua en el tanque, ver Figura 7.6.

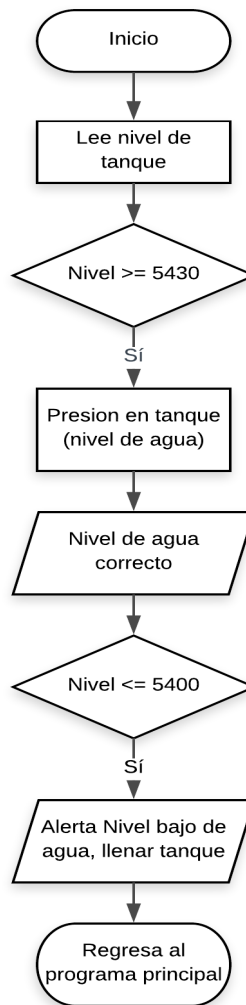


Figura 7.6. Diagrama de flujo del tanque de agua.

El diagrama de flujo del algoritmo de nivel del tanque tiene dos puntos de prueba o condiciones, las cuales se tomaron de acuerdo a la caracterización del sensor que mide la presión, de acuerdo al nivel de agua dentro del tanque (se hicieron dos marcas: lleno y nivel mínimo), se toma el valor digital hexadecimal (Hx) de la conversión analógico-digital directa del sensor. La primera condición; si nivel es mayor o igual a 5430 (Hx), imprime nivel de

agua correcto. La segunda condición; si el nivel es menor o igual a 5400 (Hx) imprime nivel bajo de agua, aviso de “llenar tanque” y regresa al inicio del programa principal.

Para el caso del tanque se caracterizó sólo para enviar mensajes si hay agua o no, ya que el tanque se llena manualmente y no hay una bomba que surta el agua. El tanque se caracterizó cada 200 mililitros hasta llegar a los seis litros, **anexo C**.

7.4 Control en la temperatura variando el tiempo de calentamiento

En el siguiente diagrama de flujo se presenta el funcionamiento del algoritmo de la temperatura ambiente estableciendo una referencia para calcular el error, de este modo sintonizar manualmente la temperatura respecto al tiempo de calentamiento o enfriamiento del actuador, ver Figura 7.7.

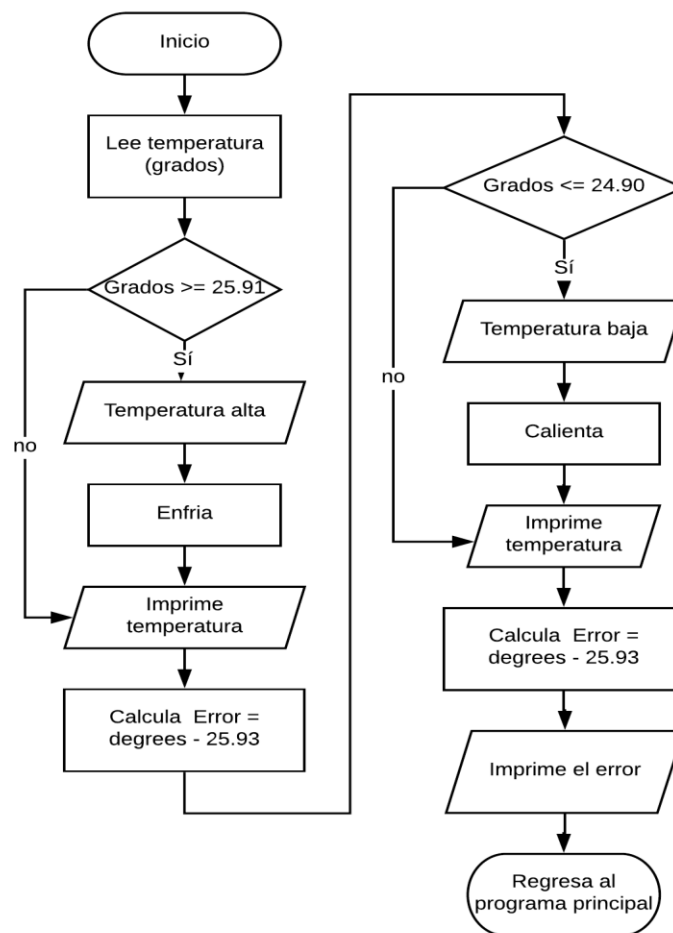


Figura 7.7. Diagrama de flujo del algoritmo de temperatura con cálculo del error.

El diagrama de flujo del algoritmo de temperatura con cálculo del error inicia tomando la lectura de la temperatura en grados Celsius (nombrado en el algoritmo sólo como grados), pasa a la primera condición; si grados es mayor o igual a 25.91°C realiza la acción de enfriar, calcula el error, que es la lectura actual de la temperatura menos una referencia o valor

objetivo. Para la siguiente condición, si la temperatura es menor o igual a 24.90°C inicia el calentamiento, calcula el error y regresa al programa principal.

Considerando el error en la temperatura y el valor objetivo se puede variar el tiempo de enfriamiento o calentamiento del actuador de temperatura que se acota con los límites establecidos. La programación del algoritmo de control se puede consultar el **anexo D**.

Pruebas

Al considerar sólo el control de temperatura, se realizaron pruebas de adquisición y acciones con la celda Peltier para mantener dentro de un margen la temperatura dentro del microinvernadero. La siguiente gráfica muestra los resultados de la variación con respecto al tiempo de respuesta con intervalos de 25.5 a 24.90 con una diferencia de 0.6 grados, ver grafica 7.8.

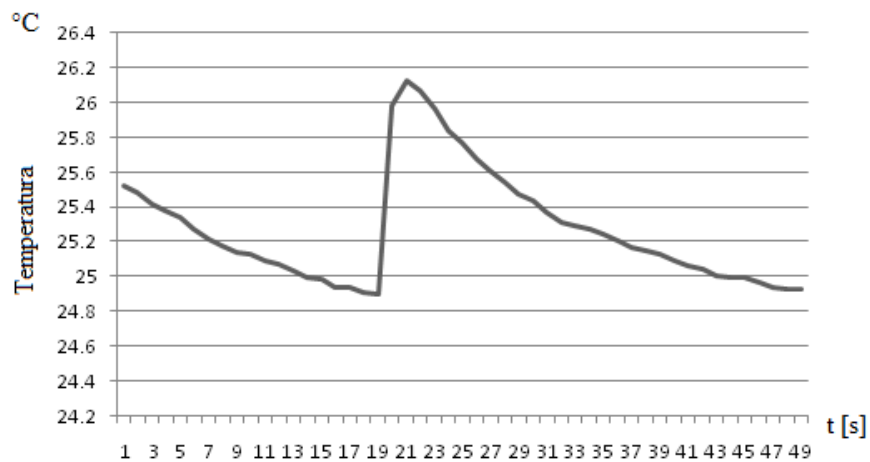


Figura 7.8. Respuesta de la temperatura del sistema.

