



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA
Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

UPIITA

Trabajo Terminal II

“Prototipo para el cultivo hidropónico de jitomate cherry
utilizando la técnica de película nutritiva en un invernadero”

Que para obtener el título de:

“Ingeniero en Mecatrónica”

Presentan:

Hernández Espinoza Martín Asael
Mejía Cardona Luis Manuel
Velázquez Ramírez Luis Antonio

Asesores:

M. en C. Luna Reséndiz José Concepción
Academia de Mecánica
UPIITA-IPN

D. en C. León Ponce Moisés
Academia de Electrónica
UPIITA-IPN

Biólogo Flores Espinosa Israel Alejandro
Capacitador de cursos en hidroponía
AMAR A.C.

México D.F.





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA
Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

UPIITA

Trabajo Terminal II

"Prototipo para el cultivo hidropónico de jitomate cherry utilizando la técnica de película nutritiva en un invernadero"

Que para obtener el título de:

"Ingeniero en Mecatrónica"

Presentan:

Hernández Espinoza Martín Asael

Mejía Cardona Luis Manuel

Velázquez Ramírez Luis Antonio

Asesores:

M. en C. Luna Reséndiz José
Concepción

D. en C. León Ponce Moisés

Biólogo Flores Espinosa Israel
Alejandro

Presidente del Jurado

Profesor Titular

M. en C. Hernandez Pérez Alberto

D. en C. Mata Machuca Juan Luis



Contenido

Capítulo I	11
Introducción	11
1.1. Antecedentes	11
1.2 Hidroponía	12
1.2.1 Solución nutritiva	13
1.2.2 Sistemas hidropónicos	13
1.2.2.1 Sistema de columnas	13
1.2.2.2 Riego por goteo	13
1.2.2.3 Sistema aeropónico.....	14
1.2.2.4 Raíz flotante	14
1.2.3 Ventajas del sistema N.F.T. en un invernadero	15
1.3 Características del jitomate cherry.....	15
1.4 Etapas fenológicas de la planta de jitomate	16
Capítulo II	17
Planteamiento del problema	17
2.1 Definición del problema	17
2.2 Solución propuesta	18
Capítulo III	20
Desarrollo de la propuesta	20
3.1 Construcción del invernadero	20
3.1.1 Tipos de invernadero, ventajas y desventajas	20
3.1.2 Estructura y diseño del invernadero.....	22
3.1.3 Deflexión de las vigas que soportaran el peso del jitomate.....	23
3.1.4 Cálculo de velocidad de diseño para análisis de fuerzas y presiones actuantes sobre la estructura.....	25
3.1.4.1 Clasificación de la estructura según su importancia	25
3.1.4.2 Clasificación de la respuesta según su respuesta ante el viento	25
3.1.4.3 Velocidad básica de diseño.....	25
3.1.4.4 Categoría de terreno según rugosidad.....	26

3.1.4.5	Velocidad regional para un periodo de retorno fijo VR.....	26
3.1.4.6	Velocidad regional óptima para minimizar costos VRO.....	26
3.1.4.6	Factor de exposición FRZ.....	27
3.1.4.6	Factor de topografía FT.....	27
3.1.5	Diseño de la estructura del techo del invernadero.....	27
3.1.6	Acoples para los tubos de PTR.....	28
3.1.7.	Proceso de construcción y estructura física.....	28
3.1.8	Recubrimiento del invernadero.....	29
3.1.9	Plástico de recubrimiento.....	29
3.1.10	Malla antiafidos.....	30
3.1.11	Ground cover.....	30
3.1.12	Instalación de los recubrimientos.....	31
3.2	Construcción del sistema N.F.T.....	31
3.2.1	Soportes y tubería.....	31
3.2.2	La aireación y evaporación en los tubos.....	32
3.2.3	Soportes.....	32
3.2.4	Estructura física del sistema N.F.T.....	33
3.2.5	Potencia de la bomba sumergible.....	34
3.3	Solución nutritiva.....	35
3.3.1	Fórmula california.....	36
3.4	Desarrollo del sensor de pH.....	37
3.4.1	Potenciometría y sensores potenciométricos.....	37
3.4.2	Construcción del sensor de pH.....	38
3.4.3	Instrumentación para el sensor potenciométrico.....	40
3.4.4	Acondicionamiento de la señal del ISE.....	41
3.5	Desarrollo del sensor de CE.....	41
3.5.1	Circuito del sensor Conductividad Eléctrica.....	42
3.6	Monitoreo de la temperatura dentro del invernadero.....	44
3.6.1	Sensor de temperatura.....	44
3.6.2	Calefacción.....	45
3.6.3	Ventilas laterales y ventila cenital.....	45
3.6.4	Mecanismos de las ventilas laterales y cenital.....	46
3.6.6	Etapa de potencia del calefactor.....	47

3.7 Monitoreo de la humedad relativa	48
3.7.1 Sensor de humedad relativa	48
3.8 Monitoreo de la radiación.....	49
3.8.1 Sensor de radiación	49
3.8.2 Reflector de LED RGB	50
3.8.3 Diseño del alumbrado dentro del invernadero	51
3.8.4. Etapa de potencia de los reflectores de LED RGB	52
3.9 Lógica del sistema de control	53
Capítulo IV	55
Validación del sistema	55
4.1 Resultado final del invernadero y sistema N.F.T.	55
4.2 Preparación de la solución nutritiva	56
4.3 Resultados del sensor de pH.....	57
4.4 Resultados del sensor de CE.....	58
4.5 Evaluación del filtro pasa bajas	60
4.6 Resultados del monitoreo de temperatura.....	61
4.7 Resultados del monitoreo del sensor de radiación	62
4.8 Crecimiento del jitomate cherry en el sistema N.F.T.....	63
4.9 Sistema de control	64
Conclusiones	65
Anexos	68

Índice de Figuras

Capítulo I

- Figura 1.1 Sistema de columnas
Figura 1.2 Riego por goteo
Figura 1.3 Sistema aeropónico
Figura 1.4 Sistema de raíz flotante
Figura 1.5 Sistema N.F.T.
Figura 1.6 Jitomate cherry
Figura 1.7 Etapas fenológicas de la planta

Capítulo II

- Figura 2.1 Bosquejo del prototipo
Figura 2.2 Diagrama del sistema de control

Capítulo III

- Figura 3.1 PRT
Figura 3.2 Estructura y dimensiones del invernadero
Figura 3.3 Diagrama de fuerzas en Newton
Figura 3.4 Fuerzas cortantes en Newton
Figura 3.5 Momentos en N*mm
Figura 3.6 Dimensiones del techo del invernadero
Figura 3.7 Bisagras en la ventila cenital (A), tubos de PTR (B)
Figura 3.8 Acople para la unión de tubos PTR
Figura 3.9 Construcción de estructura
Figura 3.10 Colocación del perfil C
Figura 3.11 Perfil C y alambre
Figura 3.12 Película pentacapa de polietileno lechosa con 30% de sombra
Figura 3.13 Malla antiafidos
Figura 3.14 Ground cover
Figura 3.15 Instalación de los recubrimientos en el invernadero
Figura 3.16 Dimensiones del tubo de PVC
Figura 3.17 Diseño de soportes
Figura 3.18 Diseño de la tubería para el sistema de riego en SolidWorks ®
Figura 3.19 Parámetros a considerar para obtener potencia de la bomba sumergible
Figura 3.20 Nutrientes esenciales para el crecimiento de una planta
Figura 3.21 Celdas para realizar medidas de potencial utilizando el ISE
Figura 3.22 Diseño electrodo ISE
Figura 3.23 Tubos de PVC con capa de epoxy-grafito
Figura 3.24 Membrana
Figura 3.25 Colocación de membrana dentro de la campana de extracción de gases

Figura 3.26	Electrodo selectivo a iones
Figura 3.27	Amplificador de instrumentación INA128
Figura 3.28	Filtro activo universal UAF42
Figura 3.29	Circuito de acondicionamiento del sensor de pH
Figura 3.30	Medida de la CE (A), Sonda para medir la CE (B)
Figura 3.31	Oscilador puente de Wien y amplificador no inversor
Figura 3.32	Soluciones de calibración
Figura 3.33	Sensor de temperatura DS18B20
Figura 3.34	Calefactor eléctrico (A), ducto de hule termoplástico (B)
Figura 3.35	Convección natural dentro del invernadero
Figura 3.36	Mecanismos de vidrios automáticos en automóviles
Figura 3.37	Mecanismos de ventilas del invernadero
Figura 3.38	Esquemático de la etapa de potencia del calefactor
Figura 3.39	. Etapa de potencia del calefactor
Figura 3.40	Sensor de humedad HMZ-433A1
Figura 3.41	Sensor de radiación (A), Esquemático de conexión (B)
Figura 3.42	Reflector LED RGB
Figura 3.43	Dimensiones del invernadero, vista superior (A) y vista lateral (B)
Figura 3.44	Distribución del número de lámparas obtenido
Figura 3.45	Esquemático de la etapa de potencia
Figura 3.46	Etapa de potencia para los reflectores RGB

Capítulo IV

Figura 4.1	Sistema N.F.T. dentro del invernadero
Figura 4.2	Semilleros con las plantas de jitomate e implementación de la planta en N.F.T.
Figura 4.3	Preparación de la fórmula californiana
Figura 4.4	Circuito físico del sensor de pH
Figura 4.5	Curva de calibración del sensor de pH
Figura 4.6	Circuito del sensor de CE (A), Sonda de CE (B)
Figura 4.7	Conductímetro (A), Soluciones de calibración (B)
Figura 4.8	Evaluación de la conductividad
Figura 4.9	Grafica de la respuesta del sensor de CE
Figura 4.10	Señal sin el UAF42 (A), señal con el filtro pasa bajas (B)
Figura 4.11	Evaluación ventilas cenitales
Figura 4.12	Lámpara RGB dentro del invernadero
Figura 4.13	Crecimiento del jitomate cherry en el sistema N.F.T.
Figura 4.14	Planta en el sistema N.F.T. (A), Planta en sustrato de fibra de coco (B)
Figura 4.15	Sistema de control

Resumen

Hoy en día, la automatización de la hidroponía en invernaderos depende parcial o totalmente de la tecnología extranjera. La mayoría de las personas que trabajan con estos cultivos, compran los actuadores y los instrumentos de medición necesarios por separado. Por lo tanto, necesitan personal técnico o especializado para diseñar y construir el sistema de control.

El prototipo tiene como objetivo conjuntar en un sistema de control único, cada elemento como temporizadores, sensor de temperatura, sensor de conductividad eléctrica (CE) y sensor del potencial de hidrógeno (pH).

En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo para el cultivo hidropónico de jitomate cherry utilizando la técnica de película nutritiva, en un invernadero. El prototipo permite acondicionar el clima interior del invernadero y proporcionar la solución nutritiva de la planta para su crecimiento.

El prototipo semi-automatizado es capaz de tener control de la solución nutritiva, temperatura, humedad relativa y radiación solar. El monitoreo de la solución nutritiva se lleva a cabo con los cambios de pH y la conductividad eléctrica de la disolución. De esta manera el sistema de control toma la decisión de seguir o cancelar los riegos programados durante el día. Con el control de temperatura dentro del invernadero el sistema activa o desactiva las ventilas laterales o cenitales del invernadero y el calefactor. Finalmente el sistema de control registra la radiación solar para activar o desactivar la luz artificial dentro del invernadero durante un tiempo determinado.

Abstract

Now a days, the automation of hydroponics in greenhouses depends partially or totally of the foreign technology. Most people are working with these crops, are buying the actuators and instrumentation required to measure separately. Therefore, they need technical or specialized personnel to design and build the control system.

The prototype aims to combine into a single control system, each element such as timers, temperature sensor, conductivity sensor (CE) and the sensor potential Hydrogen (pH).

In this paper the development of a prototype for hydroponic cherry tomatoes using the nutrient film technique, in a greenhouse is presented. The prototype allows conditioning the climate inside the greenhouse and provide the nutritional solution to the tomato plant for its growth.

The semi-automated prototype will be able to have control of the nutrient solution, temperature, relative humidity and solar radiation. The monitoring of the nutrient solution is carried out with changes of pH and electrical conductivity of the solution. Thus the control system takes the decision of whether to continue or cancel the scheduled irrigation during the day. With the temperature control inside the greenhouse, the system will activate or deactivate the side vents or zenith greenhouse and heater. Finally, the control system registers the solar radiation to on or off the artificial light inside the greenhouse for the necessary time.

Objetivo general

Crear un prototipo para el cultivo hidropónico de jitomate cherry utilizando la técnica de película nutritiva (*N.F.T.: Nutrient Film Technique*) en un invernadero.

Objetivos específicos

- Diseñar la estructura y mecanismos de ventilación del invernadero.
- Diseñar y construir el sistema hidropónico.
- Diseñar y construir el sistema de control.
- Diseñar y construir la etapa de alimentación del sistema.

Introducción

El cultivo bajo invernadero siempre ha permitido obtener producciones de primera calidad y mayores rendimientos en cualquier momento del año, a la vez que permiten alargar el ciclo de cultivo, permitiendo producir en las épocas del año más difíciles y como premisa obtener mejores ganancias.

Este incremento del valor de los productos permite que el agricultor pueda invertir tecnológicamente mejorando la estructura del invernadero, los sistemas de riego localizado, los sistemas de gestión del clima, etc., que se reflejan posteriormente en una mejora de los rendimientos y de la calidad del producto final [1].

Al día de hoy se ha optado en distintos lugares del mundo por impulsar los cultivos hidropónicos pues estos son muy amigables con el medio ambiente. Los cultivos son higiénicos, no requieren fertilizantes e insecticidas en grandes cantidades, es por ello que actualmente se está avanzado en los procesos y métodos de cultivo hasta el punto de introducir ya desde algunos años atrás automatización o semi automatización.

Actualmente se pueden producir cultivos hidropónicos en la comodidad de los hogares sin demandar demasiado espacio. También se pueden conseguir kits para regular ya sea humedad relativa, temperatura, pH, CE, soluciones nutritivas o bien sistemas de riego. Existen algunos proveedores dentro de la ciudad de México con productos variados para la hidroponía y se pueden adquirir sin ningún problema.

A pesar de los avances dentro de los cultivos hidropónicos y de la facilidad con que se adquieren los productos, la autora Gloria Samperio Ruiz en [2] manifiesta que para poder introducir automatización hay que adquirir la tecnología del extranjero, lo cual es poco viable dado que desde el principio la inversión inicial es alta y más aún si se trata de automatizar el cultivo. Un aspecto de igual manera importante que se nos dio a conocer en un curso de hidroponía para el cultivo de jitomate impartido por la fundación Amar A. C. es que en cierta medida el problema no es la carencia de tecnología para cultivos hidropónicos, si no que en específico en México, no existe una empresa la cual se dedique a realizar toda la instalación para un sistema automatizado y los proyectos que se llevan a cabo en las distintas universidades de la ciudad al finalizar y cuando los estudiantes obtienen sus títulos no le dan continuidad a los proyectos ni aplican sus sistemas para el cultivo hidropónico desarrollados. También nos dan a conocer que hay quienes compran los sistemas necesarios para la automatización, por lo que se contrata a alguien que les instale el sistema o bien contratan personal del extranjero para automatizar, al final no siempre están en funcionamiento los sistemas automatizados dado que el personal no tiene capacitación para operarlo.

1.1. Antecedentes

En UPIITA existe gran interés en los cultivos realizados dentro de un invernadero por lo que se encontró una amplia variedad de trabajos terminales enfocados a ello, pero de los cuales solo dos hacen referencia al cultivo hidropónico.

El primero se llama “Prototipo de invernadero hidropónico semi-automatizado para el cultivo de jitomate en casa habitación”. La diferencia radica en la técnica hidropónica utilizada, ya que se enfocó en cultivos realizados con sustrato y el presente trabajo se enfocó en la técnica *N.F.T.* Los requerimientos de cada técnica son distintos por lo que el control del cultivo hidropónico en sustrato es distinto al necesario para la técnica *N.F.T.* [3].

El segundo se llama “Prototipo de un sistema mecatrónico de riego para cultivos hidropónicos” el cual se encarga únicamente de un sistema de riego que incluye tratamiento del agua y preparación de la solución, así como el control. Al final se retorna a un punto inicial, donde solo hay sistemas para hidroponía por separado y no se desarrolla nada en conjunto. Este proyecto pretende precisamente ofrecer una solución a esta problemática y darle continuidad [4].

UPIITA presta especial interés en trabajos enfocados a la agricultura, y se espera que continúen realizándose este tipo de proyectos para apoyar al sector agrícola ya que fortalecer este sector permite que un país ya no dependa de la compra de productos alimenticios a otros países. La situación geográfica de México y sus riquezas naturales que posee son favorables para la explotación de productos agrícolas, lamentablemente el máximo aprovechamiento no ha sido posible debido a problemas económicos y tecnológicos.

1.2 Hidroponía

La hidroponía es parte de los sistemas clasificados como cultivos sin suelo. En estos sistemas el medio de crecimiento de la planta está constituido por sustancias de diverso origen (sustratos), orgánico o inorgánico, inertes o no inertes, es decir, con tasa variable de aportes a la nutrición mineral de las plantas [5]. Mediante esta técnica es posible obtener hortalizas de excelente calidad y sanidad, permitiendo un uso más eficiente del agua y fertilizantes [6].