En la gráfica 7.1 se puede ver que el actuador tiene una respuesta rápida al calentar, esto se puede observar entre los 19 y 23 segundos, donde la pendiente debería hacer un cambio de 24.9°C a 25.1°C como objetivo, sin embargo, al comenzar a enfriar la temperatura alcanza 26.1°C y por tanto se “alarga” el tiempo de enfriamiento, esto se puede observar entre los intervalos 23 segundos a 50 segundos. Este comportamiento se debe a la temperatura ambiente que interactúa con el cambio de temperatura interior del invernadero, por medio de las paredes que no son aisladas térmicamente, adicionalmente las ranuras permiten que el aire que enfría la celda Peltier se escape, prolongando el tiempo de enfriamiento del interior.

Este primer control, sobrepasa el límite máximo establecido y para corregir el error, se prolonga el tiempo de enfriamiento, y el tiempo de calentamiento se reduce. Para “cerrar” la ventana de control, se puede incidir reduciendo el tiempo de calentamiento. Si la celda Peltier enfría lento, tardaría menos tiempo en enfriar si el calor dentro del invernadero es bajo. Por tal motivo se tomó la decisión de reducir el tiempo de calentamiento (T_c), así no se tiene que

esperar a que la celda Peltier llegue a su máxima temperatura de enfriamiento para que enfrié relativamente pronto.

La siguiente gráfica es la respuesta del algoritmo de control con una temperatura objetivo de 25.93 °C. Como se puede observar sigue calentando igual de rápido, pero al reducir su tiempo de calentamiento tarda menos en enfriar acercándose más a la temperatura deseada, ver Figura 7.9.

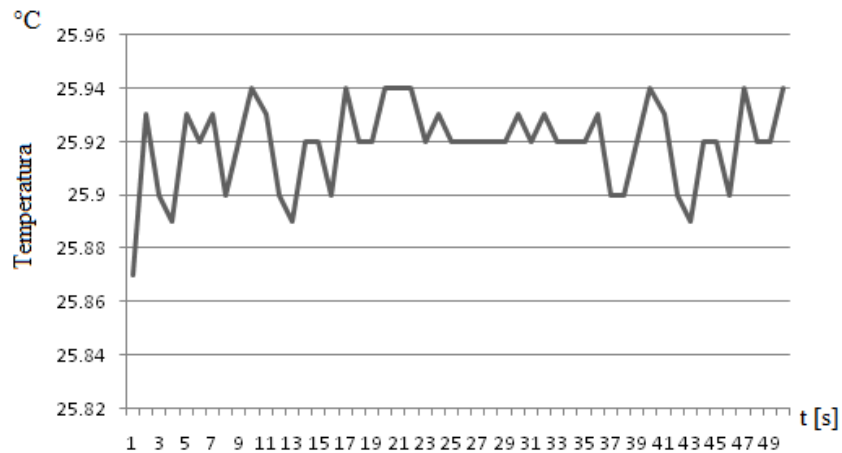


Figura 7.9. Respuesta controlando el tiempo de calentamiento.

7.5 Resultados

A pesar de que existen varias limitaciones del sistema; los ventiladores montados en la celda Peltier sólo introducen aire frío o caliente, y no extraen, adicionalmente el interior del invernadero no está aislado térmicamente del exterior. Esta limitante provoca que se prolongue el tiempo de enfriamiento del interior del invernadero.

Por lo dicho anteriormente, se puede observar en la Figuras 7.8 que el sistema es lento para enfriar, pero con los ajustes en el tiempo de calentamiento se puede aproximar a la temperatura deseada como lo muestra la Figura 7.9. Estas pruebas son útiles para demostrar que el planteamiento de introducir un actuador como la celda Peltier para enfriar o calentar el ambiente en el microinvernadero funciona a pesar de sus limitaciones y el control puede ajustar la temperatura deseada.

Como lo muestran las pruebas anteriores el sistema funciona correctamente; con sus limitaciones; a partir del mismo, se puede hacer control de sus variables.

7.6. Conclusiones

Los sensores empleados, por su tecnología, permiten medir de manera eficaz las variables ambientales, por tal motivo se determina que la aplicación y respuesta es adecuada para el sistema, sustentado en las pruebas realizadas y su flexibilidad al adaptarse a las condiciones climáticas.

Los actuadores funcionan de manera correcta para el sistema, ya que no requiere que actúen de forma rápida, esto se debe a que el proceso de cultivo es lento, no obstante se puede mejorar el sistema de enfriamiento para mejorar su eficacia.

La integración de una computadora Raspberry Pi proporciona una interacción con el acondicionamiento electrónico, permitiendo gestionar el funcionamiento por medio de programación en Python, disminuyendo la intervención del usuario.

El sistema propuesto, con sus condiciones actuales cumple con los objetivos planteados, abriendo una posibilidad de experimentación con hortalizas en general o una especie en particular. La experimentación se puede realizar basados en las características ambientales, nutritivas y de crecimiento que puede controlar el sistema propuesto, de una especie para lograr un mayor rendimiento en la producción de hortalizas.

Aunque en todo momento se contemplaron los costos de los componentes utilizados en el sistema, al final se dio prioridad al área de diseño electrónico y funcionamiento más que a minimizar el costo. En el anexo E se presentan unas tablas con los costos de cada uno de los elementos empleados en el desarrollo del sistema.

ANEXOS

Anexo A

Ejecución del programa principal

>>>>

LUZ EN LUMENS, INFRARROJA Y ESPECTO TOTAL

LUX = 31.5 lm/m²

IR = 2.0 °C

LUZ = 11.0 C

Temperatura alta, enfriando

TEMPERATURA = 26.00 °C

TEMPERATURA = 26.01 °C

HUMEDAD EN TIERRA

| 0 | 1 | 2 | 3 |

| -2 | -1 | 1 | -2 |

SUMA = -4.0

promedio= -1.0

voltaje= -0.0

voltaje bajo, poca humedad

Humedad en tierra baja = -0.0 voltaje

Tanque vacío, llenar: 5259

LUZ EN LUMENS, INFRARROJA Y ESPECTO TOTAL

LUX = 31.5 lm/m²

IR = 2.0 °C

LUZ = 11.0 C

Temperatura alta, enfriando

TEMPERATURA = 25.99 °C

TEMPERATURA = 25.99 °C

HUMEDAD EN TIERRA

| 0 | 1 | 2 | 3 |

| -1 | -1 | -1 | -2 |

SUMA = -4.0

promedio= -1.0

voltaje= -0.0

voltaje bajo, poca humedad

Humedad en tierra baja = -0.0 voltaje

Tanque vacío, llenar: 5266

Anexo B

Algoritmo principal de control programado en Python

```
# -*- coding: utf-8 -*-

import RPi.GPIO as GPIO # Importa la configuración de los puertos de entrada-salida
import time # Importa el contador
GPIO.setmode(GPIO.BCM) # Activa las salidas en modo BCM

# Asigna nombre a cada puerto empleado de la Raspberry Pi
Motor1A = 5
Motor2A = 6
Motor12E = 26
Motor3A = 24
Motor4A = 23
Motor34E = 22
Peltier = 25
Blanca = 27
Azul = 17
Rojo = 16
Bomba = 14

# Prepara los pueros como salidas
GPIO.setup(Motor1A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor2A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor12E,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor3A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor4A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor34E,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Peltier,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Blanca,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Azul,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Rojo,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Bomba,GPIO.OUT)

# Los puertos se inician en encendido o apagado
GPIO.output(Motor12E,GPIO.LOW)
GPIO.output(Motor34E,GPIO.LOW)
GPIO.output(Peltier,GPIO.HIGH)
GPIO.output(Blanca,GPIO.HIGH)
GPIO.output(Azul,GPIO.HIGH)
```

```

GPIO.output(Rojo,GPIO.HIGH)
GPIO.output(Bomba,GPIO.HIGH)

# Importa la programación propuesta por el fabricante de la tarjeta Adafruit
from Adafruit_SHT31 import *
sensor = SHT31(address = 0x44)
def print_status():
    status = sensor.read_status()
    degrees = sensor.read_temperature()
    humidity = sensor.read_humidity()

print_status()
sensor.clear_status()
sensor.set_heater(True)
print_status()
sensor.set_heater(False)
print_status()
#-----
# Programa de control de temperatura
def temperatura():
    while True:
        degrees = sensor.read_temperature()
        if degrees >= 25.50: # Condición de temperatura alta
            print('Temperatura alta, enfriando')
            GPIO.output(Motor34E,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Peltier,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Motor1A,GPIO.HIGH)
            GPIO.output(Motor2A,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Motor12E,GPIO.HIGH)
            print ("TEMPERATURA = {0:0.2f} °C").format(degrees)
            time.sleep(0.4)
        degrees = sensor.read_temperature()
        if degrees < 24.90: #Condición de temperatura baja
            print('Temperatura baja, calentndo')
            GPIO.output(Peltier,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Motor12E,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Motor3A,GPIO.HIGH)
            GPIO.output(Motor4A,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Motor34E,GPIO.HIGH)
            print ("TEMPERATURA = {0:0.2f} °C").format(degrees)
            time.sleep(0.4)
        break

```

```

    return
#-----
# Programa de control de humedad
def humedad():
    while True:
        humidity = sensor.read_humidity()
        if humidity >= 51.00: #Condición de humedad alta
            print('Humedad alta')
            print ('HUMEDAD    = {0:0.2f} %').format(humidity)
            time.sleep(0.4)
        humidity = sensor.read_humidity()
        if humidity <= 45.00:#Condición de humedad normal
            print('Humedad normal')
            print ('HUMEDAD    = {0:0.2f} %').format(humidity)
            time.sleep(0.4)
            break
    return

#-----
# Programa de control de luz en: lux (Lumens), full (espectro completo de luz),
# ir (infrarroja)
# Importa la programación propuesta por el fabricante de la tarjeta Adafruit
def luz():
    import tsl2591

    tsl = tsl2591.Tsl2591() # inicializa
    full, ir = tsl.get_full_luminosity() # Leer valores actuales
    lux = tsl.calculate_lux(full,ir) # convierte valores a Lux

    print ('LUZ EN LUMENS, INFRARROJA Y ESPECTO TOTAL')
    print ('LUX      = {0:0.1f} lm/m2').format(lux)
    print ('IR       = {0:0.1f} °C').format(ir)
    print ('LUZ      = {0:0.1f} C').format(full)

    while True:
        lux = tsl.calculate_lux(full,ir)
        full, ir = tsl.get_full_luminosity()
        if lux >= 32.00:
            print('Luz en lumens normal')
            GPIO.output(Blanca,GPIO.LOW)# Enciende luz blanca
            GPIO.output(Azul,GPIO.HIGH)# Apaga luz azul
            GPIO.output(Rojo,GPIO.HIGH)# Apaga luz roja

```

```

        print ('LUX      = {0:0.1f} lm/m2').format(lux)
        time.sleep(0.4)
        break
    lux = tsl.calculate_lux(full,ir)
    full, ir = tsl.get_full_luminosity()
    if lux < 20.00:
        print('Luz en lumens baja')
        GPIO.output(Blanca,GPIO.HIGH)# Apaga luz blanca
        GPIO.output(Azul,GPIO.LOW)# Enciende luz azul
        GPIO.output(Rojo,GPIO.LOW) # Enciende luz roja
        print ('LUX      = {0:0.1f} lm/m2').format(lux)
        time.sleep(0.4)
        break
    return
# -----
# Programa de control de humedad en tierra
# Importa la programación propuesta por el fabricante de la tarjeta Adafruit
def humedad_tierra():
    import time
    import Adafruit_ADS1x15
    adc = Adafruit_ADS1x15.ADS1115()
    GAIN = 1
    print('HUMEDAD EN TIERRA')

    print('| {0:>4} | {1:>4} | {2:>4} | {3:>4} |'.format(*range(4)))
    print('-' * 29)
    values = [0]*4
    for i in range(4):
        values[i] = adc.read_adc(i, gain=GAIN)
    print('| {0:>4} | {1:>4} | {2:>4} | {3:>4} |'.format(*values))
    #los valores que proporciona son la conversión a decimal con signo,
    #la conversión a 15 bits y uno de signo
    values[i] = adc.read_adc(i, gain=GAIN)
    #suma de los valores de impedancia medida de los sensores
    suma = values[0] + values[1] + values[2] + values[3]
    promedio = suma / 4 # saca el promedio de las impedancias
    print (' SUMA = {0:0.1f} ').format(suma)
    print ('promedio= {0:0.1f} ').format(promedio)
    #convirtiendo la impedancia promedio a voltaje (4.096 es para gain=1)
    voltaje = promedio*4.096 / 32768
    print ('voltaje= {0:0.1f}').format(voltaje)
    time.sleep(0.5)

```

```

while True:
    voltaje = promedio*4.096 / 32768
    if voltaje >= 3.2:
        print ('voltaje alto, humedad alta')
        GPIO.output(Bomba, 1) # Bomba apagada
        print ('Humedad en tierra alta = {0:0.1f} voltaje').format(voltaje)
        time.sleep(0.4)
        break
    voltaje = promedio*4.096 / 32768
    if voltaje < 1.5:
        print ('voltaje bajo, poca humedad')
        GPIO.output(Bomba, 0) # Enciende bomba
        print ('Humedad en tierra baja = {0:0.1f} voltaje').format(voltaje)
        time.sleep(0.4)
        break
    return
# -----
# Programa de control de presion en tanque
# Importa la programación propuesta por el fabricante de la tarjeta adafruit
def tanque():
    import time
    import Adafruit_ADS1x15
    adc = Adafruit_ADS1x15.ADS1115()
    adc = Adafruit_ADS1x15.ADS1115(address=0x49, busnum=1)
    GAIN = 1
    while True:
        value = adc.read_adc_difference(0, gain=GAIN)
        if value >= 5430:
            print('Presion en tanque: {0}'.format(value))
            time.sleep(0.5)
            break
        if value < 5400: # Tanque vacio
            print ('Tanque vacio, llenar: {0}'.format(value))
            break
    return

# PROGRAMA PRINCIPAL-----

while True:
    luz()
    temperatura()

```

humedad_tierra()
humedad()
tanque()

Anexo C

Caracterización del nivel de agua en el tanque.