En la técnica *N.F.T.* (Técnica de película nutritiva por sus siglas en inglés) no se utiliza sustrato, se basa en una capa de disolución nutritiva que continuamente esta en recirculación, pasando a través de las raíces de las plantas. De esta forma las plantas absorben agua, nutriente y oxígeno. La técnica *N.F.T.* destaca en relación a otros sistemas hidropónicos en la alta calidad obtenida de diferentes productos agrícolas en un corto período de cultivo, en rendimiento y la constante oferta de agua y elementos minerales que permiten a la planta crecer con poco estrés hídrico [7].

1.2.1 Solución nutritiva

La solución nutritiva es la combinación de todos los nutrientes disueltos en agua que una planta requiere para su buen desarrollo. La adecuada preparación y manejo de la solución nutritiva puede garantizar en gran medida el éxito en el cultivo, del cual se propone utilizar una fórmula ya establecida llamada California [8].

1.2.2 Sistemas hidropónicos

1.2.2.1 Sistema de columnas

Las plantas crecen en un sistema de columnas hechas de PVC o mangas plásticas. En cada columna, las macetas son apiladas y perforadas para drenar la solución nutritiva hacia la maceta inferior y así sucesivamente. Está restringido al cultivo de plantas de porte pequeño como la fresa (Figura 1.1).



Figura 1.1. Sistema de columnas.

1.2.2.2 Riego por goteo

Es el más utilizado a nivel mundial. Su principal característica es que utiliza sustratos con espacios vacíos que permiten sostener altos niveles de agua y aire. La solución nutritiva es suministrada a través de goteros conectados en mangueras. El sistema es utilizado para la producción de cultivos de frutos como tomate, pimiento, pepinillo, entre otros (Figura 1.2).



Figura 1.2. Riego por goteo.

1.2.2.3 Sistema aeropónico

En este sistema las plantas crecen sostenidas en las perforaciones de planchas de telgopor (poliestireno extendido). Las raíces están suspendidas en el aire bajo la plancha y encerradas en una cámara de aspersión. La cámara está sellada por lo que las raíces están en la oscuridad y saturadas de humedad. Un sistema de nebulización rocía periódicamente la solución nutritiva sobre las raíces. Este sistema se utiliza para cultivos de hojas de poca altura (Figura 1.3).

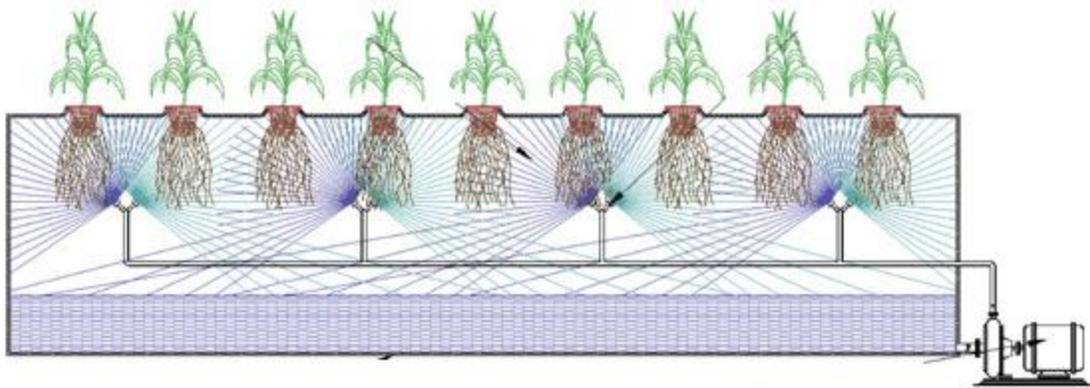


Figura 1.3. Sistema aeropónico.

1.2.2.4 Raíz flotante

En este sistema las raíces de las plantas están sumergidas parcialmente en la solución nutritiva. Este sistema ha sido adaptado para ser utilizado en el cultivo de hortalizas de hojas como lechuga, albahaca, apio, menta y hierba buena entre otros (Figura 1.4).



Figura 1.4. Sistema de raíz flotante.

1.2.3 Ventajas del sistema N.F.T. en un invernadero

La ventaja del sistema N.F.T. que destaca en relación a otros sistemas hidropónicos, es la alta calidad obtenida de diferentes productos agrícolas en un corto período de cultivo, como también en rendimiento. La constante oferta de agua y elementos minerales permite a la planta crecer con poco estrés hídrico y obtener el potencial productivo del cultivo. Además es posible obtener precocidad, lo que para algunos mercados locales implica un mejor precio [9].

En el sistema NFT, se debe contar al inicio con plántulas, cuya semilla debe haber germinado previamente (Figura 1.5).

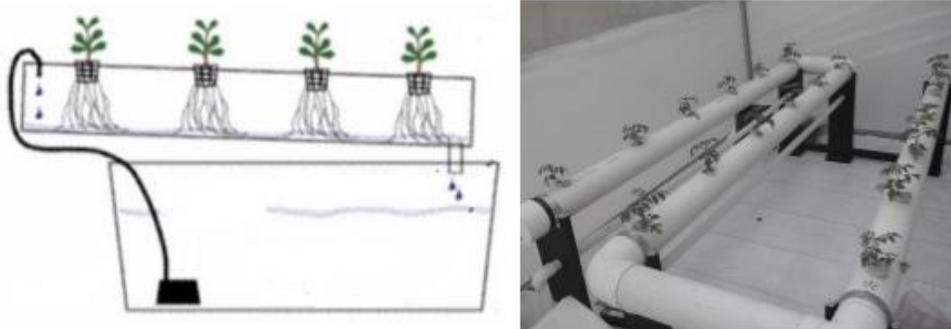


Figura 1.5. Sistema N.F.T.

1.3 Características del jitomate cherry

Se optó por el jitomate cherry (Figura 1.6) debido a las bondades que presenta para su cultivo, esto debido a que es una planta silvestre, lo que significa que puede crecer de manera natural sin tantos cuidados por el hombre, tiene mejor capacidad de adaptarse al medio y es por naturaleza resistente a plagas y enfermedades [10].

Los jitomates cherry (*Lycopersicon esculentum*) denominados de este modo por su color rojo intenso y su aspecto similar al de las cerezas, tiene un diámetro entre 1 y 3 cm, y su peso oscila entre los 10 y 15 gr. La ración admitida por lo tanto es de 12 a 15 tomates. Pueden consumirse durante todo el año, y representan una interesante alternativa de producción, ya que pueden producirse exitosamente de forma tradicional y en invernaderos [10].



Figura 1.6. Jitomate cherry.

1.4 Etapas fenológicas de la planta de jitomate

La fase inicial que es de 1 a 21 días no está considerada dentro del prototipo del invernadero semi-automatizado. Para el sistema hidropónico N.F.T. se considera obtener las plantas a partir de los 21 días (Figura 1.7).

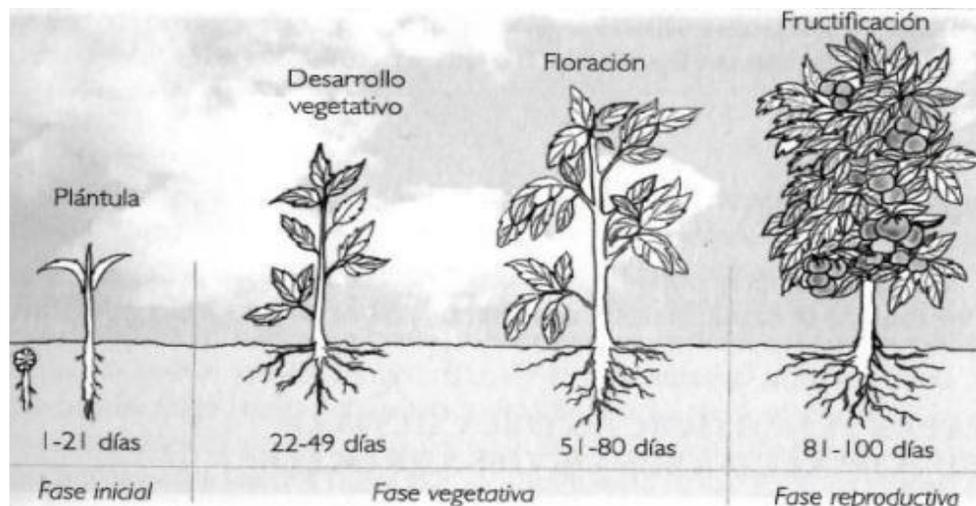


Figura 1.7. Etapas fenológicas de la planta.

La fase vegetativa y la fase reproductiva son las fases que están consideradas dentro de la técnica N.F.T. ya que esta técnica inicia con plántulas que estén por iniciar su desarrollo vegetativo. La semi-automatización del clima, así como, del sistema de riego está enfocada solo a estas 2 fases del desarrollo del jitomate.

Las temperaturas recomendadas para cada etapa del crecimiento del jitomate se muestran en la tabla 1.1 [8].

Tabla 1.1. Temperatura de acuerdo a la etapa fenológica de la planta

Etapa fenológica	Temperatura diurna(°C)	Temperatura nocturna (°C)
Germinación	18-20	No registrada
Crecimiento	22-25	15
Floración	22-25	13-17
Fructificación	25	18

Planteamiento del problema

Los requerimientos en hidroponía son variados, dependiendo del cultivo hidropónico que se trabaje, sin embargo a pesar de haber distintos sistemas de cultivo las necesidades son similares cuando estos se realizan dentro de un invernadero. Por ejemplo, monitorear la temperatura dentro del invernadero, monitorear la CE, monitorear el pH y monitorear la humedad relativa. Es por eso que se plantean tres puntos importantes en este trabajo escrito.

En hidroponía existe:

- Desarrollo tecnológico limitado en la integración de sistemas de monitoreo y control en cultivos hidropónicos.
- Poca flexibilidad en sistemas de riego comerciales.
- Necesidad de constante intervención humana.

2.1 Definición del problema

En base a los puntos antes descritos se desarrolló un prototipo para el cultivo de jitomate Cherry mediante la técnica N.F.T. dentro de un invernadero.

Para ello fue necesario construir un sistema de control, el cual se encargó de hacer un monitoreo climático dentro del invernadero para poder tomar decisiones respecto a la forma en que se compensa el clima para mantener la temperatura e iluminación admisibles para el crecimiento de la planta de jitomate. En el sistema de control se establecieron horarios para los periodos de riego y a la vez se llevó a cabo un monitoreo de la solución nutritiva para mantener en equilibrio los nutrientes que se suministraron a las plantas, para lograr un equilibrio en los nutrientes es principalmente importante el monitoreo del pH y la CE (Figura 2.1).

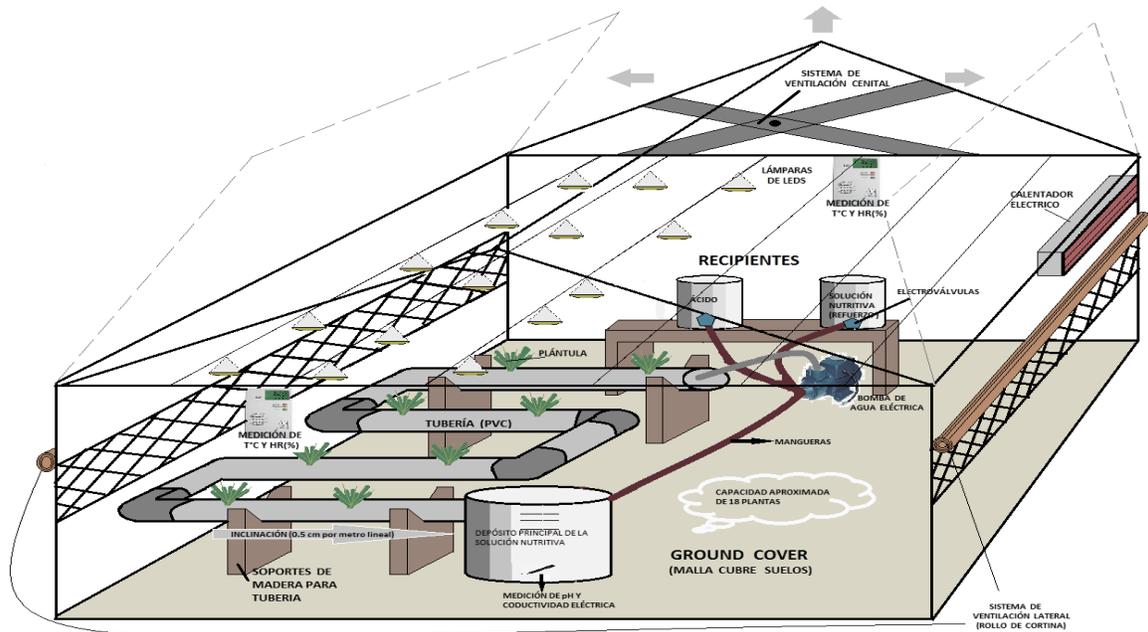


Figura 2.1. Bosquejo del prototipo.

2.2 Solución propuesta

En este presente trabajo se presentan los fundamentos necesarios para conjuntar en un solo sistema de control el monitoreo de la solución nutritiva, temperatura, humedad relativa y radiación solar dentro de un invernadero. Con el monitoreo antes mencionado se compensa con luz artificial en caso de ser necesario, las horas de luz faltantes a la planta de jitomate, mantener una temperatura admisible dentro del invernadero y finalmente mantener el equilibrio de los nutrientes en la solución nutritiva para no afectar el crecimiento de las plantas. El desarrollo del prototipo se conformo principalmente de las siguientes etapas (Figura 2.2):

1. Se fabricó la estructura del invernadero con PTR, ya que es un material resistente y el costo es accesible. La construcción del invernadero con este material resulta ser de baja complejidad. Las dimensiones son 2 metros de ancho por 3 metros de largo y 2.5 metros de altura.
2. Para concluir el proceso de construcción del invernadero se colocó perfil C sobre el perímetro de todo el invernadero para poder anclar a este perfil el plástico, la malla antifidos y el ground cover que recubrieron toda el área de cultivo y aislaron de insectos como de posibles plagas a las plantas de jitomate.
3. Posteriormente se construyó el sistema N.F.T. con capacidad para 18 plantas de jitomate cherry. El material para construir los canales por donde se suministró la solución nutritiva es PVC ya que es resistente e inerte para las plantas.
4. Se llevó a cabo la construcción de los sensores de CE y pH para realizar el monitoreo en la solución nutritiva debido a que el costo de los sensores comerciales es elevado.

5. Después de construir los sensores se caracterizaron para medir los rangos requeridos para el jitomate y se realizó la comunicación de los sensores con el microcontrolador, de manera que los datos obtenidos se mostraran en una LCD y a su vez el controlador alertara cuando la CE o bien el pH estuvieran fuera del rango deseado.

6. En el mismo sistema de control se adquirieron los datos de temperatura, humedad relativa y radiación solar mediante sensores dentro del invernadero. Como parte del sistema se utilizó un reloj en tiempo real (DS1307) para saber en qué hora del día se encontraba el sistema y así tomar decisiones respecto a la ventilación, periodos de riegos y luz artificial.

7. Por las mañanas el sistema de control levanto las ventilas laterales y ventila cenital, es decir activo los motores de 12VCD y cuando anocheció bajo las ventilas laterales y cenital para proteger de temperaturas elevadas al cultivo dentro del invernadero, a la vez el sensor de radiación estuvo activo desde el amanecer hasta el anochecer para brindar luz artificial en caso de ser necesario y cuando las temperaturas fueran aproximadamente de 15°C se activó un calefactor mediante el sistema de control para mantener una temperatura admisible para la planta de jitomate cherry.

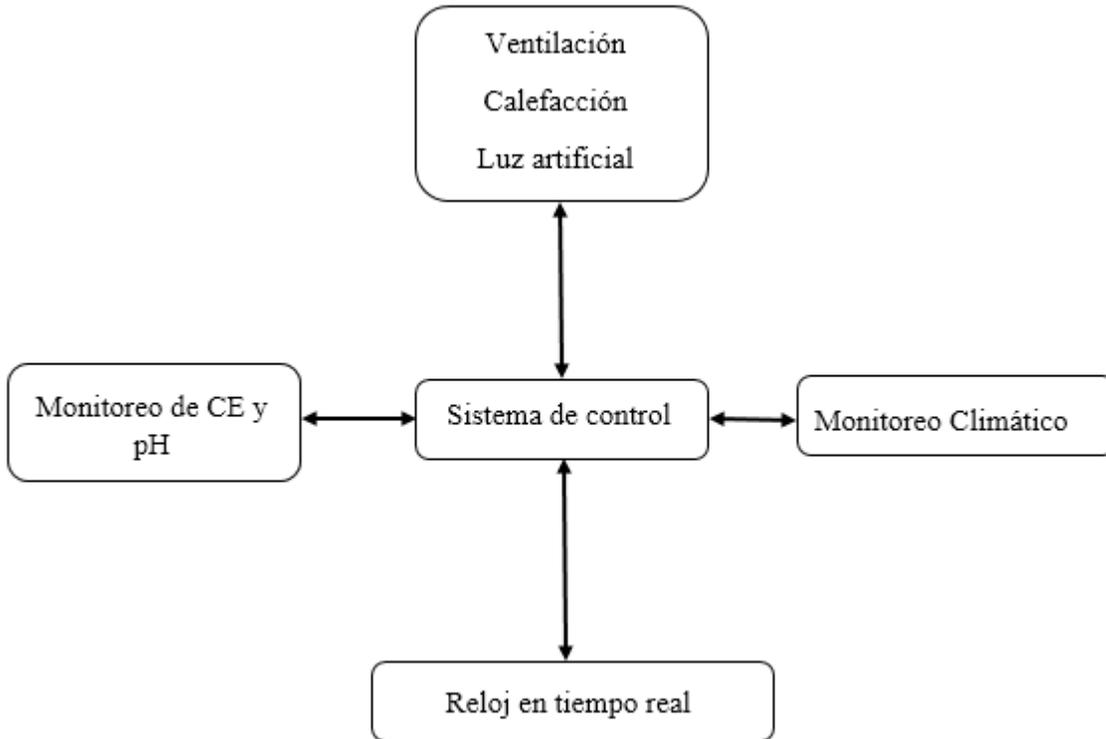


Figura 2.2. Diagrama del sistema de control.

Desarrollo de la propuesta

Este capítulo presenta el desarrollo de la construcción del invernadero, desde la composición de la estructura hasta la colocación de los recubrimientos, completo para la instalación del sistema N.F.T. Construcción del sistema N.F.T. y sus características. Y finalmente la lógica del sistema de control respecto a cómo se realizara el monitoreo climático y de la solución nutritiva.

3.1 Construcción del invernadero

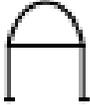
La elección de un tipo de invernadero está en función de una serie de aspectos técnicos tales como las exigencias bioclimáticas de la especie del cultivo, las características climáticas de la zona o área geográfica donde vaya a construirse el invernadero, las disponibilidades de mano de obra (factor humano) y los imperativos económicos locales (mercado y comercialización) [11].

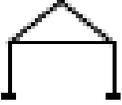
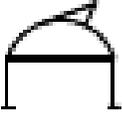
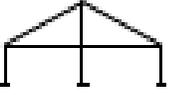
3.1.1 Tipos de invernadero, ventajas y desventajas

El tipo de invernadero que se eligió es un invernadero capilla a dos aguas ya que presenta las siguientes ventajas (Tabla 3.1) [12]:

- Construcción de mediana a baja complejidad.
- Apto tanto para materiales de cobertura flexibles como rígidos.

Tabla 3.1. Tipos de invernadero.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Túnel 	Alta resistencia a los vientos y de fácil instalación. Tiene un alto grado de paso de luz solar. Apto tanto para materiales de cobertura flexible como rígidos	Relativamente pequeño volumen de aire retenido (escasa inercia térmica) pudiendo ocurrir el fenómeno de inversión térmica. Solamente recomendado para cultivos de bajo a mediano porte (lechuga, flores, frutillas, etc.)

<p>Capilla a dos aguas</p> 	<p>Construcción de media a baja complejidad. Utiliza materiales de bajo costo dependiendo de la zona (postes de madera pinos, eucaliptos, etc.). Apto tanto para materiales de cobertura flexible como rígidos.</p>	<p>Problema de ventilación con invernaderos en batería. Misma altura cenital, tiene menor volumen encerrado que invernaderos curvos. Mayores números de elementos que disminuyen la transmisión de luz solar. Elementos de soportes internos que dificultan los desplazamientos y el emplazamiento de cultivos.</p>
<p>Diente de sierra</p> 	<p>Construcción de complejidad. Excelente ventilación. Empleo de materiales de bajo costo.</p>	<p>Sombreo resulta mayor que en capilla debido al número de elementos.</p>
<p>Capilla modificado</p>	<p>Construcción de media complejidad. Excelente ventilación apropiada por la conformación de baterías. Empleo de materiales de bajo costo</p>	<p>Mayor capacidad de sombreado por el número de elementos estructurales y menor capacidad de sombreado comparado con el tipo sierra. Elementos de soporte que dificultan los desplazamientos y emplazamientos del cultivo</p>
<p>Con techumbre curva o túnel de ventila cenital fija.</p> 	<p>Estructuras con pocos obstáculos en su estructura. Buena ventilación. Buena estanqueidad a la lluvia y al aire. Permite la instalación de ventilación cenital a sotavento y facilita su accionamiento mecanizado. Buen reparto de la luminosidad en el interior del invernadero. Fácil instalación.</p>	<p>Elevado coste. No aprovecha el agua de lluvia</p>
<p>Parral</p> 	<p>Es económica su construcción. Gran adaptabilidad para la geometría del terreno. Mayor resistencia al viento. Aprovecha el agua de lluvia en periodos secos. Presenta uniformidad luminosa.</p>	<p>Poca existencia de aire. Mala ventilación. La instalación de ventanas cenitales resulta difícil. Envejece rápido la estructura Difícil mecanización para las labores de cultivo.</p>

3.1.2 Estructura y diseño del invernadero

El perfil tubular rectangular (PTR) es un perfil estructural fabricado en acero Negro o Galvanizado de alta calidad, que se usa principalmente en la industria constructora como invernaderos o estructuras que requieren de material resistente a la fuerza del peso. Ya que es un material resistente y multifuncional (Figura 3.1) [13]:

- El peso es de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM-A-6.
- El acero es de acuerdo a las normas ASTM-A.36 y Dual ASTM-A-36 / A-512 G50.

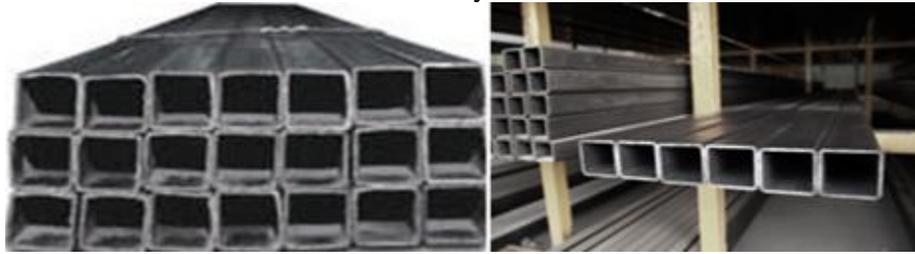


Figura 3.1. PRT.

A continuación en la Figura 3.2 se observa un bosquejo de lo que fue la estructura del invernadero así como sus dimensiones.

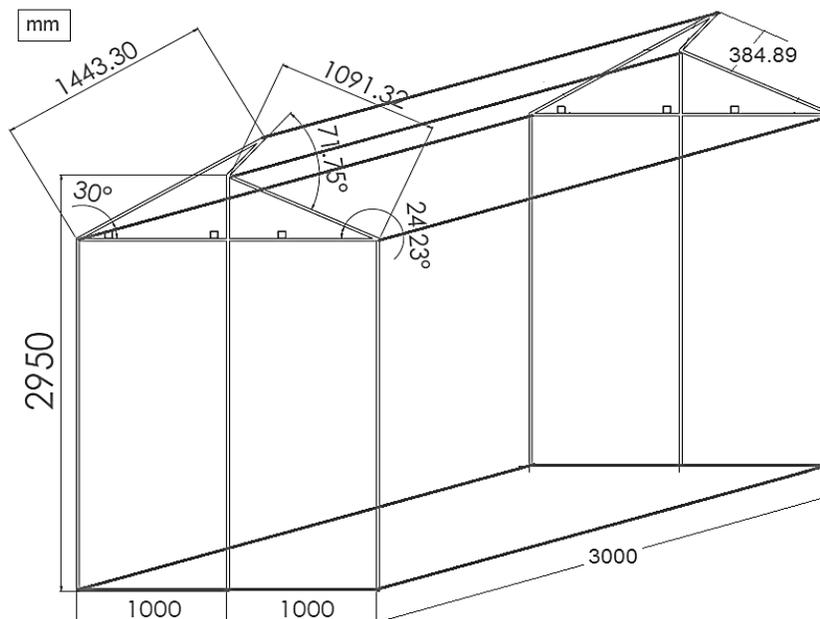


Figura 3.2. Estructura y dimensiones del invernadero.

3.1.3 Deflexión de las vigas que soportaran el peso del jitomate

El peso del jitomate dentro de la estructura es sostenido por tres tubos cuadrados de 2 pulgadas por cada lado y con espesor de 1/16 de pulgada. Cada tubo sostiene el peso de 6 plantas las cuales en su etapa de fructificación pueden llegar a pesar 10 kg cada una. A continuación se muestra el análisis para obtener el diagrama de fuerzas (Figura 3.3), las fuerzas cortantes (Figura 3.4) y momentos (Figura 3.5). Las imágenes presentadas fueron obtenidas en MDSolids 3.5 ®.

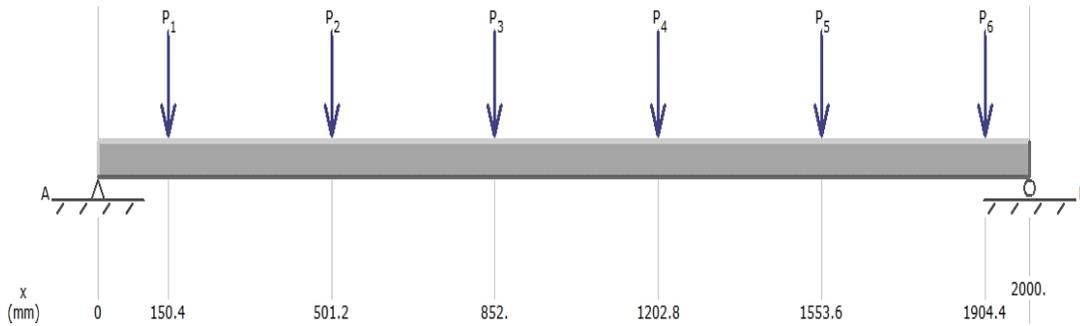


Figura 3.3. Diagrama de fuerzas en Newton.



Figura 3.4. Fuerzas cortantes en Newton.

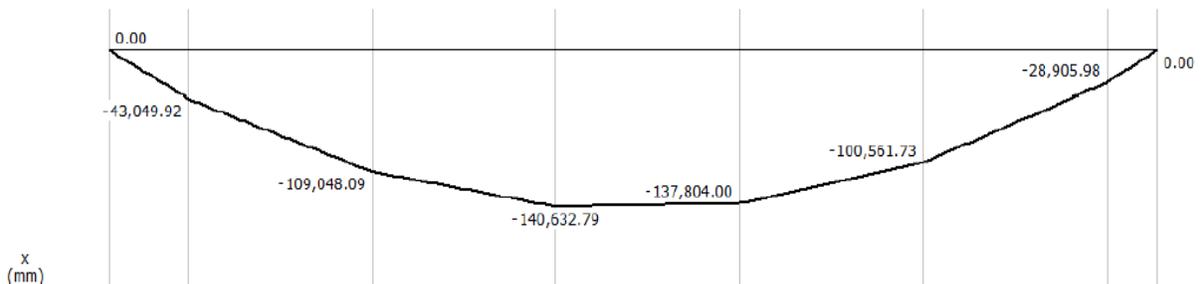


Figura 3.5. Momentos en N*mm.

Las características del acero galvanizado son:

$$E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$\nu = 0.29$$

$$\text{Densidad} = 7870 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Límite elástico} = 203.94 \text{ N/mm}^2$$

$$I = 5.5497 * 10$$

Para analizar cuál será la deflexión en la viga se utilizó el método de doble derivación el cuál se muestra a continuación:

$$EI \frac{dy^2}{d^2x} = -M$$

Entonces la ecuación 1 es:

$$EI \frac{dy^2}{d^2x} = -R_B(x) + 98.1N(x - 95.6) + 98.1(x - 446.4) + 98.1N(x - 446.4) + 98.1N(x - 797.2) + 98.1N(x - 1148) + 98.1N(x - 1498.8) + 98.1N(x - 1849.6) \dots (1)$$

La primera derivada involucra el ángulo de la pendiente (ecuación 2):

$$EI\theta = \frac{-R_B(x^2)}{2} + 98.1N \frac{(x-95.6)^2}{2} + 98.1 \frac{(x-446.4)^2}{2} + 98.1N \frac{(x-446.4)^2}{2} + 98.1N \frac{(x-797.2)^2}{2} + 98.1N \frac{(x-1148)^2}{2} + 98.1N \frac{(x-1498.8)^2}{2} + 98.1N \frac{(x-1849.6)^2}{2} + C1 \dots (2)$$

La segunda derivada es la como tal la deflexión de la viga (ecuación 3):

$$EIy = \frac{-R_B(x^3)}{6} + 98.1N \frac{(x-95.6)^3}{6} + 98.1 \frac{(x-446.4)^3}{6} + 98.1N \frac{(x-446.4)^3}{6} + 98.1N \frac{(x-797.2)^3}{6} + 98.1N \frac{(x-1148)^3}{6} + 98.1N \frac{(x-1498.8)^3}{6} + 98.1N \frac{(x-1849.6)^3}{6} + C1x + C2 \dots (3)$$

Para calcular C2 se considera que en $x = 0, y = 0$ por lo que $C2 = 0$

Y C1 para $x = 2000, y = 0$ por lo que $C1 = 94116690.75$

La deflexión máxima se tiene cuando $\theta = 0$ por lo que se toma la ecuación 2 para obtener x donde y es máxima.

Analizando esto se obtiene dos valores para x :

$$x_1 = 2829.7 \text{ mm (no se utiliza ya que es mayor al largo de la viga)}$$

$$x_2 = 1201.08 \text{ mm (se utiliza este valor)}$$

Utilizando el valor de x_2 la deflexión máxima $y_{max} = -0.504mm$

Se considera que esta deflexión es permitida, por lo que, el elegir un tubo cuadrado de PTR de 1 pulgadas para soportar el peso del jitomate se considera adecuado.

3.1.4 Cálculo de velocidad de diseño para análisis de fuerzas y presiones actuantes sobre la estructura.

Tomando como referencia el Manual de diseño de obras civiles Diseño por Sismo del 2008 se presentan la siguiente información y cálculos [14].

3.1.4.1 Clasificación de la estructura según su importancia

Se eligió grupo B. Estructuras para las que se recomienda un grado de seguridad moderado. Se clasifican en este grupo aquellas que, al fallar, generan baja pérdida de vidas humanas y que ocasionan daños materiales de magnitud intermedia; aquellas cuya falla por viento pueda poner en peligro a otras de este grupo o del grupo A.

3.1.4.2 Clasificación de la respuesta según su respuesta ante el viento

Para la elección se tiene en cuenta la relación de esbeltez que es la relación entre la altura y la menor dimensión de la planta. La mayor altura es de 3.3 m y la menor dimensión de planta de 2 m por lo que $\lambda = 1.65$

Se eligió Tipo 1. Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento. Se agrupan en este tipo aquellas en las que la relación de esbeltez, λ , (definida como la relación entre la altura y la menor dimensión en planta), es menor o igual que cinco y con periodo natural de vibración del primer modo, menor o igual que un segundo. Se consideran dentro de este tipo la mayoría de los edificios para habitación u oficinas, bodegas, naves industriales, teatros, auditorios y puentes cortos.

Las acciones del viento que se tiene que considerar son:

- Empujes medios
- Vibraciones generadas por ráfagas turbulentas en la dirección del viento.
- Vibraciones transversales al flujo y torsión.
- Inestabilidad aerodinámica.

Para tipo 1 solo es necesario analizar los empujes medios del viento.

3.1.4.3 Velocidad básica de diseño

Se tiene que calcular la velocidad básica de diseño la cual se define como $V_D = F_T F_{RZ} V_R$.

Donde:

F_T = Factor que depende de la topografía local (adimensional)

F_{RZ} =Factor que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local (adimensional)

V_R =Velocidad regional de ráfaga dependiendo del sitio de construcción en km/h

3.1.4.4 Categoría de terreno según rugosidad

Para obtener V_R se toma en cuenta la categoría del terreno según rugosidad donde se elige la categoría 3 (la construcción se realizara en el D.F.), las velocidades regionales recomendadas se proporciona bajo condiciones homogéneas preestablecidas tomando en cuenta una categoría 2 y las velocidades son velocidades asociadas con ráfagas de 3 segundos y evaluadas a 10 m de altura en terreno plano.

Categoría 2. Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones.

Categoría 3. Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas.

La velocidad regional se puede obtener considerando un periodo de retorno fijo o una velocidad que minimice el costo total determinado.

3.1.4.5 Velocidad regional para un periodo de retorno fijo V_R

Es la velocidad máxima que puede ser excedida en cierto periodo de retorno T, en años, en una zona o región determinada del país.

Se consideró un periodo de 10 años y en la región del D.F. El mapa de isotoacas (líneas que unen puntos con igual velocidad en un fluido) en [14] muestra una $V_R = 99$ a 113 km/h.

3.1.4.6 Velocidad regional óptima para minimizar costos V_{RO}

Es la máxima velocidad para la cual se minimiza el costo total determinado con el costo inicial de la construcción más el costo de las reparaciones y de las pérdidas, directas e indirectas, en caso de presentarse una falla donde se toma en cuenta el factor de importancia de las pérdidas (Q).

$$Q = \frac{C_I}{C_L}$$

Donde:

C_I = costo inicial de construcción

C_L = costo de las pérdidas directas e indirectas que se tendría de una falla estructural

Para aplicación simplificada se utiliza una $Q = 5$ para el grupo B y en la región del D.F. El mapa de isotoacas en [14] muestra una $V_{RO} = 110 - 135$ km/h.

3.1.4.6 Factor de exposición F_{RZ}

Este factor establece la variación de la velocidad del viento con la altura, en función de la categoría del terreno.

$$F_{RZ} = c \text{ si } z \leq 10$$

Donde:

Z es la altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la velocidad de diseño en m

C es el coeficiente de escala de rugosidad (adimensional)

Tomando en cuenta una categoría tipo 2:

$$F_{RZ} = c = 1.00$$

3.1.4.6 Factor de topografía F_T

Este factor toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio en donde se desplantará la estructura. Se consideró un terreno normal el cual se define como terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes con pendientes menores de 5%.