Prueba	Dif. presión (16 Bits)	Cantidad de agua (ml)	Alerta
0	5287	0	
1	5295	200	
2	5329	400	
3	5350	600	
4	5380	800	
5	5400	1000	Alerta, sin agua
6	5429	1200	
7	5449	1400	
8	5479	1600	
9	5499	1800	
10	5520	2000	
11	5549	2200	
12	5573	2400	
13	5594	2600	
14	5608	2800	
15	5660	3000	
16	5681	3200	
17	5708	3400	
18	5731	3600	
19	5756	3800	
20	5780	4000	
21	5808	4200	
22	5824	4400	
23	5849	4600	
24	5874	4800	
25	5900	5000	
26	5924	5200	
27	5948	5400	Nivel correcto
28	5974	5600	
29	5993	5800	
30	6019	6000	Tanque lleno

Anexo D

Algoritmo de control de temperatura variando el tiempo de calentamiento en Python.

```
# -*- coding: utf-8 -*-

import RPi.GPIO as GPIO
import time
GPIO.setmode(GPIO.BCM)

Motor1A = 5
Motor2A = 6
Motor12E = 26
Motor3A = 24
Motor4A = 23
Motor34E = 22
Peltier = 25

GPIO.setup(Motor1A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor2A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor12E,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor3A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor4A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor34E,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Peltier,GPIO.OUT)

GPIO.output(Motor12E,GPIO.LOW)
GPIO.output(Motor34E,GPIO.LOW)
GPIO.output(Peltier,GPIO.HIGH)

from Adafruit_SHT31 import *
sensor = SHT31(address = 0x44)
def print_status():
    status = sensor.read_status()
    degrees = sensor.read_temperature()
    humidity = sensor.read_humidity()

print_status()

sensor.clear_status()
sensor.set_heater(True)
print_status()
```

```

sensor.set_heater(False)
print_status()
#-----
def temperatura():
    while True:
        degrees = sensor.read_temperature()
        if degrees >= 25.91:
            print('Temperatura alta, enfriando')
            GPIO.output(Motor34E,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Peltier,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Motor1A,GPIO.HIGH)
            GPIO.output(Motor2A,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Motor12E,GPIO.HIGH)
            print ('TEMPERATURA = {0:0.2f} °C').format(degrees)
            time.sleep(0.4)
            break
        degrees = sensor.read_temperature()
        if degrees < 25.90:
            print('Temperatura baja, calentando')
            GPIO.output(Peltier,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Motor12E,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Motor3A,GPIO.HIGH)
            GPIO.output(Motor4A,GPIO.LOW)
            GPIO.output(Motor34E,GPIO.HIGH)
            print ('TEMPERATURA = {0:0.2f} °C').format(degrees)
            time.sleep(0.5) # Tiempo base del control de temperatura
            # sintonizado manualmente. Variando este tiempo se ajusta el control
            # de la temperatura.
            GPIO.output(Motor34E,GPIO.LOW) # Apaga el calentador
            time.sleep(1)
            print ('Error = {0:0.4f} °C').format(Error)
            break

    return

while True:
    temperatura()

```

Anexo E

Lista de materiales y costos.

Partes mecánicas

Numero	Cantidad	Descripción	Precio U.	Total
1	4	Perfil de aluminio 30x30 mm, ranura de 8 mm, centro de 6.8 mm para roscar a M8 <i>.Largo de la barra es de 31 cm.</i>	\$40.30	\$165.20
2	4	Perfil de aluminio 30x30 mm, ranura de 8 mm, centro de 6.8 mm para roscar a M8 <i>.Largo de la barra es de 61 cm.</i>	\$79.30	\$317.20
3	4	Perfil de aluminio 30x30 mm, ranura de 8 mm, centro de 6.8 mm para roscar a M8 <i>.Largo de la barra es de 80 cm.</i>	\$104.00	\$416.00
4	8	Perfil de aluminio 30x30 mm, ranura de 8 mm, centro de 6.8 mm para roscar a M8 <i>.Largo de la barra es de 75 cm.</i>	\$97.50	\$780.00
5	16	Sujetador Estándar 30 Aplicación: Placa de acero galvanizada y tornillo BHCS inox. M8x20 (REQUIERE MAQUINADO, MAHUELIAR M8)	\$23.50	\$376.00
6	2	Bisagra para perfil 30x30 Incluye (4) tornillo socket M6x14 mod. 24-314-6 y (4) tuercas M6: mod. 20-090	126.48	\$252.96
7	1	Manija Plástica 117 mm entre centros, Incluye (2) tornillo socket mod. 24-312-6 y (2) tuercas: mod. 20-058	\$148.00	\$148.00
8	4	Pie Nivelador 30 Base 40 mm, vástago M8x60 mm	\$85.00	\$340.00
9	6	Cubre Ranura para perfil 30x30 GASKET Largo: 2 Mts.	\$53.00	\$318.00
			SUMA	\$3,109.36
			IVA	\$407.50
			TOTAL	\$3606.86

Numero	Cantidad	Descripción	Precio U.	Total
1	1	Acrílico (puerta)	\$250.00	\$250.00
2	1	Acrílico (central trasera)	\$250.00	\$250.00
3	2	Acrílico (central izquierdo y derecho)	\$200.00	\$400.00
4	2	Acrílico (superior delantero y trasero)	\$180.00	\$360.00
5	2	Acrílico (superior izquierdo y derecho)	\$150.00	\$300.00
6	2	Acrílico base	\$150.00	\$300.00
7	1	Recipiente	\$400.00	\$400.00
			SUMA	\$2260.00
			IVA	\$361.60
			TOTAL	\$2621.60

Partes de cultivo y riego

Numero	Cantidad	Descripción	Precio U.	Total
1	1	Charola de cultivo	\$60.00	\$60.00
2	8	Macetas 4"	\$12.00	\$96.00
3	2	Goteros de riego de cuatro estacas / manguera de 45 cm.	14.80	\$29.60
4	2	Gotero auto compensado de 2 litros por hora	\$5.29	\$10.58
5	2	Manguera (2 m)	\$5.19	\$10.38
6	2	Uniones T para manguera	\$2.50	\$5.00
			SUMA	211.56
			IVA	33.85
			TOTAL	245.40

Partes electrónicas

Numero	Cantidad	Descripción	Precio U.	Total
1	1	Raspberry Pi	\$1056.90	\$1056.90
2	1	Fuente Raspberry Pi 5V a 1A	\$276.72	\$276.72
3	1	Adaptador HDMI a VGA	\$250.00	\$250.00
5	1	Fuente de alimentación 12V a 3A	\$576.72	\$576.72
6	1	Fuente de alimentación 12V a 6A	\$657.76	\$657.76
7	1	Fuente de alimentación 5V a 3A	\$271.55	\$271.55
8	1	Sensor de temperatura y humedad	\$272	\$272.00
9	1	Sensor de luz	\$116.00	\$116.00
10	4	Sensor de humedad en tierra	\$52.65	\$210.60
11	1	Sensor de presión	\$201.75	\$201.75
12	2	Convertidos analógico a digital	\$194,00	\$388.00
13	12	LEDs rojo	\$4.31	\$51.72
14	12	LEDs azul	\$4.31	\$51.72
15	12	LEDs blanco	\$4.31	\$51.72
16	2	Ventiladores	\$149.14	\$298.28
17	2	Celda Peltier	\$84.48	\$169.68
18	1	Bomba de agua	\$150.00	\$150.00
19	3	Relevadores	\$30.17	\$90.51
20	1	Amplificador operacional	\$7.76	\$7.76
21	2	Driver de motores	\$67.24	\$134.48
22	3	Mosfets IRFZ44	\$18.97	\$56.91
23	3	Transistores BJT BC547	\$2.59	\$7.77
24	6	Optoacopladores PC817	\$4.74	\$28.44
25	4	Conectores T Block de 3 terminales	\$4.50	\$18.00
26	9	Conectores T Block de 2 terminales	\$3.50	\$31.50
27	19	Diodos	\$0.86	\$16.34
28	20	Resistencias (diferentes valores)	\$0.86	\$17.20
29	1	Cable dupont 40 hilos X 1m	\$60.00	\$60.00
30	1	Circuito impreso de actuadores	\$800.00	\$800.00
31	1	Circuito impreso de sensores	\$450.00	\$450.00
32	2	Circuito impreso de lámparas	\$400.00	\$800.00
			SUMA	\$7588.03
			IVA	\$1214.08
			TOTAL	\$8802.11

INDICE DE TERMINOS

ACK: Acuse de recibido (Acknowledge)

AD: Analógica a digital (analog to digital)

ADC: Convertidos analógico a digital

ADP: Agua disponible para la planta

AO: Amplificador operacional (operational amplifier)

BMS: Bit más significativo (Most Significant Bit)

C: Capacitancia

CA: Corriente alterna

CAD: Dibujo asistido por computadora

CC: Capacidad de campo

CC/CD: Corriente continua o corriente directa

CSI: Interfaz Serie para Cámaras (Camera Serial Interface)

CI: circuito integrado (Integrated Circuit)

CNC: Control numérico por computadora (computer numerical control)

DAQ: Sistemas de adquisición de datos

ADDR: Abreviación de dirección en ingles (Address)

DPM: Déficit permitido en el margen de riego

3D: Gráficos por computadora (computer graphics)

ET: Evapotranspiración

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

FEM: Fuerza electromotriz

GND: Tierra (ground)

GPIO: Entrada/Salida de propósito general (General Purpose Input/Output)

Hx: Hexadecimal

HDMI: Interfaz multimedia de alta definición (High-Definition Multimedia Interface)

I: Integral

IA: amplificador de instrumentación (Instrumentation amplifier)

IEEE: Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

I²C/IIC: Circuito Inter-Integrado (Inter-Integrated Circuit)

IOT: Internet de las cosas (Internet of Things)

LDR: Resistencia dependiente de la luz (light-dependent resistance)

LED: Diodo Emisor de Luz

MEMS: Microelectromecánicos

MHZ: Mega hertzio

MIMO: Múltiples entradas y múltiples salidas (Multiple input Multiple output)

MMI: Interfaz de modo mixto

MPA: Presión de aire del colector (Manifold Air Pressure)

MPS: Muestras por segundo

N: Newtons

NACK: Acuse de no recibido (Not_Acknowledge)

NFT: (Nutrient Film Technique) Técnica de Película de Nutriente

OA: Optoacoplador

OSMC: Centro de Medios de Código Abierto (Open Source Media Center)

P: Proporcional

PC: Computadora personal (personal computer)

PI: Proporcional integral

PID: Proporcional integral derivativo

PLC: Controlador lógico programable

Psh: Peso muestra suelo húmedo

PS: Poliestireno

Pss: Peso muestra suelo seco

PMP: Punto de marchite permanente

PULL-UP: Levantar

PULL-DOWN: Jalar

PV: Variable de proceso (process variables)

PWM: Modulación por ancho de pulsos (pulse-width modulation)

Q: Carga

RH: Humedad Relativa

RP: Raspberry Pi

RST: Resistencias adicionales para reinicio

R/W: Lectura / Escritura (Reading / Writing)

SCL: Línea serial de reloj

SD: Seguro Digital (Secure Digital)

SDA: Línea serial de datos

SISO: Sistemas de una entrada una salida (single input, single output)

SP: Punto deseado (simple point)

Tc: Tiempo de calentamiento

TEDS: Hoja de datos electrónicos del transductor

TTL: Transistor-transistor lógica (Transistor-Transistor Logic)

USB: Bus universal serie (Universal Serial Bus)

V: Voltaje

VDC: Voltaje de corriente directa

VDD: Suministro de drenaje (Drain supply) o fuente de alimentación

REFERENCIAS

- [¹] FAO. (2009). *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*. noviembre 12, 2018, de Sitio web: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf
- [²] Baudoin, W. (2002). *El cultivo protegido en clima mediterráneo*. septiembre, 2018, de FAO Sitio web: <http://www.fao.org/3/a-s8630s.pdf>
- [³] Walter, V., Rios, A., Trapido, P., & Malarín, H.. (Febrero 2014). *Agricultura y Clima Futuro en América Latina y el Caribe: Impactos Sistémicos y Posibles Respuestas*. marzo 2018, de Banco Interamericano de Desarrollo Sitio web: https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5806/Agricultura%20y%20Cambio%20Climatico%20IDB-DP-329_es.pdf?sequence=2
- [⁴] Ross, N. (2017). *Jardinería para Principiantes*. <http://www.babelcubebooks.com/>: Babelcube Inc.
- [⁵] Castilla, N. (1999). *Invernaderos de plástico: tecnología y manejo*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- [⁶] Carmeño, Z. (2005). *Construcción de invernaderos*. España: Mundi-Prensa.
- [⁷] Samperio, G. (2015). *Hidroponia básica*. México: Editorial Planeta.
- [⁸] Casseres, E. (1980). *Producción de hortalizas*. Costa Rica: Editorial Ilica.
- [⁹] Gil, A. (2010). *Preelaboración y conservación de alimentos*. Madrid-España: Ediciones Aika.
- [¹⁰] Hydro Environment. Guía: *Tipos de sustratos para hidroponia*. 24/11/17, de Hydro Environment Sitio web: http://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=32
- [¹¹] Marulanda, C. (2003). *La huerta hidropónica popular*. 24/11/17, de FAO Sitio web: <http://www.fao.org/3/a-ah501s.pdf>
- [¹²] Espinosa, P., Espinosa, L. *Hidroponia rústica*. 22/11/17, de Sagarpa Sitio web: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Hidroponia%20R%C3%B3stica.pdf>
- [¹³] Zárata, A. (2014). *Manual de hidroponia*. 25/11/17, de gob.mx Sitio web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232367/Manual_de_hidroponia.pdf
- [¹⁴] Bosques, J. (2010). *Curso basico de hidroponia*. lulu.com.
- [¹⁵] Shany, M.. (2004). *Producción de Hortalizas en Condiciones Tecnificadas*. Enero 22, 2018, de Ministerio de Relaciones Exteriores de Israel Centro de Cooperaciones Internacional

Sitio web: https://books.google.com.mx/books?id=1vIwLakf5FoC&pg=PA21&dq=ventilacion+en+invernaderos&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiH4P_Ps3YAhUBeKwKHSggD1EQ6AEIJzAA#v=onepage&q=ventilaci%C3%B3n%20en%20invernaderos&f=false

[¹⁶] Giaconi, V., & Escafe, M. (2004). *Cultivo de Hortalizas*. Chile: Editorial universitaria.