Entonces el valor de $F_T = 1.0$

Tomando condiciones de $V_R = V_{RO}$ se tomo la velocidad mayor que es de 135km/h

$$\therefore V_D = F_T F_{RZ} V_{RO} = (1.0)(1.0)(135\text{km/h})$$

3.1.5 Diseño de la estructura del techo del invernadero

En la figura 3.6 se presentan las dimensiones del techo del invernadero. En la figura 3.7 se observa la colocación de bisagras en la ventila cenital, lo que permite abrir y cerrar la ventila cenital con ayuda de un motor. Para poder mantener fijo el techo se colocaron tramos de tubo PTR de 1 ¼ “ en las esquinas de la base del techo (Figura 3.7.b).

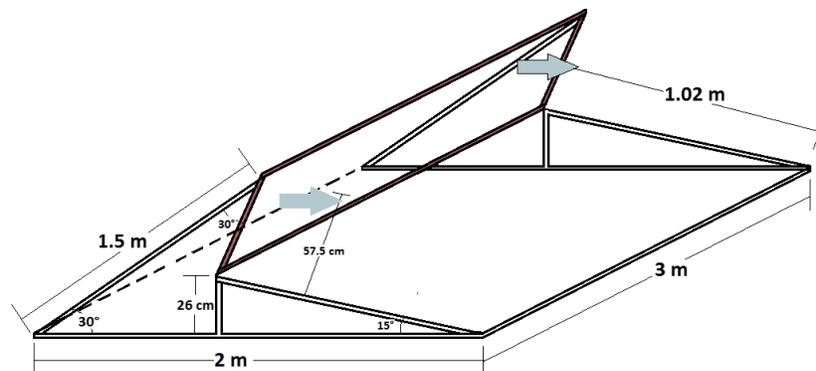


Figura 3.6. Dimensiones del techo del invernadero.

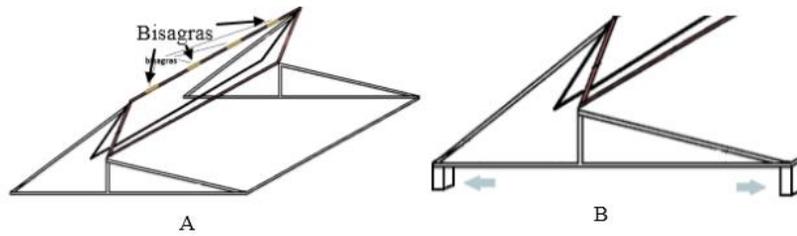


Figura 3.7. Bisagras en la ventila cenital (A), tubos de PTR (B).

3.1.6 Acoples para los tubos de PTR

El acople del tubo de 1 pulgada en el tubo de 1 ¼ de pulgada se realiza mediante un opresor con ayuda de una tuerca soldada a un PTR como se muestra en la figura 3.8. En total el invernadero cuenta con ocho opresores.

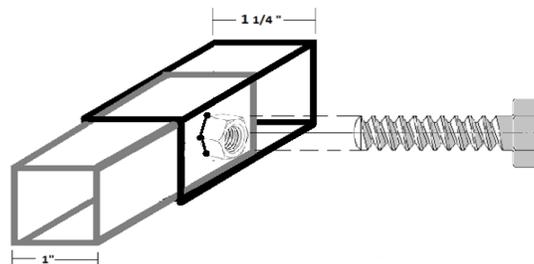


Figura 3.8. Acople para la unión de tubos PTR.

3.1.7. Proceso de construcción y estructura física

En la figura 3.9 se muestran algunas imágenes del proceso de construcción de la estructura del invernadero, el resultado final y posteriormente en la figura 3.10 la colocación a la estructura del perfil C.

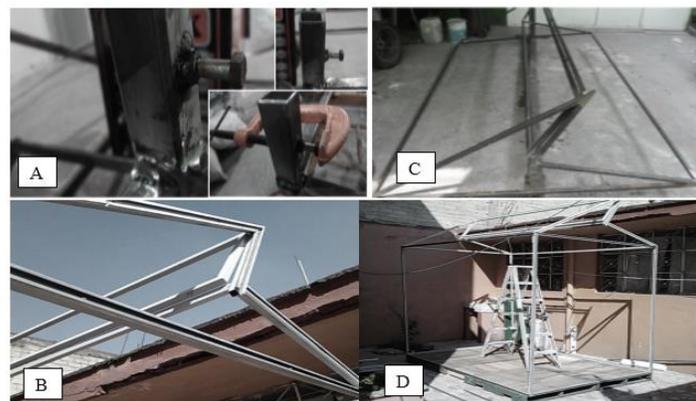


Figura 3.9. Construcción de los opresores (A), vista del techo (B), construcción del techo(C) y estructura física del invernadero (D).

El perfil C se utiliza para sostener el recubrimiento de plástico al invernadero así como la malla antiafidos y el ground cover.



Figura 3.10. Colocación del perfil C.

3.1.8 Recubrimiento del invernadero

Finalmente la cubierta externa del invernadero está compuesta por mallas y plásticos para invernadero, estos deben estar bien colocados y a la vez que estos puedan ser reajustados o sustituidos cuando sea necesario. Para ello se utiliza perfil C en combinación con alambres zigzag con el objetivo de mantener el anclaje de los plásticos a la estructura, esto es posible ya que el alambre zigzag genera una presión dentro del perfil C (Figura 3.11) [15].

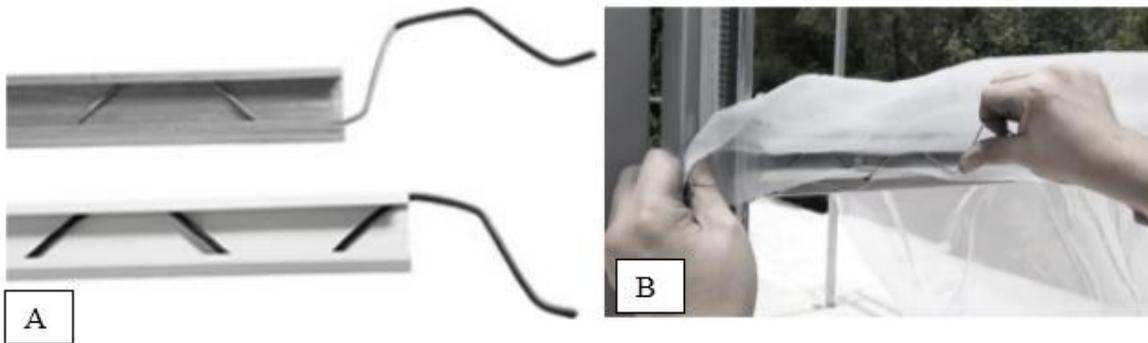


Figura 3.11. Perfil C y alambre zigzag (A), instalación de la malla y el plástico en la estructura del invernadero (B).

3.1.9 Plástico de recubrimiento

Se utilizara una película de polietileno con 30% sombra que es el porcentaje de sombra recomendando para el cultivo de jitomate. El calibre deber ser 720 (Figura 3.12).



Figura 3.12. Película pentacapa de polietileno lechosa con 30% de sombra.

3.1.10 Malla antiafidos

La malla antiafidos (Figura 3.13) presenta la siguientes ventajas [16]:

- Hace el efecto de cortaviento, pues evita que el aire penetre violentamente en el interior del invernadero, perjudicando a la instalación y a los cultivos.
- Se puede tener abiertas las ventanas, aunque el viento sea fuerte.
- Se evita la entrada de insectos en el invernadero.

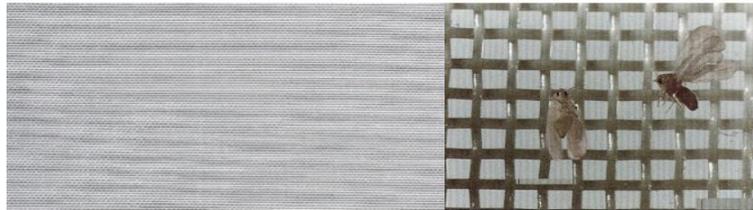


Figura 3.13. Malla antiafidos.

3.1.11 Ground cover

El ground cover (Figura 3.14) es una malla anti hierbas que ayuda a proteger el suelo del invernadero contra plagas que se encuentran en él, inhibe el crecimiento de las malezas y genera sanidad permitiendo ayudar al fotoperiodo por el reflejo de la luz (malla color blanco) o absorción de esta (malla color negro) [15].



Figura 3.14. Ground cover.

3.1.12 Instalación de los recubrimientos

En la figura 3.15 se muestra finalmente el resultado después de instalar los recubrimientos en la estructura del invernadero, como se ha descrito anteriormente en este capítulo, el siguiente objetivo a cumplir es instalar dentro del invernadero el sistema N.F.T. y colocar las plantas de jitomate.



Figura 3.15. Instalación de los recubrimientos en el invernadero.

3.2 Construcción del sistema N.F.T.

El material para el sistema de riego (tubería) es elegido según la justificación presentada en el libro un paso más en la hidroponía [2] y las recomendaciones sugeridas por Amar A.C. [8]. “En general en los cultivos N.F.T., tienen que ser invariablemente inertes y no tóxicos para las plantas. Por este motivo no son recomendables los metales, ya que estos contienen además del metal original, otros metales que pueden dañar a los vegetales, como por ejemplo los metales zincados o galvanizados. Por otra parte habrán de ser también resistentes a la degradación de los rayos solares” [2]. Por lo tanto para el cultivo de jitomate (en este caso cherry), lechugas o algún otro vegetal se utiliza tubo de PVC ya que es resistente, no es tóxico para las plantas, se desinfecta antes de cultivar en ellos y es de color blanco lo que es benéfico pues rechaza la radiación solar de tal manera que se evita el posible calentamiento de la solución.

3.2.1 Soportes y tubería

Por consiguiente para el cultivo de jitomate cherry se utiliza tubo de PVC de 4 pulgadas de diámetro y 2000 milímetros de largo como se muestra en la figura 3.16. Con respecto a los orificios en el tubo de 50 milímetros de diámetro están hechos para colocar en cada uno una planta de jitomate cherry, los 300 milímetros entre cada planta y las 4 pulgadas de diámetro del tubo son para un buen crecimiento de las raíces de las plantas ya que las raíces llegan a medir generalmente en la superficie un diámetro de 1.5 m y alcanza más de 0.5 m de profundidad; sin embargo, el 70% de las raíces se localizan a menos de 0.20 m de la superficie. Las dimensiones son sugeridas del libro un paso más en la hidroponía [2] y Amar A.C. [8].

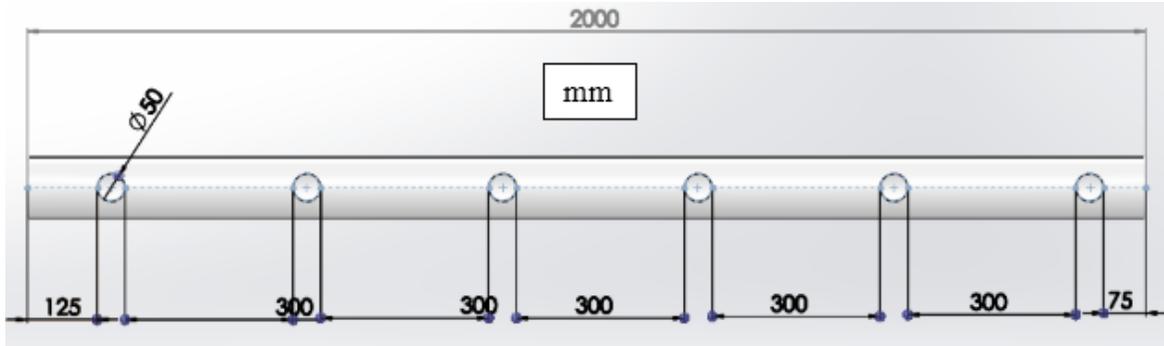


Figura 3.16. Dimensiones del tubo de PVC.

3.2.2 La aireación y evaporación en los tubos

El tubo de PVC proporciona la ventaja de que además de ser un canal para el flujo de la solución nutritiva está cubierto sobre la superficie, lo cual evita la evaporación. Sin embargo aunque una de las funciones de las raíces es la exudación en la que se producen desechos que se convierten en gases, si estos a su vez son retenidos en la zona radicular puede verse afectado el desarrollo de las plantas al no poderse renovar el oxígeno de manera adecuada [2].

“Está es la razón de que se les tenga que proveer de un canal amplio que en su fondo les permita el intercambio de gases, cuya condensación prolongada podría dar lugar al desarrollo de bacterias y hongos dentro de los canales. Para facilitar la dispersión de esos gases, se hará en la cubierta o en la parte superior del canal por lo menos 8 pequeños orificios en cada m^2 , con un diámetro aproximado de 0.5 cm.” [2].

3.2.3 Soportes

Estos no tienen contacto alguno con la solución nutritiva por lo tanto pueden ser de metal, madera o algún otro material, solo tienen que ser rígidos lo suficiente para soportar el tubo, el flujo de la solución nutritiva y las 6 plantas a lo largo de 2 metros. Las plantas de jitomates van sostenidas con una guía a tubos en la parte superior del invernadero a partir de que llegan a la etapa vegetativa, entonces realmente el peso de las plantas estará sobre la estructura del invernadero y no del todo en los soportes, por cual se utilizó madera por el corto tiempo que estaría el prototipo (3 a 4 meses aproximadamente) con un grosor de 25 milímetros.

La madera se cortó con la forma que se muestra en la figura 3.17 algunas más pequeñas que otras debido a los desniveles que se tienen a lo largo de la tubería para el flujo de la solución nutritiva. Se tienen 2 metros de largo por cada canal, entonces el desnivel es de un centímetro o bien 0.5 centímetros por cada metro, basados en las sugerencias de las siguientes referencias [2] y [8]. Los orificios pequeños en cada soporte están para pasar por ahí un tubo de PVC de una pulgada para el retorno de la solución nutritiva.

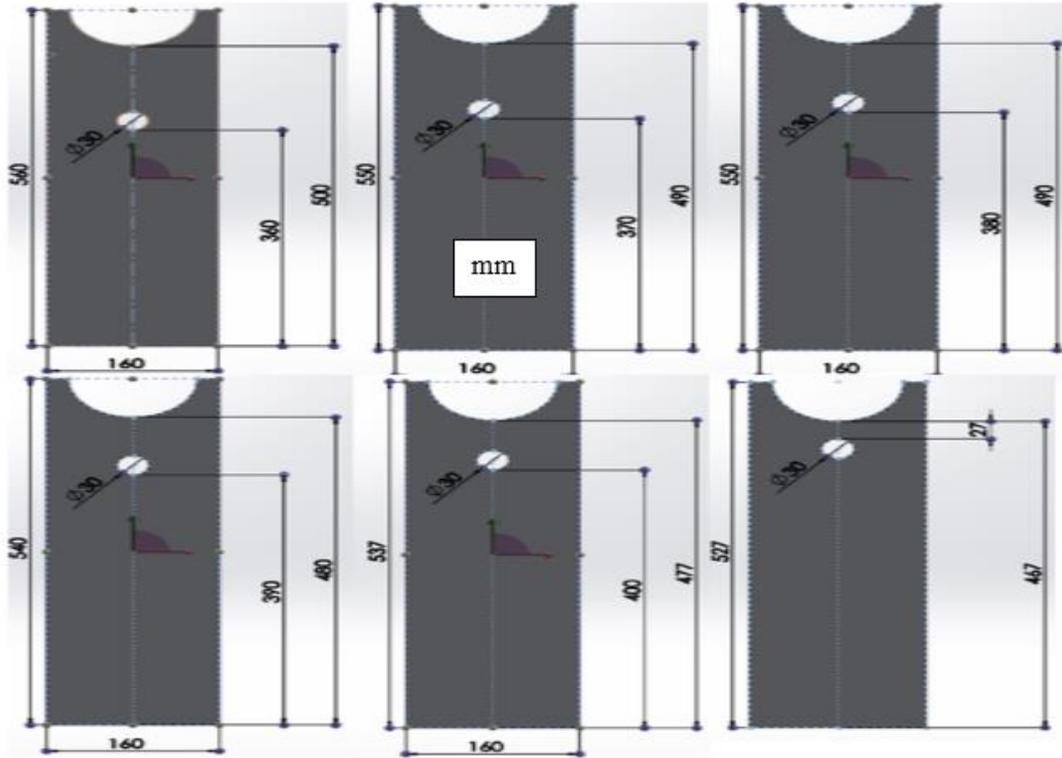


Figura 3.17. Diseño de soportes.

3.2.4 Estructura física del sistema N.F.T.

Finalmente se utilizó un sistema de tubería de material PVC como el expuesto en la figura 3.18 con los respectivos desniveles para hacer fluir la solución nutritiva y los jitomates tengan un buen desarrollo con las dimensiones y medidas antes mencionadas.

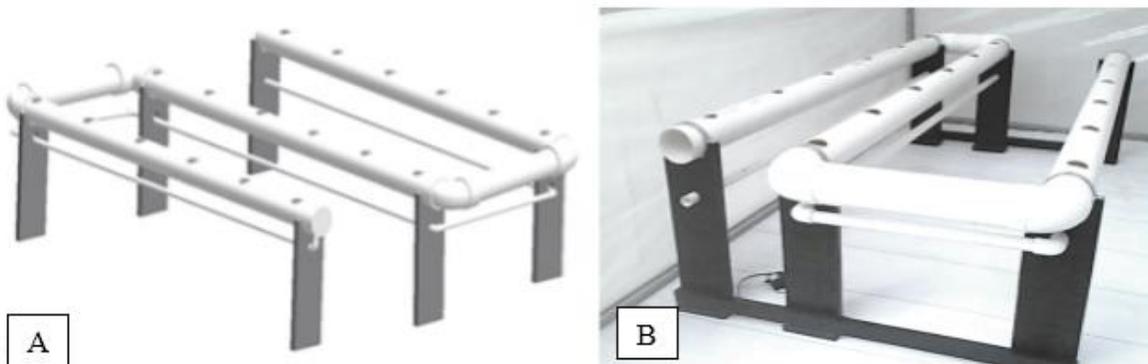


Figura 3.18.

Diseño de la tubería para el sistema de riego en SolidWorks® (A), estructura física del sistema N.F.T. (B).

3.2.5 Potencia de la bomba sumergible

Se utilizó una bomba sumergible que brinde un flujo de dos litros por minuto para suministrar los nutrientes a las plantas. La bomba estuvo dentro de un contenedor capaz de almacenar al menos 30 litros, aunque en realidad se sugirió un flujo de uno a dos litros por minuto [2], [8] y aunque se tomó como referencia dos litros por minuto se hace hincapié en que no se requiere tanta precisión en cuanto al flujo, por lo que, en los cálculos no se hizo el análisis a fondo de pérdidas en el sistema de tuberías. El cálculo de la potencia de la bomba se presenta a continuación (Figura 3.19).

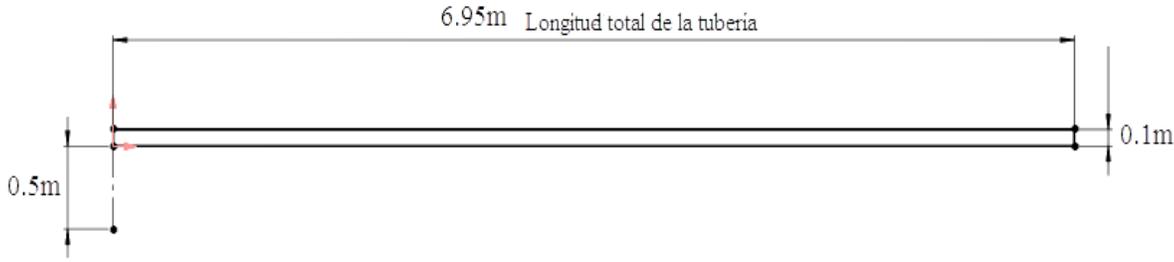


Figura 3.19. Parámetros a considerar para obtener potencia de la bomba sumergible.

Se puede obtener primero la velocidad dado que tenemos una longitud con un tiempo en el cual se quiere recorrer:

$$V = \frac{7.45m}{60s} = 0.12416 \frac{m}{s}$$

En base a la velocidad se obtiene el caudal:

$$Q = V \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) = 0.12416 \left(\frac{m}{s} \right) \left(\frac{\pi (0.1m)^2}{4} \right) = 0.00097515 \frac{m^3}{s}$$

Ahora bien la carga de trabajo se tomo con el valor 0.5

$$H = 0.5m, \quad g = 9.81 \frac{m}{s^2}, \rho_{agua} = 1000 \frac{kg}{m^3}, \eta = 0.48$$

Finalmente el valor de la eficiencia se toma en base a tabla 3.2 que se muestra a continuación, sabiendo que se necesita un flujo de 2 litros por minuto se selecciona la segunda fila ya que no se requiere más capacidad de la bomba.

Tabla 3.2. Valores de referencia para la eficiencia de bombas sumergibles [17]

Capacidad de la bomba l/s	Eficiencia %
Hasta 2,0	48
Mayor que 2,0 hasta 5,0	61
Mayor que 5,0 hasta 15,0	71
Mayor que 15,0 hasta 25,0	72
Mayor que 25,0 hasta 30,0	74

La potencia que se obtiene es la siguiente:

$$P = \frac{H * \rho * g * Q}{\eta} = 9.96W$$

3.3 Solución nutritiva

La solución nutritiva consiste en agua con oxígeno y los nutrimentos esenciales en formas iónicas [8]. Para el desarrollo del ciclo vital de las plantas, se necesitan una serie de elementos químicos denominados elementos nutritivos. Todos estos elementos son igualmente importantes, algunos son requeridos por la planta en grandes cantidades, se denominan macro elementos y otros más en pequeñas cantidades que se denominan micro elementos [18].

Todos los nutrimentos esenciales para la planta son tomados o asimilados en forma de iones. Estos pueden ser positivos (cationes) o negativos (aniones) [18]. Para que la solución nutritiva tenga disponibles los requerimientos que contiene, debe ser una solución verdadera, todos los iones se deben encontrar disueltos. La pérdida por precipitación de una o varias formas iónicas de los nutrimentos puede ocasionar su deficiencia en la planta, pues se genera un desbalance en la relación mutua entre los iones [8].

Según Arnon y Scout, citados por Sánchez y Escalante para que un nutrimento se considere como esencial en las plantas debe cumplir tres requisitos [8]:

- Las plantas deben ser incapaces de completar su ciclo de vida en ausencia del elemento mineral.
- Las funciones del elemento no podrán ser sustituidas por otro elemento.
- El elemento debe estar directamente involucrado en el metabolismo de las plantas.

En la siguiente figura 3.20 se muestran los minerales esenciales, así como su clasificación en macro y micro nutrientes [15]:

Nutrientes	Función	
Nitrógeno (N)	Forma parte de los aminoácidos, proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos y clorofila.	<p>Macronutrientes Nitrógeno (N) Fósforo (P) Potasio (K) Calcio (Ca) Magnesio (Mg) Azufre (S)</p> <p>Micronutrientes Hierro (Fe) Zinc (Zn) Manganeso (Mn) Boro (B) Cobre (Cu) Molibdeno (Mo) Cloro (Cl)</p>
Fosforo (P)	Constituye enzimas, ácidos nucleicos, fosfolípidos, glucosa y ATP.	
Potasio (k)	Activador de enzimas y síntesis de proteínas.	
Calcio (Ca)	Actúa como regulador del transporte de carbohidratos y forma parte de la estructura de la pared celular.	
Magnesio (Mg)	Parte esencial de la molécula de clorofila.	
Azufre (S)	Constituyente de amino ácidos y proteínas.	
Hierro (Fe)	encargado de la síntesis de clorofila y como portador de electrones en la fotosíntesis.	
Zinc (Zn)	Necesario para la formación de ácido indolacético.	
Manganeso (Mn)	Participa en la producción fotosintética de oxígeno a partir del agua y forma parte en la formación de clorofila.	
Cobre (Cu)	Se involucra en la formación de la pared celular y es parte de algunas enzimas.	
Boro (Bo)	este también se encarga en el transporte de carbohidratos y viabilidad del polen.	
Molibdeno (Mo)	Forma parte del nitrato-reductasa.	
Cloro (Cl)	Actúa como activador de enzimas para producción de oxígeno a partir del agua	

Figura 3.20. Nutrientes esenciales para el crecimiento de una planta.

3.3.1 Fórmula californiana

La solución nutritiva que se eligió utilizar en el sistema N.F.T. es la fórmula californiana, con la concentración de micronutrientes recomendada por Hoagland y Arnon para el cultivo de jitomate [8]. En el sistema se optó por suministrar en diez litros de agua los nutrientes necesarios para las 18 plantas de jitomate cherry. La cantidad de nutrientes que se están suministrando se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Fórmula californiana.

Concentración de nutrientes para 10 litros de agua	
Nutrientes	Gramos
Sulfato de magnesio	2.1
Nitrato de Potasio	5.28
Fosfato monoamónico	3.02
Nitrato de calcio	9.2
Micronutrientes	0.4

Cuando se disuelven los 20 gr de solución nutritiva en diez litros de agua, la CE como el pH quedan dentro del rango requerido de 2 mS a 3 mS y 5.5 a 6 de pH.

3.4 Desarrollo del sensor de pH

El pH permite valorar la concentración de iones de Hidrógeno contenidos en la solución nutritiva. Las soluciones con pH menor a 4 o mayor que 9, no se deben emplear para la producción en general de vegetales o frutos, debido a que la solución es muy ácida o muy alcalina lo que representa un daño a los vegetales [19]. En este caso para el cultivo de jitomate se requiere mantener un pH entre 5.5 a 6.

3.4.1 Potenciometría y sensores potenciométricos

Los sensores potenciométricos se fundamentan en el potencial eléctrico que es generado en la superficie de un sólido al estar en contacto en una disolución con iones que pueden reaccionar al intercambiarse con los de la superficie. La concentración de iones en la solución está relacionada a la magnitud de un potencial. El potencial en un electrodo indicador es afectado por los elementos en una solución, mientras que un electrodo de referencia mantiene un potencial constante [20].

Un elemento importante dentro de la potenciometría es el electrodo indicador a su vez dentro de estos existen otros más importantes que son los Electrodo Selectivos a Iones (ISE, *Ion Selective Electrode*) por su amplio campo de aplicación [20].

Al poner en contacto el ISE (sensor electroquímico basado en membranas que presentan respuesta selectiva a una familia de iones con propiedades similares) con la superficie de la membrana con una disolución que contenga al ión al que es sensible el ISE, “*se produce un intercambio de iones que provocan una separación de cargas a lo largo de la interface disolución-membrana; esto crea un potencial de interface comúnmente llamado potencial de membrana en el cual se establece un equilibrio entre el ión y el elemento de reconocimiento*” [20].

Por medio de estos sensores se pretende medir la cantidad de concentraciones contenidas en la solución nutritiva. Debido a que los sensores para pH y CE se encuentran a precios elevados se construyeron los sensores potenciométricos (Figura 3.21).

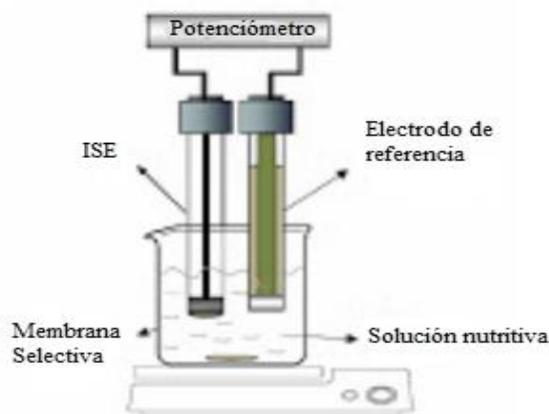


Figura 3.21. Celdas para realizar medidas de potencial utilizando el ISE.

3.4.2 Construcción del sensor de pH

La construcción del sensor de pH se realizó mediante los electrodos selectivos a iones “ISE”. Se utilizó para medir el pH dentro de la solución nutritiva. El ISE se utilizó junto con un electrodo de trabajo el cual da un potencial constante así como un cable de tierra.

1. La construcción de un electrodo de trabajo se presenta a continuación [20]:

Un conector eléctrico se introduce en un tubo de PVC (6mmx8mmx20mm). La conexión eléctrica está directamente en contacto con un transductor de pasta de epoxi-grafito. Después de pulir el transductor superior, una membrana selectiva se deposita sobre el transductor. La composición final de la membrana se muestra en la tabla 3.4. Antes de su uso, la ISE resultante debe ser sumergida en una solución 0,001 M de HCl a temperatura ambiente (25 ° C) durante 24 horas. En la figura 3.22 la construcción de electrodos se muestra esquemáticamente.

Tabla 3.4. Composición de la membrana.

Sensor	PVC ¹ (%)	Plastificante (%)	Elemento de reconocimiento (%)
H+	32.8	DOS ² (65.6)	TDDA ³ (1)

¹Polyvinil Chloride.

²Dioctyl Sebacate.

³Tetradodecylamine. The formulation includes tetrakis (4-chlorophenyl) borate as an ionic additive.

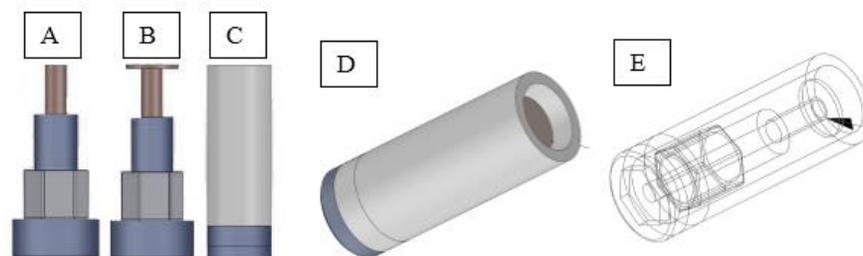


Figura 3.22. Conector eléctrico (A), Placa de cobre circular colocada en la superficie del conector (B), Colocación del tubo de PVC (C), Estructura del electrodo selectivo a iones (D) y (E).

2. Posteriormente se hace el depósito de la membrana como se muestra a continuación, los tubos de PVC junto con el conector y la capa de epoxy-grafito (Figura 3.23). El exceso de la capa de epoxy-grafito se lija hasta que quede un hueco de 3 mm donde ira la membrana.

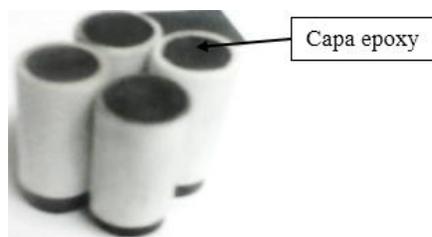


Figura 3.23. Tubos de PVC con capa de epoxy-grafito.

3. El procedimiento siguiente es la preparación de la membrana selectiva al Hidrogeno, una vez que se hace la preparación, es decir, la mezcla de todos los elementos necesarios para el deposito en el electrodo, la membrana se agita dentro de un recipiente para que el contenido se mezcle (Figura 3.24).

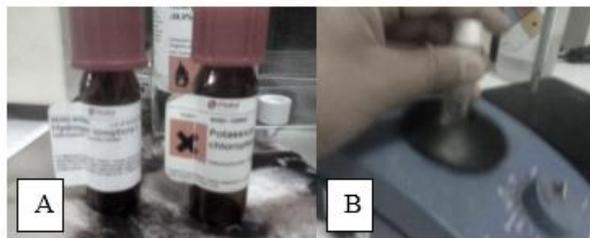


Figura 3.24. Algunos elementos químicos para la membrana como ionoforo de Hidrogeno (A), Mezclando componentes de membrana (B).

La colocación de la membrana se realiza dentro de una campana de extracción de gas ya que se utiliza solvente. La membrana se va colocando en distintos intervalos de tiempo hasta que se llena el hueco de 3 mm (Figura 3.25).



Figura 3.25. Colocación de membrana dentro de la campana de extracción de gases.

Una vez colocada la membrana esta se sumerge por 24 horas en una solución para que sea aún más sensible al hidrogeno.

4. Finalmente en la figura 3.26 se muestra el resultado final de la construcción del ISE para pH con sus conexiones listas para ser evaluados y caracterizados en un circuito de instrumentación que permita leer el voltaje del orden de mili volts, acondicionar la señal y brindarle una ganancia para incrementar el voltaje.



Figura 3.26. Electrodo selectivo a iones.

3.4.3 Instrumentación para el sensor potenciométrico

Una vez obtenidas las señales del sensor potenciométrico (mili volts), se utilizó un amplificador de instrumentación para el acondicionamiento de la señal, es decir, se amplificó la diferencia entre dos señales atenuando la señal de ruido existente en la señal. Existen algunos amplificadores de instrumentación en el mercado, un ejemplo es el INA116 el cual cuenta con un alto rechazo en modo común (84dB), lo cual permite obtener una señal con menor componentes de ruido cuando se realice alguna medición, su desventaja es su precio elevado. Por otro lado está también el INA128 con un precio mucho más bajo, la desventaja que presenta a diferencia del INA116 es su menor rechazo en modo común (120dB) y no cuenta con conexiones adyacentes de guarda que protegen de perturbaciones. En la figura 3.27 se muestra el diagrama del amplificador de instrumentación INA 128.

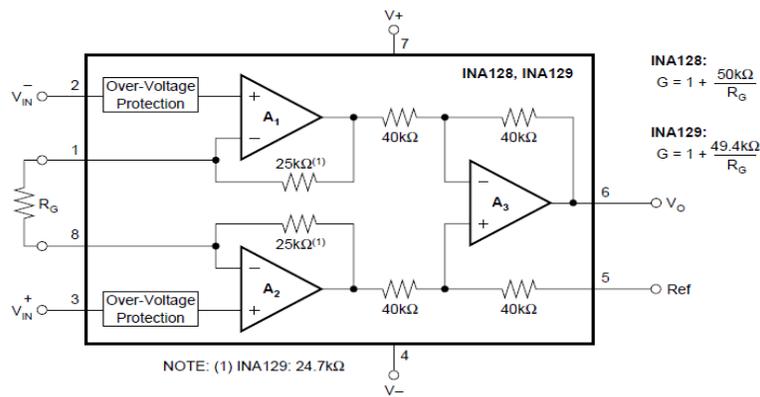


Figura 3.27. Amplificador de instrumentación INA128.

Posteriormente se adaptó al amplificador de instrumentación un filtro pasa bajas con el objetivo de atenuar frecuencias altas provenientes del ruido generado en el sistema, así de esta manera tener una señal lo más apta posible para su manipulación en el controlador. Se utilizó un filtro activo UAF42, que fue configurado como filtro pasa bajas; la desventaja del UAF42 es el alto costo, aun así se utilizó dado que se obtuvo de manera gratuita, pidiendo muestras gratis en la página oficial de Texas Instruments. En la figura 3.28 se muestra el diagrama interno del filtro activo universal.