[¹⁷] Martín, E. (2010). *Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo?*. Noviembre 27, 2017, de The University of Arizona, College of Agriculture and Life Sciences Sitio web: <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1220s.pdf>

[¹⁸] Leitón, J. (1985). *Riego y Drenaje*. Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.

[¹⁹] Alpízar, A. (2004). *Hidroponía cultivo sin tierra*. Costa Rica : Editorial tecnológica de Costa Rica.

[²⁰] Maroto, J. (2008). *Elementos de horticultura general*. Madrid: Mundi Prensa.

[²¹] Mateo, J. (2005). *Prontuario de agricultura*. Madrid: Grupo Mundi Prensa.

[²²] Martín, P., Navas, L., Hernández, S., Correa, A., Martín, E., Chamorro, P., & Durán, J. (2010). *Diodos emisores de luz para la irradiación de plantas*. 04-12-2017, de Universidad Politécnica de Madrid Sitio web: http://oa.upm.es/7044/2/INVE_MEM_2010_76665.pdf

[²³] Ramos, Y & Ramírez, E.. (2016). *Development of an artificial LED lighting system for indoor farming*. Noviembre 16, 2017, de Sistemas de Bibliotecas Portal de Revistas SENA Sitio web: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/480/689

[²⁴] Pallas R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona España: Marcombo.

[²⁵] Write R. *A sensor classification scheme*. *IEEE Trans. Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Contrl*, vol. 34, núm. 2, Marzo 1987, págs. 124-126.

[²⁶] John M. & Hufnagel P. (2004). *The IEEE 1451.4 Standard for Smart Transducers*. 08-12-2016, de IEEE Sitio web: <https://standards.ieee.org/develop/regauth/tut/1451d4.pdf>

[²⁷] Ollero, A. (2001). *Sensores. En Robótica: manipuladores y robots móviles* (pp.166-168). España: Marcombo.

[²⁸] Corona, L., Abarca, G. & Mares, J. (2014). *Introducción. En Sensores y actuadores* (pp. 17-21). México: Grupo editorial patria.

[²⁹] Datasheet SHT3x-DIS. (2016 Agosto). *Datasheet SHT3x-DIS*. 2017/02/11, de SENSIRION Sitioweb:https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/2_Humidity_Sensors/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital.pdf

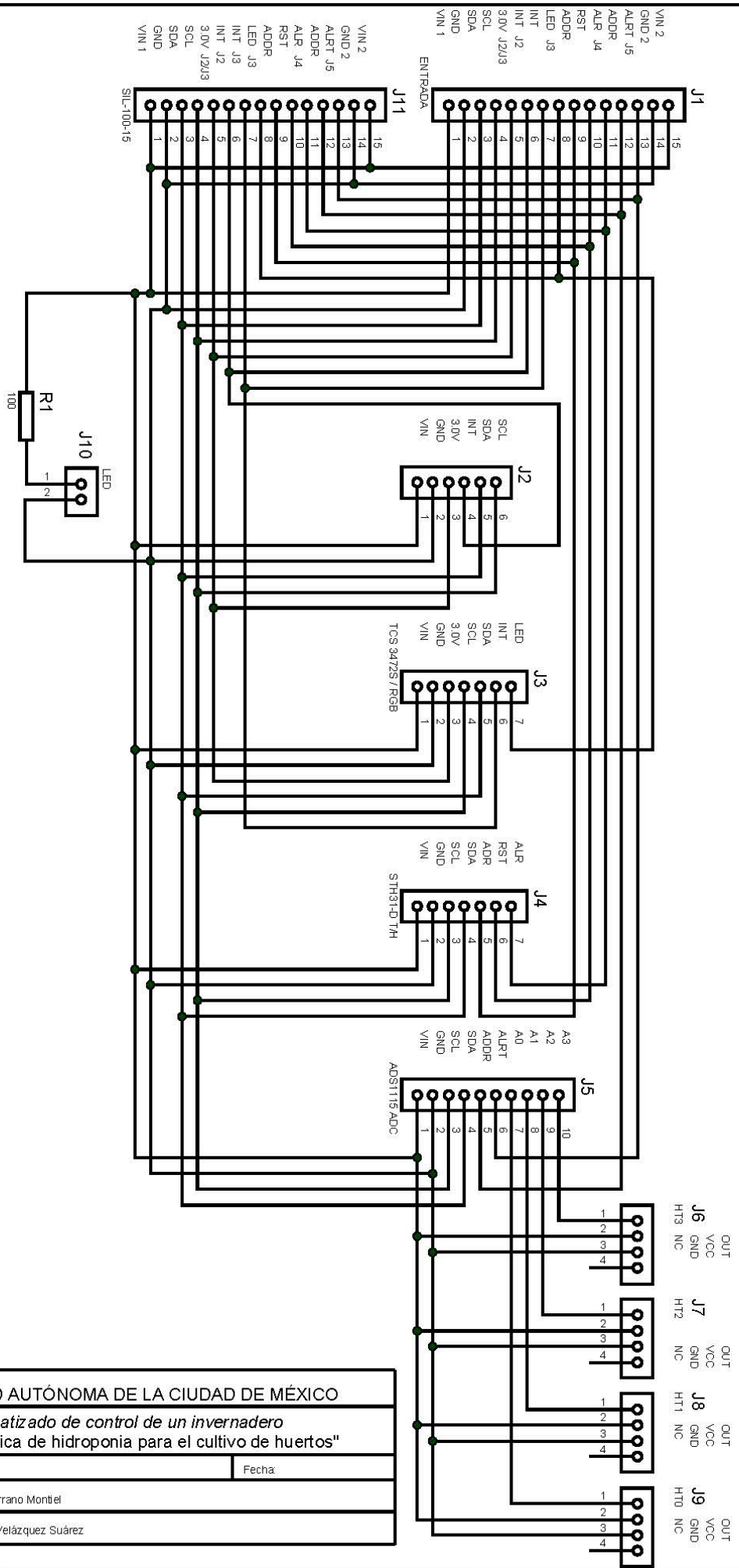
-
- [³⁰] Creus, C. (2011). *Medida de temperatura. Instrumentación industrial* (p.235). México D.F: Alfaomega Grupo Editorial,S.A. de C.V.
- [³¹] Sobrino, J. (2000). *Teledetección*. Valencia (España).: Guada Impresores S.L.
- [³²] Ruiz, A., García,F.,& Noguera,J. (2010). *Guía Práctica de Sensores*. España: Creaciones Copyright, S.L
- [³³] DF Robot. *Moisture Sensor*. abril 6, 2018, de DFROBOT Sitio web: [https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Moisture_Sensor_\(SKU:SEN0114\)](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Moisture_Sensor_(SKU:SEN0114))
- [³⁴] Pallas R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona España, editorial Marcombo.
- [³⁵] AMS. (septiembre 2, 2016). *TSL2591 Light-to-Digital Converter*. diciembre 20, 2017, de AMS. https://ams.com/documents/20143/36005/TSL2591_DS000338_6-00.pdf/090eb50d-bb18-5b45-4938-9b3672f86b80
- [³⁶] AMS. diciembre 20, 2017, de AMS Sitio web: <http://ams.com/eng>
- [³⁷] AMS. (Abril 2013). *TSL2591 Datasheet*. En TSL2591 (pp.1-25). Austria: <http://ams.com/eng/content/advancedsearch>.
- [³⁸] Motorola. (2001). *10kPa Uncompensated Silicon Pressure Sensors*. abril 4, 2018, de Motorola Sitio web: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/motorola/MPX10.pdf>
- [³⁹] Burón, A., Michell, J., Solana, J., & Ruiz, G. (1993). *Microelectrónica 92 monografías*. Santander España: Universidad de Cantabria.
- [⁴⁰] Freescale Semiconductor. (2008). *10 kPa Uncompensated Silicon Pressure Sensors*. 14/09/2017, de NPX Semiconductor Sitio web: <https://cache.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX10.pdf>, P. (1-7).
- [⁴¹] Pérez, M.. (2017). *Sistemas auxiliares del motor 2.ª edición*. Madrid España: Paraninfo.
- [⁴²] Carrillo, J., & Contreras, Ó. (2015). *Experiencias estatales y transfronterizas de innovación en México*. México.: DDO Producciones.
- [⁴³] Alcalde, P. (2011). *Electrotecnia*. España: Paninfo.
- [⁴⁴] Maloney, T. (2006). *Electrónica industrial moderna*. México: PEARSON Prentice Hall. PP.545-549
- [⁴⁵] Mott, R.. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Educación.
- [⁴⁶] Negrete, J. (2005). *apuntes de Física General*. Ciudad Universitari,05410,México. D.F.:

Unidad de Servicios Editoriales.

- [⁴⁷] Areny, R.. (1993). *Adquisición y distribución de señales*. Barcelona (España): Marcombo.
- [⁴⁸] Nerkrason, B. (1988). *Hidraulica*. Moscu: Editorial Mir Moscu.
- [⁴⁹] Heras, S. (2011). *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. Barcelona: Universidad Politecnica de Catalunya.
- [⁵⁰] Wilson, J., Buffa, A. (2003). *Fisica*. México: Pearson.
- [⁵¹] Jutglar, L., Galán, M. (2012). *Termotecnia*. España: Marcombo.
- [⁵²] Jutglar, L., Miranda, A. & Villarruvia, M. (2011). *Manual de calefacción*. Barcelona: marcombo.
- [⁵³] Alfi, A., Tognoni, F. (1999). *Cultivo en invernader*. Madrid: Grupo Mundi- Prensa.
- [⁵⁴] Hung, Y., Freedman, R.. (2008). *Fisica Universitaria con Física Moderna*. México: Pearson.
- [⁵⁵] Alcalde, P. (2014). *Electrotecnia*. España: Paraninfo.
- [⁵⁶] Gago, A., Fraile, J. (2012). *Iluminación con tecnología LED*. España: Paraninfo.
- [⁵⁷] Campos, F. (Dirección). (2015). *LED*. 13/112017, de Universidad de Granada Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=N73txERy5Fs>
- [⁵⁸] Amigo, M., & O, Armas.. (2012). *Frío industrial y aire acondicionado*. Ciudad Real : Universidad de Castilla-La Mancha.
- [⁵⁹] J.F. Leal, M.M. León y S.B. Sepúlveda. (2015, septiembre 23). *The Schottky diode as attenuator of the Seebeck effect on a Peltier cell for a PID temperature control*. Entre Ciencia e Ingeniería, ISSN 1909-8367, Año 9 No. 18 - Segundo Semestre de 2015, pp.75-83.
- [⁶⁰] Cuiinci. *Peltier Application Note*. diciembre 12, 2017, de Cuiinci Sitio web: <https://www.cui.com/catalog/resource/Peltier-app-note.pdf>
- [⁶¹] Cuiinci. *Peltier module*. diciembre 20, 2017, de Cuiinci Sitio web: <https://www.cui.com/product/resource/cp60.pdf>
- [⁶²] Fundación Raspberry Pi. *¿Qué es una Raspberry Pi?*. Enero, 29 2018, de Fundación Raspberry Pi Sitio web: <https://www.raspberrypi.org/help/what-%20is-a-raspberry-pi/>
- [⁶³] Duque, R., *Python para todos*. Enero 24, 2018, de python Sitio web: <https://launchpadlibrarian.net/18980633/Python%20para%20todos.pdf>

-
- [⁶⁴] Fundación Raspberry Pi. *Raspberry Pi Pinout*. Enero, 29 2018, de Fundación Raspberry Pi Sitio web: <https://pinout.xyz/>
- [⁶⁵] NPX Semiconductors. (4 April 2014). *UM10204 I 2C-bus specification and user manual*. Enero 20, 2018, de NPX Semiconductors N. V. Sitio web: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [⁶⁶] Bus I2C. (0000). *I2C – What’s That?*. Enero 20, 2018, de BUS I2C Sitio web: <http://www.i2c-bus.org/>
- [⁶⁷] Ogata, K. (1986). *Ingeniería de control moderna*. México: Prentice Hall.
- [⁶⁸] Kurniawan, A. (2017). *Introducing smart gardening system*. En *Intelligent IoT Projects 7 Days*(pp. 31-63). Birmingham - Mumbai: Packt.
- [⁶⁹] Primo, E., & Yefura. (1996). *Química orgánica básica y aplicada: de la molécula a la industria*. España: Editorial Reverte. S.A.
- [⁷⁰] Hydro Environment. *Charolas de germinación plásticas*. Febrero 21, 2018, de Hydro Environment Sitio web: http://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=index&cPath=57
- [⁷¹] Moratiel, R.. (2017). *Riego en cultivos: fundamentos y manejo*. España: Ediciones Mundi Prensa.
- [⁷²] Fernández, E, & Camacho, F. *Manual práctico de Fertirrigación en riego por goteo*. Madrid España: Ediciones Agrotécnicas S.L.
- [⁷³] Lady Ada. *Adafruit SHT31-D Temperature & Humidity Sensor Breakout*. Marzo 08, 2018, de Adafruit Industries Sitio web: <https://cdnlearn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-sht31-d-temperature-and-humidity-sensor-breakout.pdf>
- [⁷⁴] ST Microelectronics. (2016). *Low-power quad operational amplifiers*. Mayo 05,2018, de STMicroelectronics Sitio web: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/bd/fc/46/43/26/8f/40/7f/CD00001046.pdf/files/CD00001046.pdf/jcr:content/translations/en.CD00001046.pdf>
- [⁷⁵] Maloney, T. (2006). 8 Amplificadores operacionales. *En Electrónica industrial moderna* (p.310-312). México: Pearson.
- [⁷⁶] Coughlin, R., & Driscoll, F.. (1993). 8 Amplificadores diferenciales, de instrumentación y de puente. *amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales* (p.209-217). México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S A.