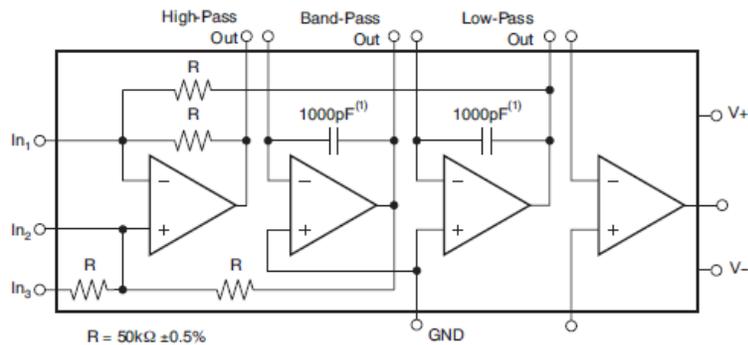


Figura 3.28. Filtro activo universal UAF42.

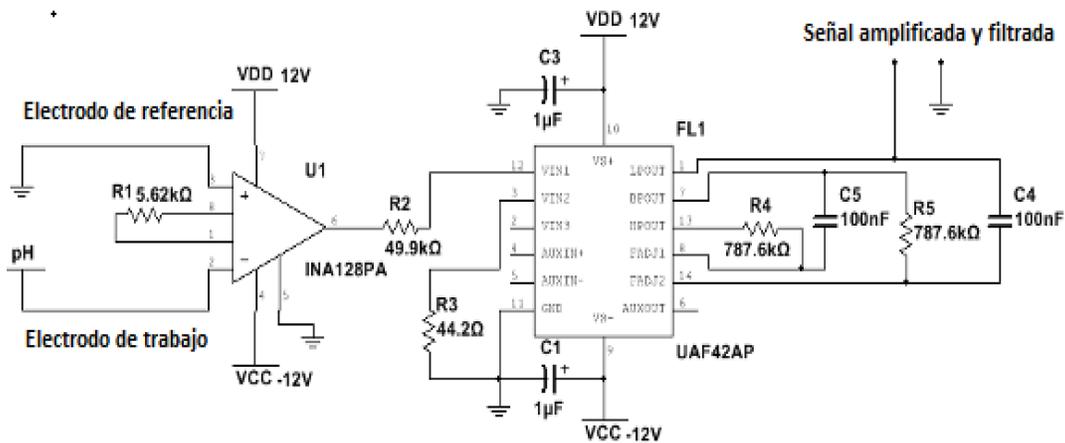
Cabe mencionar que la elección y la propuesta de solución con respecto a los sensores potenciométricos se realizó en base a una investigación realizada en el Cinvestav por el Dr. Juan Manuel Gutiérrez Salgado en su tesis “Sistema de monitoreo en tiempo real para la cuantificación de compuestos en soluciones acuosas basado en lenguas electrónicas hidráulicas e inteligencia artificial” [20].

3.4.4 Acondicionamiento de la señal del ISE

La señal captada del electrodo de trabajo (ISE) comparada con el electrodo de referencia que tiene potencial constante se tiene que amplificar con el INA128PA debido a que las mediciones se encuentran en el orden de mV. Para esto se utiliza el INA128PA ya que cuenta con terminales de guarda las cuales permiten inducir el mismo ruido a sus 2 entradas y cuenta con alto rechazo en modo común de 84 dB. Una vez amplificada la señal se tiene que filtrar la señal con un filtro UAF42AP con una configuración de filtro pasa-bajas para atenuar el ruido en la señal. (Figura 3.29).

Después se hace pasar la señal obtenida al amplificador INA128PA y la salida de éste pasa al filtro pasa bajas de segundo orden tipo Butterworth de frecuencia de corte de 10 Hz, en configuración inversora [20].

Figura 3.29. Circuito de acondicionamiento del sensor de pH.



3.5 Desarrollo del sensor de CE

La Conductividad Eléctrica en la disolución se mide mediante una sonda que consta de dos alambres conductores de oro, ya que este material permite una buena conducción y es resistente a la oxidación (Figura 3.30 B). Mediante uno de los alambres conductores de la sonda se hace circular una señal de corriente alterna generada por un puente de Wein de tal manera que se genera una impedancia entre ambos alambres conductores, esta misma impedancia se mide en una configuración de amplificador no inversor (Figura 3.30 A). Entonces podemos decir que dependiendo de la disolución se genera una distinta impedancia en la sonda [21].

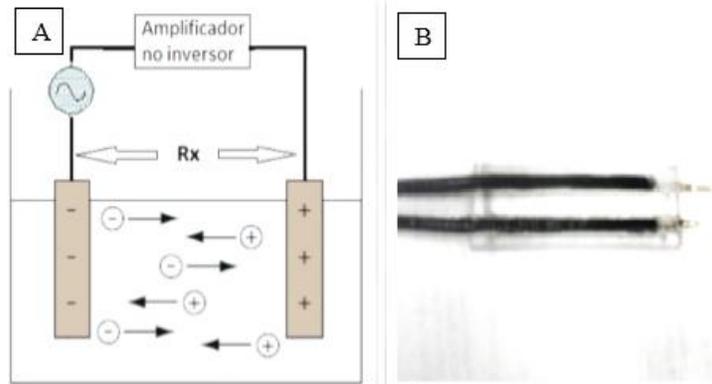


Figura 3.30. Medida de la CE (A), Sonda para medir la CE (B).

3.5.1 Circuito del sensor Conductividad Eléctrica

A continuación se muestra el circuito básico para medir la conductividad, en el esquemático se puede observar el puente de Wien y la configuración de amplificador no inversor (figura 3.31), donde en el pin 2 y 3 (del JP1) se conecta la sonda para medir la impedancia. A la salida de este circuito se obtiene una señal de corriente alterna, la cual varía en amplitud dependiendo de la CE de la disolución. Posteriormente para complementar el circuito se agrega un convertidor de corriente alterna a directa.

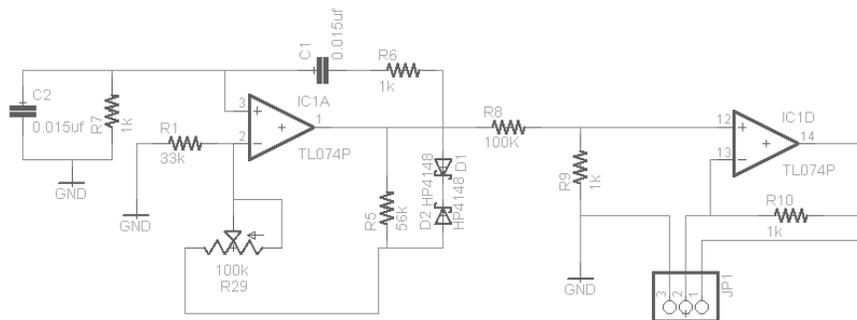


Figura 3.31. Oscilador puente de Wien y amplificador no inversor.

Se mencionó antes que es necesario una señal alterna por uno de los conductores de la sonda, para ello en el primer amplificador operacional LC1A se implementa un oscilador puente de Wien el cual no requiere de ninguna señal de entrada para producir una onda sinusoidal. La frecuencia de la señal sinusoidal que se enviara a la sonda es de 10 KHz; es posible obtener la frecuencia mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

Donde C1 y C2 son iguales a C mientras que R es igual a R6 y R7.

Esta señal generada por el puente de Wien es introducida al amplificador operacional LC1D, que está en configuración de amplificador no inversor. Mediante esta configuración es como se obtiene la impedancia que tiene la disolución. Como se mencionó antes en el pin 3 y 2 del JP1 se conecta la sonda y diremos que la sonda es Rx, entonces realmente tendremos un alambre conductor conectado a R10 y otro a GND (un circuito abierto), que al

introducir estos dos conductores a la disolución cerraremos el circuito, lo cual nos permitirá medir la impedancia en la disolución mediante las siguientes ecuaciones:

En una configuración de amplificador no inversor sabemos que la ganancia está dada por [22]:

$$A_0 = \frac{V_{salida}}{V_{entrada}}$$

Para saber el valor de la impedancia que está generando la disolución se tienen las siguientes ecuaciones:

$$A_0 = \left(1 + \frac{R10}{R_x}\right)$$

Despejando se tiene:

$$R_x = \frac{R10}{A_0 - 1}$$

Para calibrar el sensor se realizaron 5 soluciones de calibración con KCl (Cloruro de Potasio, figura 3.32) de 1, 2, 3, 4 y 5 mili Siemens.

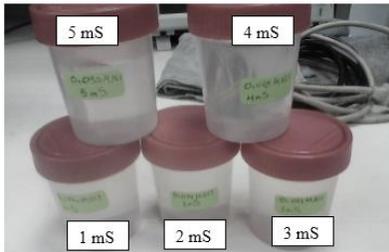


Figura 3.32. Soluciones de calibración.

Mediante la siguiente ecuación de conductividad se puede calcular el valor equivalente de impedancia que se debiera medir en el conductímetro (Tabla 3.5).

$$Siemens = \frac{1}{Impedancia}$$

Por lo tanto se obtiene la siguiente tabla de equivalencias:

Tabla 3.5. Equivalencia de conductividad e impedancia.

CE (mS)	R(Ω)
1	1000
2	500
3	333.33
4	250
5	200

3.6 Monitoreo de la temperatura dentro del invernadero

El jitomate es una planta termo periódica diaria, es decir, requiere una oscilación de temperatura entre el día y la noche de entre 8 y 12°C, que favorece su crecimiento y formación de mayor número de frutos. La temperatura adecuada oscila entre los 22 y 25°C, y varía en función de cada una de sus etapas fenológicas. Para germinación requiere 25°C, en crecimiento 20°C, en floración 24°C, en fructificación requiere 25°C y en maduración 22°C [23].

Con temperatura mínima de 12°C y temperatura máxima de 35°C la planta detiene su desarrollo, debajo de 12°C se hiela la planta. La temperatura adecuada del suelo es de 20°C. Los principales efectos fisiológicos y anatómicos de la temperatura en las etapas fenológicas son: en crecimiento, valores mayores a 35°C ocasionan que las hojas sean pequeñas y los tallos delgados, el crecimiento cesa y la fotosíntesis se detiene; en floración, a 13°C se acorta el número de entrenudos sobre los que se desarrolla el primer racimo floral, con valores menores a 15°C la floración se detiene, con temperaturas mayores a 30°C se reduce el crecimiento del tubo polínico, provocando esterilidad y una polinización insuficiente y aborto de flores; en fructificación, valores mayores a 29°C ocasionan que los frutos sean pequeños, menor número, más ácidos pero menor cantidad de ácido ascórbico, mala calidad, con temperaturas menores de 10°C en la noche y mayores de 22°C se produce escasa fructificación, con temperaturas mayores a 32°C se incrementa el número de flores abortadas, hay malformación de frutos a temperaturas mayores a 30°C, así como menores a los 13°C [23].

La regulación de la temperatura en el invernadero, se logra con el uso de calefactores y mallas térmicas, si las temperaturas son bajas. Con ventilación lateral y cenital, si las temperaturas son elevadas.

3.6.1 Sensor de temperatura

Se eligió el sensor DS18B20 (Figura 3.33) porque el rango de temperatura que se necesita monitorear y controlar esta dentro del rango que maneja el sensor. Aunado a eso cuenta con salida digital y si se necesita manejar varios sensores de temperatura todos se pueden conectar al mismo pin del microcontrolador ya que cada sensor tiene un código de identificación lo que permite que cuando pidas información de la temperatura solo el que tenga el código de identificación responderá al llamado.

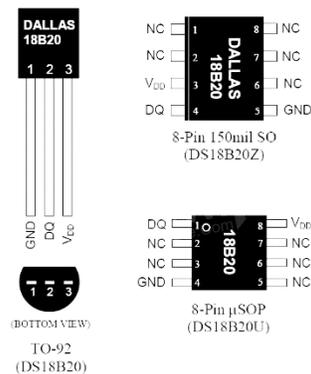


Figura 3.33. Sensor de temperatura DS18B20.

3.6.2 Calefacción

Se eligió un calefactor termo ventilador gris de capacidad para un área de 14 m². Tiene un termostato ajustable, fusible térmico de seguridad, protección contra calentamiento, funciona como ventilador en verano de 1500 W y cuenta con una cubierta fría al tacto. Para que el aire que se ha calentado por el calefactor sea distribuido uniformemente en toda el área dentro del invernadero se ocupó un ducto de hule termoplástico para ventilación (Figura 3.34).

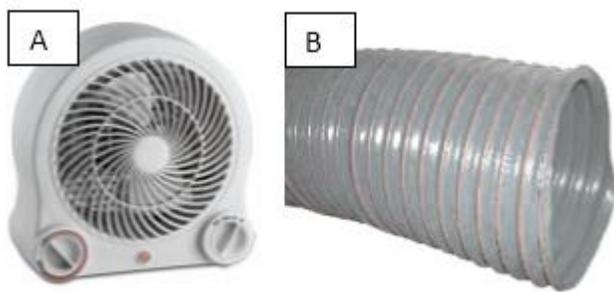


Figura 3.34. Calefactor eléctrico (A), ducto de hule termoplástico (B).

Este tipo de ducto es el más recomendado para uso general en el manejo de control de polvo, recomendado para el manejo de material liviano a granel con alto nivel de humedad y amplio manejo de químicos. Construido con una pared de hule termoplástico de peso mediano y una banda externa reforzada con un alambre de acero en forma helicoidal. Diseñado para manejar un amplio rango de temperatura y conservar su flexibilidad y una gran resistencia a la abrasión. Resistente al ozono y a los rayos ultra-violeta, resistente al desgaste por la acción atmosférica, al aceite y a los químicos. Combina una excelente flexibilidad y compresibilidad y resistencia al doblez. Fácil de limpiar, tubo interior suave para asegurar una mínima fricción y eficientes características de fluidez.

Características generales del ducto de hule termoplástico:

- Diámetros Disponibles: 2" hasta 24" de diámetro interno.
- Rango de Temperatura: -40°F hasta 275°F.
- Dimensiones: 25 ft., 50 ft.

3.6.3 Ventilación laterales y ventila cenital

Las ventilas cenitales y la ventila cenital son para regular la temperatura dentro del invernadero cuando hay temperaturas elevadas, con esta ventilación se evita el uso de extractores para renovar el aire dentro del invernadero (Figura 3.35).

Una buena ventilación lateral que permite la entrada de aire fresco y una ventilación cenital que permite la salida del aire caliente, es decir una excelente circulación de aire, permite enriquecer el ambiente del invernadero con bióxido de carbono. El movimiento ligero de la planta causado por la circulación del aire, favorece la polinización.

Si la ventilación en forma natural no es suficiente, se debe recurrir a la ventilación artificial con la ayuda de ventiladores y extractores de aire para provocar la circulación de éste. La ventilación deficiente provoca la incidencia de enfermedades como tizón tardío y botritis, difíciles de controlar con el uso de productos químicos.

Es importante recalcar que el aire fresco es más pesado que el aire caliente, por tanto, el invernadero debe tener suficiente ventilación lateral que permita la entrada de aire fresco, y una ventilación cenital proporcional, que permita la salida de aire caliente, evitando de esta manera el sobrecalentamiento del invernadero. Esta circulación de aire constante, permite un flujo que renueva y enriquece el ambiente del invernadero con bióxido de carbono, el cual es la materia prima junto con el agua, para la actividad fotosintética de la planta [23].

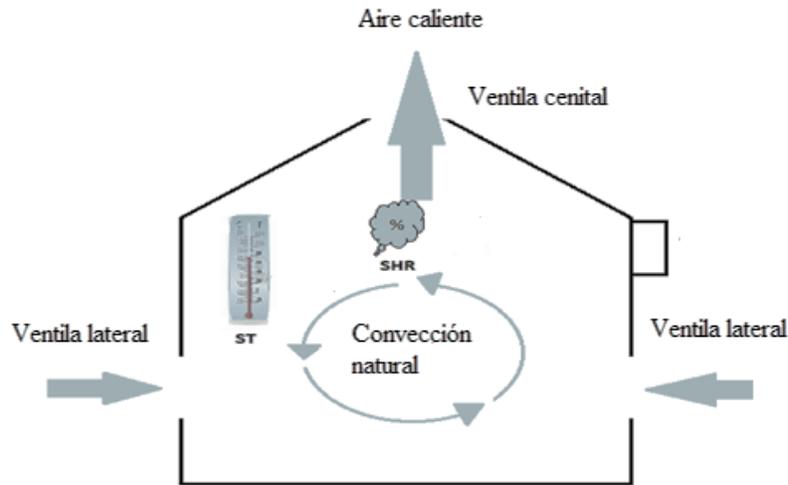


Figura 3.35. Convección natural dentro del invernadero.

3.6.4 Mecanismos de las ventilas laterales y cenital

Para levantar las ventilas laterales y ventila cenital se eligió un mecanismo poco convencional, ya que estos se utilizan para levantar los vidrios de las puertas de automóviles. En este tipo de mecanismos, el conjunto motor transmite el movimiento a un cable rígido dentado que se mueve en un sentido o en otro. Un extremo de este cable se une al soporte o pieza de arrastre que mueve el cristal, tirando o empujándolo para hacerle subir o bajar según sea el sentido de giro del motor (Figura 3.36).

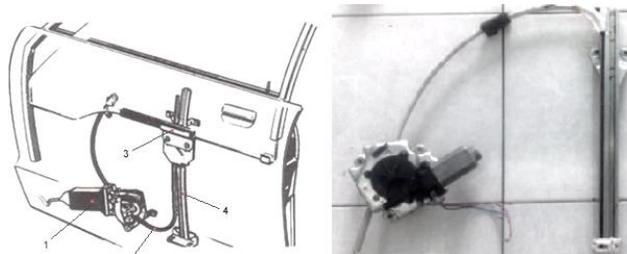


Figura 3.36. Mecanismos de vidrios automáticos en automóviles.

Este tipo de mecanismo es útil debido a que se necesita levantar un plástico de dos metros de largo a una altura aproximada de un metro. Algunas características de los motores que se manejan en este mecanismo son:

- Están dotados por dispositivos de protección contra sobrecargas.
- Se desconecta automáticamente si se produce una resistencia excesiva en el movimiento de los cristales.

Para los mecanismos se construyeron las bases en las cuales van montados los motores, dejando que las correderas realicen su función adecuada, y de esta manera garantizar la apertura o cierre de las ventanas laterales, de igual forma que el resto de la estructura, dichas bases fueron soldadas también (Figura 3.37, D).

En la siguiente figura 3.37 se muestra la instalación de los mecanismos de las ventilas del invernadero.

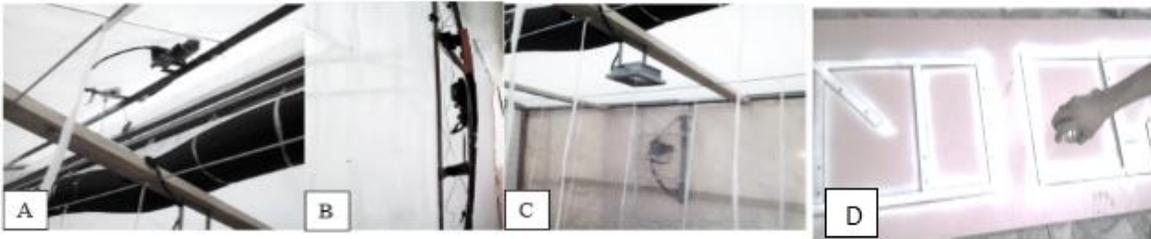


Figura 3.37. Ventila cenital (A), Ventila lateral vista exterior (B), Ventila lateral vista interior (C), Construcción de las bases del motor (D).

3.6.6 Etapa de potencia del calefactor

Se utilizó un triac tipo tornillo. El triac usado es el NTE283 que pueda soportar 25 A RMS con picos máximos de 250V RMS. El triac se eligió ya que aunque el calefactor necesita 12 A RMS, el triac estaría teniendo picos de aproximadamente 17 A, además en cada encendido el pico de corriente sería mayor de 17 A. De igual forma la tensión de 120V RMS proporcionaría picos de 170V. Debido a la potencia que tendría que disipar el triac, este se colocó en un disipador de aluminio (Figura 3.39). Las resistencias usadas fueron de 25W. Para separar el circuito DC del circuito AC se utilizó un optoaislador triac MOC3023 (Figura 3.38).

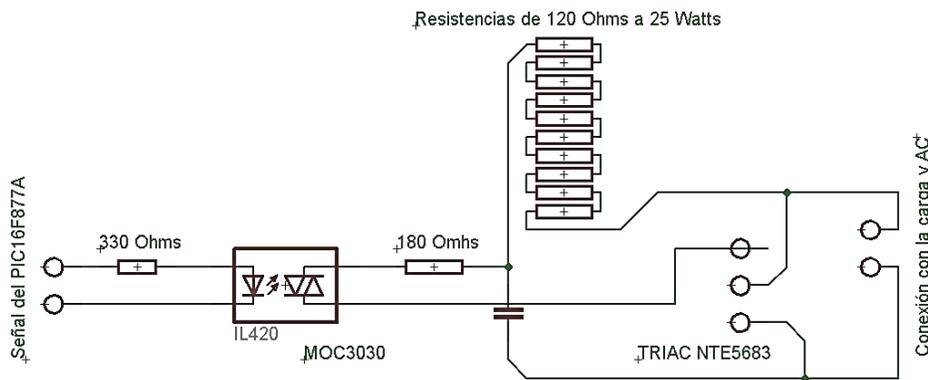


Figura 3.38. Esquemático de la etapa de potencia del calefactor.



Figura 3.39. Etapa de potencia del calefactor.

3.7 Monitoreo de la humedad relativa

Para el jitomate la humedad relativa óptima está en el rango de 50 a 70%. Mayor a ésta, la planta es susceptible a enfermedades como tizón tardío y botritis, así como al daño fisiológico del fruto conocido como pudrición apical del fruto. También puede provocar una mala fecundación por falta de polen, debido a la nula dehiscencia de las antenas o por apelmazamiento de los granos de polen. La baja humedad relativa provoca mayor pérdida de agua por transpiración, requiriéndose de riegos más frecuentes.

La baja humedad relativa ocasiona también deshidratación de los granos de polen, y por ende, una deficiente fecundación responsable de la deformación de los frutos y en casos extremos, de que el fruto no crezca. Si se tiene alta humedad relativa en el invernadero hay que ventilarlos, y si es baja, se tiene que hacer uso de la pared húmeda, donde se hace circular aire para que incremente la humedad dentro del mismo [23].

3.7.1 Sensor de humedad relativa

El sensor de humedad relativa elegido fue el HMZ-433A1 (Figura 3.40) ya que cubre el rango de humedad relativa que necesitamos medir, entrega una salida lineal de voltaje para la lectura de humedad que va de 0 a 3.3 volts.

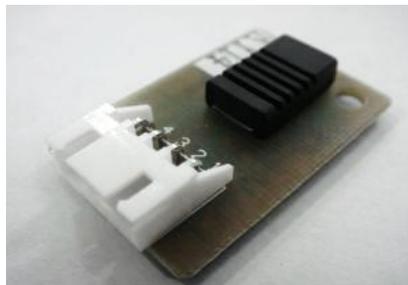


Figura 3.40. Sensor de humedad HMZ-433A1.

3.8 Monitoreo de la radiación

Los procesos biológicos que ocurren en la planta y que son dependientes de la luminosidad son: fotosíntesis, fotomorfogénesis y fotoperiodismo. La intensidad, duración y distribución espectral de la luz, afectan la respuesta de las plantas.

Las plantas absorben principalmente la luz roja, naranja y amarilla, poco la verde, pero si la reflejan, por eso se ven de dicho color. En jitomate el cambio de desarrollo vegetativo a reproductivo, está controlado por la luz roja y muy roja. La intensidad de la luz se expresa en Joules por centímetro cuadrado en un segundo ($J/cm^2/s$). El Joule es la unidad de cantidad de luz que es generada por un flujo de energía de un Watt durante un segundo (W/s), por tanto, se debe expresar esta intensidad de luz en Joule por segundo por metro cuadrado ($J/s/m^2$).

El jitomate en invernadero se siembra a altas densidades de población, por tanto, el recurso luz adquiere mayor relevancia, por lo que se debe contar con la máxima disponibilidad de ésta. Es decir, utilizar la cubierta de mayor transmisión de la luz posible y pintar la estructura del invernadero de color blanco, así como acolchados y contenedores tienen que ser de este color para reflejar la luz.

El cultivo de jitomate responde bien a las altas intensidades de luz, sobre todo desde la nacencia hasta el fin de crecimiento de los primeros frutos; a partir de aquí es menos exigente en la intensidad luminosa, es decir, en crecimiento, floración e inicio de fructificación es más exigente en luz que en maduración. A mayor intensidad lumínica mayor crecimiento, o sea la intensidad debe exceder ligeramente el punto de compensación entre fotosíntesis y respiración diariamente que permita la asimilación. Baja intensidad provoca poco crecimiento, plantas débiles susceptibles a enfermedades e insectos, y a cambios bruscos de ambiente, las flores abortan y hay malformación de frutos, disminución del crecimiento del tubo polínico, por tanto se reduce el porcentaje de germinación de polen, falta de dehiscencia de la antena, que causa esterilidad del androceo y falta de desarrollo de óvulo, reducido desarrollado embrionario, así como presencia de heterocilia, sobre todo en el primero y segundo racimo.

El fotoperiodo, que es la duración de la luz, tiene influencia en el ciclo vegetativo, ya que con días cortos (menores de 12 horas) el ciclo vegetativo se alarga, o sea que el inicio de fructificación es más tarde; con días largos (mayores de 12 horas) el ciclo vegetativo se acorta, además el suplemento de la luz reporta incrementos en el peso del fruto y por tanto el rendimiento. Las plantas de jitomate fructifican más temprano en días largos con alta intensidad lumínica, mientras que los días nublados y cortos alargan su ciclo y afectan el rendimiento y calidad de la cosecha, disminuyendo la rentabilidad [23].

3.8.1 Sensor de radiación

El cultivo de jitomate requiere 12 horas de luz recomendable. Las 12 horas las tomamos de 8 a.m. a 20 p.m. Durante este tiempo con el sensor de radiación se evalúa si la radiación es la adecuada así como la intensidad de luz. Cuando la intensidad de luz es baja se encienden 2 lámparas LED que proporciona luz azul y roja, para así completar las horas de luz necesaria.

El sensor de radiación elegido fue el OPT101 (figura 3.41, A), una de sus características es que la tensión de salida aumenta conforme la intensidad de la luz aumenta. Además elimina errores por captación de ruido y fugas de corriente. Su corriente de oscuridad es baja de 2.5 pA con tensión del diodo de 7.5 mV.

En la figura 3.41 B, se presenta la conexión del sensor. Vout se conecta al microcontrolador PIC16F887.

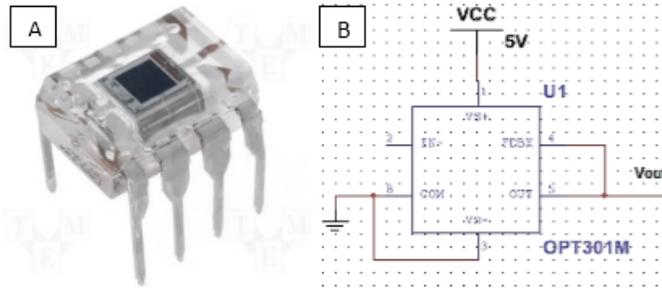


Figura 3.41. Sensor de radiación (A), Esquemático de conexión (B).

3.8.2 Reflector de LED RGB

Por supuesto, la mejor luz es la natural, que tiene todas las longitudes y colores de las ondas de luz, a diferencia de la luz de los led que es monocromática (de un solo color, como por ejemplo rojo o azul). Aunque las lámparas de sodio de alta presión han sido el estándar durante mucho tiempo, investigaciones recientes están demostrando las ventajas de los led. Un aspecto importante es que las lámparas de sodio no emiten luz en el rango del azul, que es importante para ciertos procesos en las plantas Sin los rayos azules, las plantas tienden a crecer de modo distinto.

Las lámparas LED consumen muy poca electricidad, lo cual es un aspecto importante para su uso. Otra ventaja de los LED es que no emiten mucho calor, por lo que se les puede colocar más cerca de los vegetales (Figura 3.42). Sus características se presentan en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Características de los reflectores de LED RGB.

Poder	10w
Lumen	1000lm
Factor de poder	>0,95
Marca del microprocesador	Los E.E.U.U. Bridgelux
Conductor inter	Conductor de la eficacia alta
Material del cuerpo	Aleación de aluminio
Voltaje de funcionamiento	AC85-265V
Grado del IP	IP65
Índice de representación de color	Ra>80
distancia de la radiación	los 30~50m
Temperatura de funcionamiento	-20-60°C
CCT	2500-6500K
Certificado	CE, RoHS
Dimensión del paquete	130*130*130 mm
Peso neto	0.65Kg



Figura 3.42. Reflector LED RGB.

3.8.3 Diseño del alumbrado dentro del invernadero

Se desea iluminar un prototipo de un invernadero con paredes y techo de color blanco, que tiene 2 m de ancho, 3 m de largo y 2 m de altura del techo respecto al piso. ¿Cuántas lámparas se necesitan a 0.65 m sobre el suelo con un nivel de iluminación de 1200 lux por m²?

Dimensiones de invernadero (Figura 3.43):

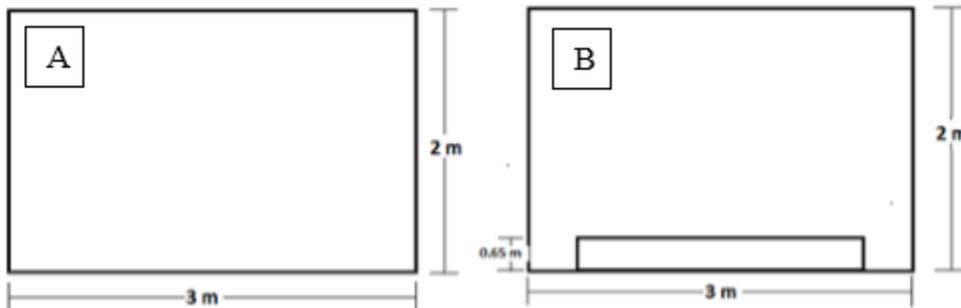


Figura 3.43. Dimensiones del invernadero, vista superior (A) y vista lateral (B).

1. Las dimensiones del invernadero son: 2x3x2 m.
2. Nivel de iluminación: se necesitan 1200 lux por m², entonces $E=1200/6 \text{ m}^2=200 \text{ Lux}$.
3. Superficie del local: $S= (a)(b) = 6 \text{ m}^2$
4. Suponiendo que se usan lámparas con reflectores de haz directo (RGB).

Suponiendo que la luminaria se fija a 0.12 m con respecto al techo y que el plano de trabajo está a 0.65 m respecto al piso, la altura a considerar es $h=1.23 \text{ m}$.

Debido a que se ha seleccionado iluminación directa se tiene:

$$k = \frac{(a)(b)}{h(a + b)} = \frac{(2)(3)}{1.23(2 + 3)} = 0.975$$

5. El coeficiente de reflexión del techo y paredes. Para el color blanco es de 75%.
6. Tipo de lámparas: Reflector 10w de HS-FL1W10 10W LED.
7. Luminaria: Reflector de haz medio.

8. Factor de utilización. Se determina entrando a la tabla con el tipo de luminaria, tomando el valor del índice de local dentro del rango correspondiente (0.90-1.10) y encontrando el valor en la columna correspondiente al coeficiente de reflexión (30%), encontrando $\mu=0.43$.
9. Tipo de mantenimiento previsto. Se considera buena y se selecciona un coeficiente de mantenimiento $M=0.75$.
10. Flujo total. Se calcula de acuerdo con la expresión:

$$\phi_T = \frac{(E)(S)}{(\mu)(M)} = \frac{(200)(6)}{(0.43)(0.75)} = 3720.93 \text{ Lumen}$$

11. Potencia de consumo de 10 W, con un flujo de 1000 Lumen. El número de lámparas requerido es (Figura 3.44):

$$N = \frac{\phi_T}{\phi_L} = \frac{3720.93}{1000} = 3.7 \approx 4 \text{ lámparas}$$

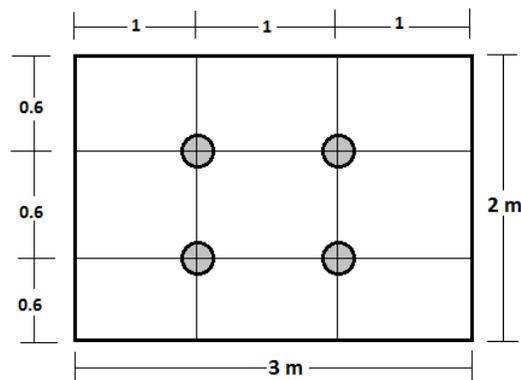


Figura 3.44. Distribución del número de lámparas obtenido.

12. La potencia absorbida por la instalación es: $P=4(10 \text{ W})=40 \text{ Watts}$.

3.8.4. Etapa de potencia de los reflectores de LED RGB

En la etapa de potencia se aísla la parte digital de la de potencia mediante un MOC3023 y para activar las lámparas se usa un BTA26A4. En la figura 3.45 se muestra el esquemático de la etapa de potencia y en la 3.46 se muestra el circuito físico.

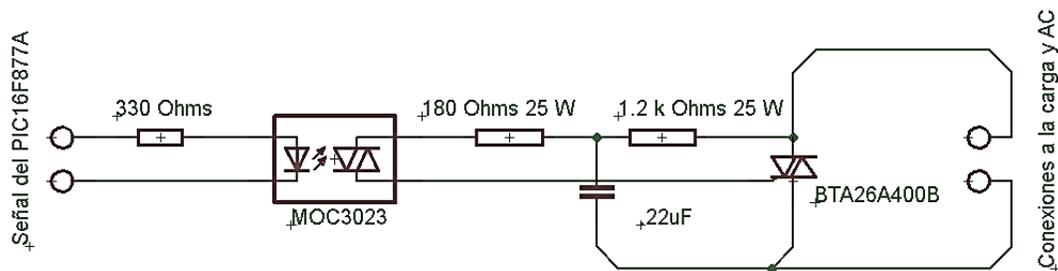


Figura 3.45. Esquemático de la etapa de potencia.

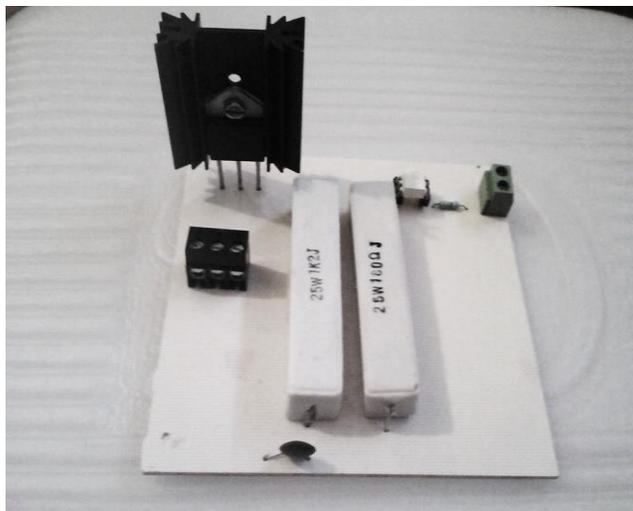


Figura 3.46. Etapa de potencia para los reflectores RGB.