-
- [⁷⁷] Floyd, T. (2006). *Introducción al procesamiento digital de la señal*. En fundamentos de sistemas digitales (p.836-844). Madrid: Pearson.
- [⁷⁸] Texas Instruments. (2018). *ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I 2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator*. Mayo 05, 2018, de Texas Instruments Sitio web: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>
- [⁷⁹] Boylestad,R &, Nashelsky, L. (2003). 4 polarización de dc de los BJT. *En Electrónica, teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (P. 220-222). México: Pearson.
- [⁸⁰] Castro, R. (2014). El activo transistor. En *Electrónica*(p.71-72). México: Grupo Editorial Patria.
- [⁸¹] Malvino, A., & Leach, D. (1993). En *Principios y aplicaciones digitales*(p.204). España: Marcombo.
- [⁸²] Martínez, J. *Electrónica de potencia*. En *Electrónica. Novedad 2017*(pp.150-175). 0000: EDIMEX.
- [⁸³] Braga,N. *Shield para control de motores*. Banco de circuitos, 30, pp.52-62.
- [⁸⁴] Martin, J. (2017). *Electrónica de potencia*. En *Electrónica* (p.150-161). 0000: Editex.
- [⁸⁵] Lujan, C., Ojeda, J., & Sandobal, J. (2014). *1.4 Control de motor dc mediante el protocolo de comunicación can con integrados de la familia DSPIC30F de microchip*. xiv Congreso nacional de ingeniería eléctrica electrónica del Mayab. abril del 2014, 14, p.44-45.
- [⁸⁶] Texas Instruments. (1986). *L293x Quadruple Half-H Drivers*. Mayo 01, 2018, de Texas Instruments Sitio web: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293d.pdf>



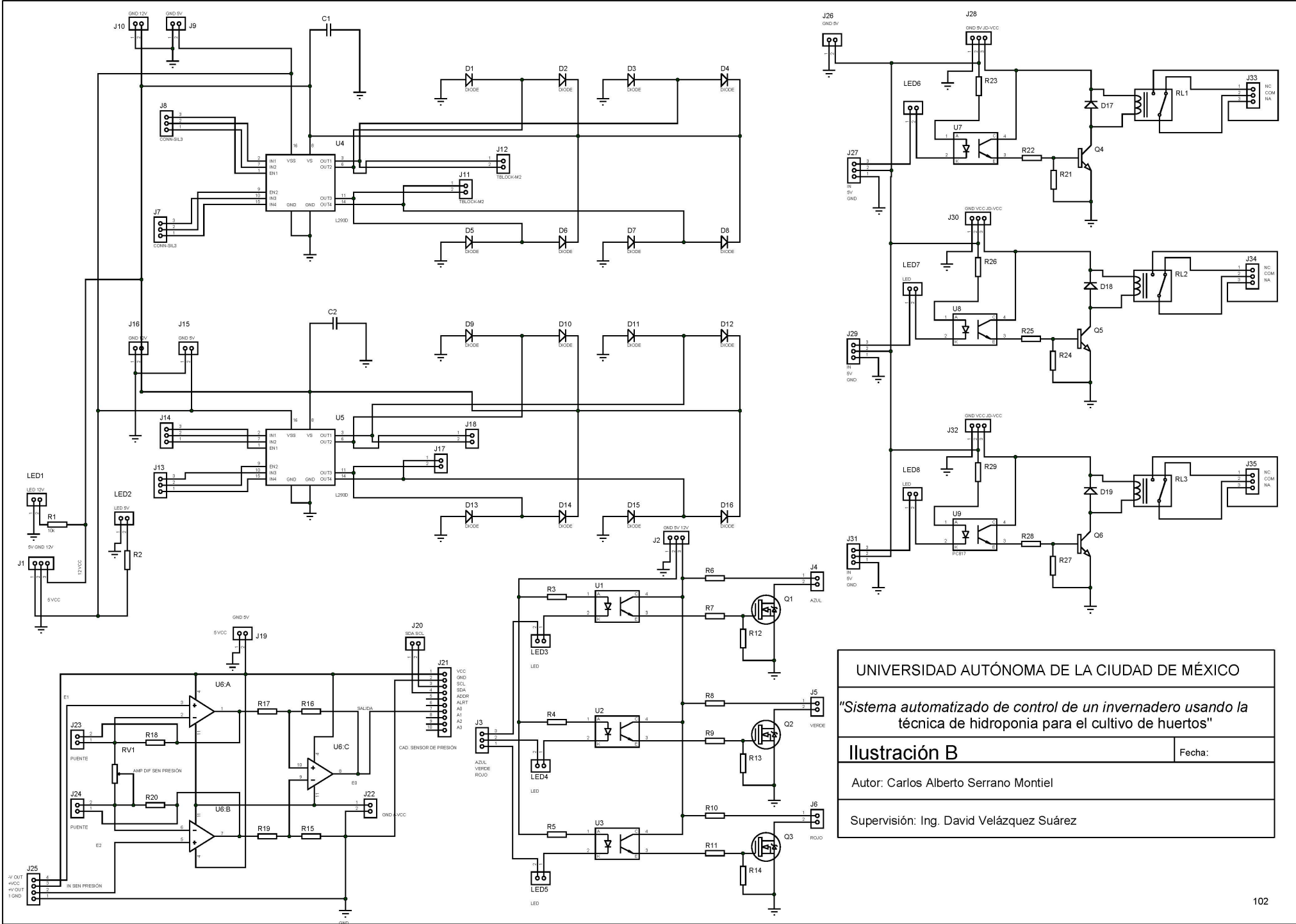
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

"Sistema automatizado de control de un invernadero usando la técnica de hidroponia para el cultivo de huertos"

Ilustración A Fecha:

Autor: Carlos Alberto Serrano Montiel

Supervisión: Ing. David Velázquez Suárez



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

"Sistema automatizado de control de un invernadero usando la técnica de hidroponía para el cultivo de huertos"

Ilustración B Fecha:

Autor: Carlos Alberto Serrano Montiel

Supervisión: Ing. David Velázquez Suárez

Ilustración C