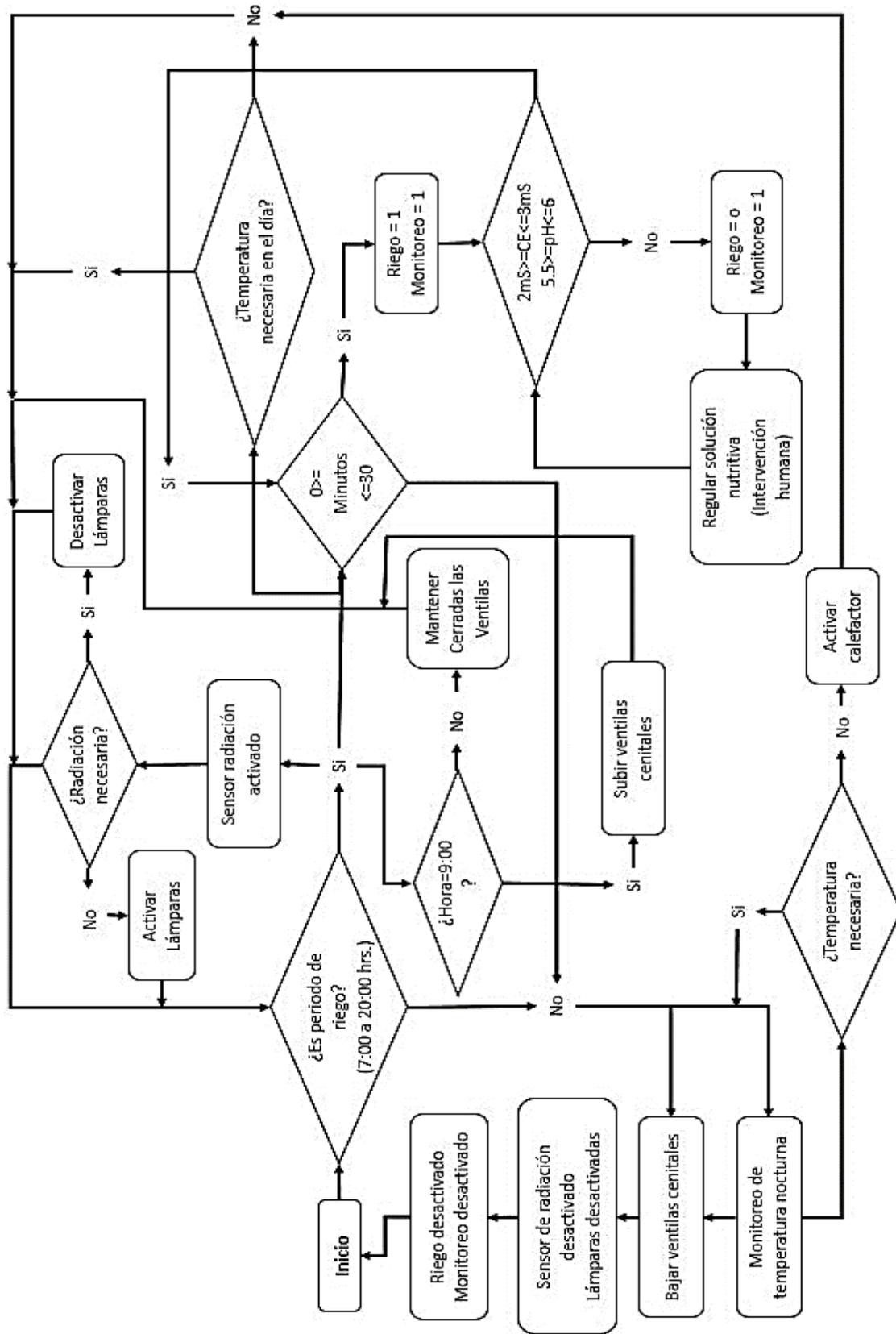
3.9 Lógica del sistema de control

En el diagrama que se muestra a continuación se expresa la idea general de la programación en el sistema de control del prototipo dentro del invernadero. En la programación leemos el reloj en tiempo real (DS1307) para obtener la hora del día, al obtener este dato, se divide en dos variables principalmente; la variable hora y la variable minutos. La hora varía entre un rango de 0 a 23 valores enteros y la variable minutos toma valores entre 0 y 59. Es así como sabemos si estamos en el día o la noche para controlar los distintos sensores y actuadores dependiendo del valor que tomen estas dos variables principales.

Las ventajas que se obtienen al utilizar el circuito integrado DS1307 son:

- Cuenta segundos, minutos, horas, días, meses, años y es válido hasta 2100.
- Se le puede agregar una batería de respaldo, en caso de fallo de energía.
- Consume menos de 500nA con la batería de respaldo en funcionamiento.
- Soporta temperaturas industriales: -40°C a 85°C.

El funcionamiento del sistema de control se basa principalmente en la medición del tiempo obtenida del DS1307 mediante el protocolo I2C con el microcontrolador. Tenemos la ventaja de establecer la hora y establecer los periodos de riego como sea conveniente. Y finalmente una vez que el horario está establecido el sistema de control dentro del invernadero comienza con los monitoreos necesarios para la toma de decisiones y brindar las condiciones necesarias para el cultivo N.F.T.



Validación del sistema

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del invernadero, los sensores desarrollados y en general el desarrollo del sistema de control para el sistema N.F.T. dentro del invernadero.

En el invernadero y sistema N.F.T. se evalúa el crecimiento del jitomate, a su vez se muestra el desarrollo de la planta de jitomate cherry durante un periodo de días con ayuda del monitoreo del sistema de control dentro del invernadero y solución nutritiva con los sensores antes mencionados.

4.1 Resultado final del invernadero y sistema N.F.T.

Se muestra en la figura 4.1 A los resultados después del procedimiento explicado en el capítulo anterior donde se describe el proceso para construir el invernadero y sistema N.F.T. En los resultados se puede observar el conjunto los sistemas construidos así como la implementación de las plantas en los tubos de PVC. En la figura 4.1 A se observa la implementación del sistema N.F.T. dentro del invernadero mientras que en la figura 4.1 B se muestra una imagen de pruebas realizadas para evaluar el flujo de la solución nutritiva, en esta prueba se comprobó que el cálculo de la potencia de la bomba sumergible fue acertado y para comprobarlo la cubeta se llenó con veinte litros de agua, mismos que se hicieron circular a lo largo de los siete metros de la tubería. Lo que dio como resultado un flujo de dos litros por un minuto con treinta segundos aproximadamente.



Figura 4.1. Sistema N.F.T. dentro del invernadero (A), Pruebas del flujo del agua (B), Vista exterior del invernadero (C).

Para sostener las plantas de jitomate cherry en los tubos de PVC se utilizó sustrato (agrolita) y la manera en que se realizó fue de la siguiente forma (Figura 4.2); primero se extrae la planta de jitomate de los semilleros (Figura 4.2 A), luego se inserta en un vaso cortado por la mitad con un orificio en la parte inferior del vaso, lo suficientemente grande como para que pasen las raíces de la planta por el orificio, a la vez se abrazan las raíces con un trozo de trapo multiusos para que mediante este absorban los nutrientes ya que en esa etapa las plantas tienden a tener raíces aun pequeñas (Figura 4.2 B) y finalmente se colocan en los tubos de PVC (Figura 4.2 C).

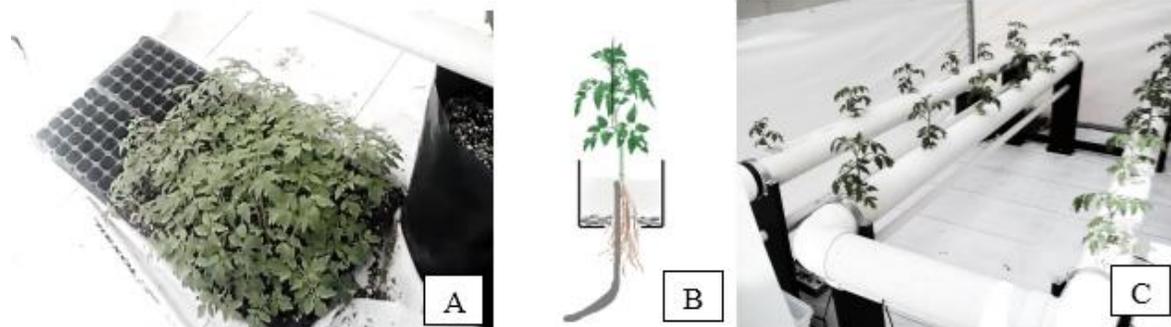


Figura 4.2. Semilleros con las plantas de jitomate (A), Implementación de la planta en un vaso de plástico (B), Implementación de la planta en el sistema N.F.T (C).

4.2 Preparación de la solución nutritiva

Para la solución nutritiva se consiguieron todos los elementos de la tabla 3.3 por separado en grado agrícola (de macronutrientes), en cuanto a los micronutrientes se consiguió la concentración ya preparada. La concentración de nutrientes mostrada en la tabla 3.3 se realizó para una cantidad de diez litros de agua, sin embargo ya en la implementación se utilizaron 20 litros de agua, entonces, se cambió la concentración de la fórmula california de 20 g a 40 g. En la figura 4.3 se muestra el momento en que se pesaron las concentraciones de nutrientes, cabe destacar que en la figura 4.3 B la báscula muestra 49.215 g debido a que son los 40 g de concentración más el peso del recipiente.

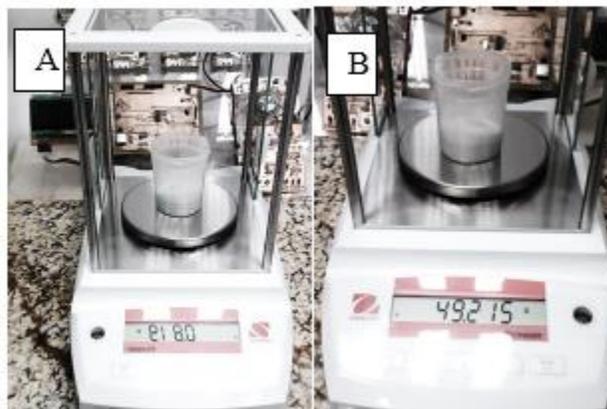


Figura 4.3. Preparación de la fórmula california.

4.3 Resultados del sensor de pH

En la figura 4.4 A se muestra el circuito físico donde se acondiciona la señal proveniente de los electrodos ISE y de referencia, una vez que estos están sumergidos en la solución base (Figura 4.4 B). Para caracterizar el sensor se llevaron a cabo distintas mediciones en variadas soluciones base con diferentes valores de pH.

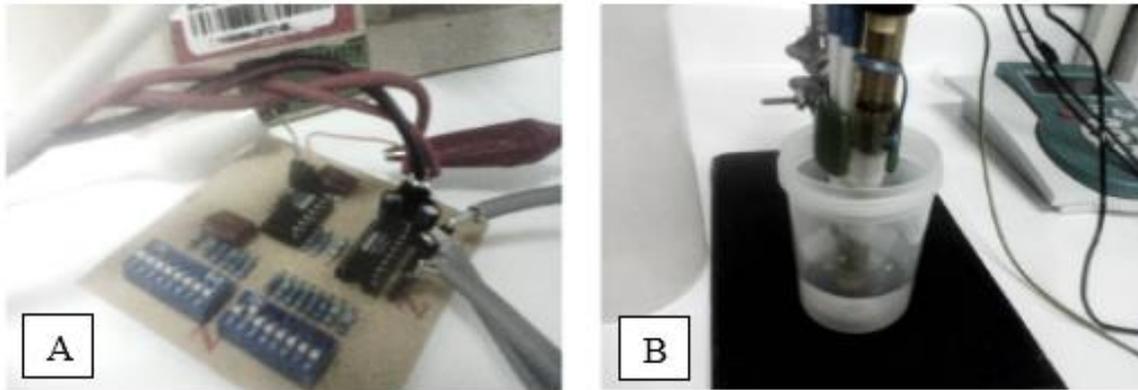


Figura 4.4. Circuito físico del sensor de pH (A), Electrodo de referencia e ISE tomando muestras de cada solución base (B).

Durante la calibración del sensor (Figura 4.4) se obtuvo la siguiente recta (Figura 4.5) para poder diferenciar entre cada pH. Como se puede ver en la curva de calibración hay una diferencia de voltaje como para diferenciar entre un pH y otro.

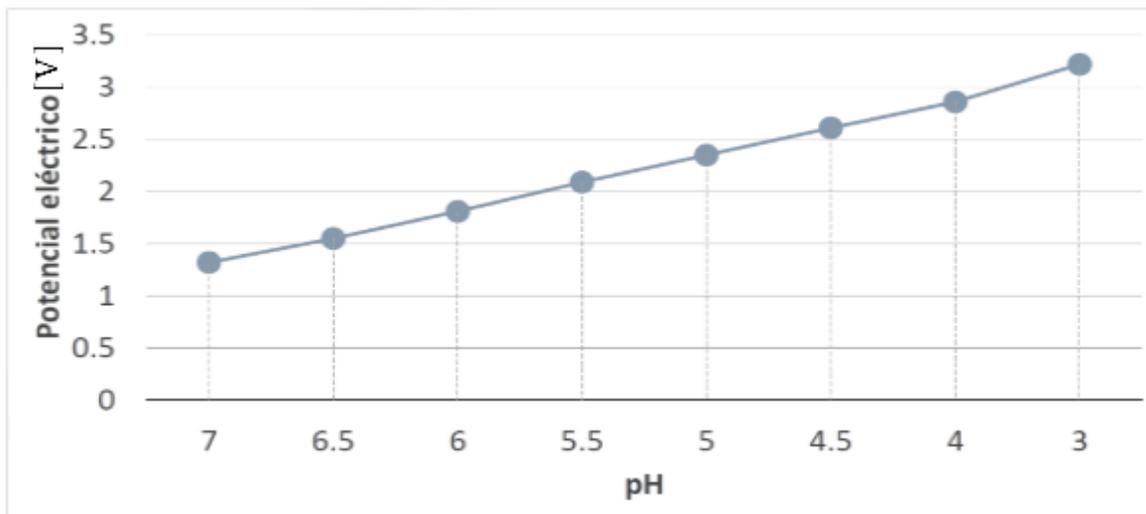


Figura 4.5. Curva de calibración del sensor de pH.

4.4 Resultados del sensor de CE

Una vez que se cuenta con el circuito y la sonda mostrados en la figura 4.6 del conductímetro. Se comienzan a realizar pruebas, así se obtienen las mediciones de la tabla 4.1, mismos que se comparan con los valores de la tabla 3.5, y por cada impedancia obtenida se obtiene un valor de voltaje (CD) a la salida del convertidor CA a CD como se muestra en la gráfica (Figura 4.9).

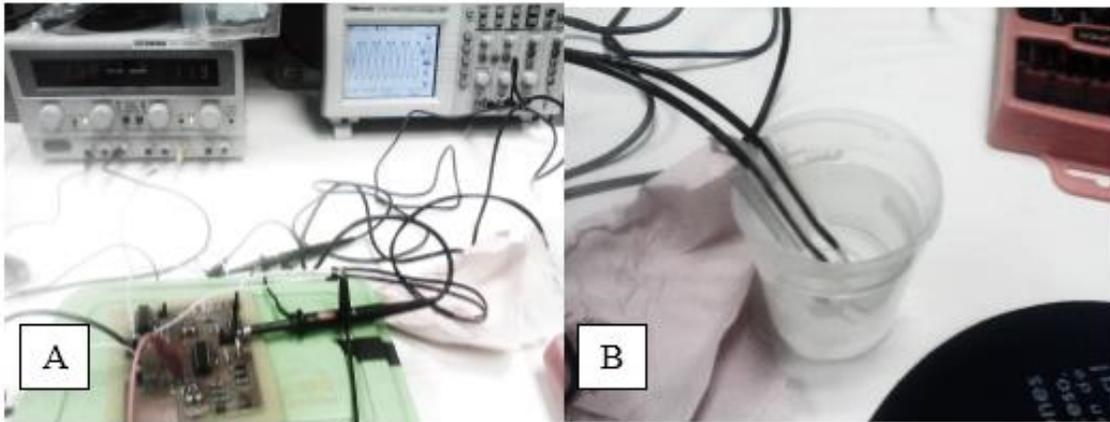


Figura 4.6. Circuito del sensor de CE (A), Sonda de CE (B).

Se puede observar en la tabla 4.1, los valores obtenidos en la calibración del sensor de CE son muy similares a los de la tabla 3.5, lo que da la pauta para decir que el sensor de CE funciona correctamente.

Tabla 4.1. Valores de impedancias medidos.

CE (mS)	R1(Ω)	R2(Ω)
1	1005	975
2	550	481.4
3	331.91	333
4	256.57	254.9
5	207.4	205

A continuación en la figura 4.7 se muestran los resultados de las mediciones de conductividad con las soluciones de calibración y una medición con la solución nutritiva que se está utilizando.

Aunque los resultados están en voltaje, si estos valores se comparan con los de la figura 4.9 se verá que están muy próximos a los valores ideales, o bien si se evalúan los resultados en la ecuación se observa que son los valores de conductividad esperados.

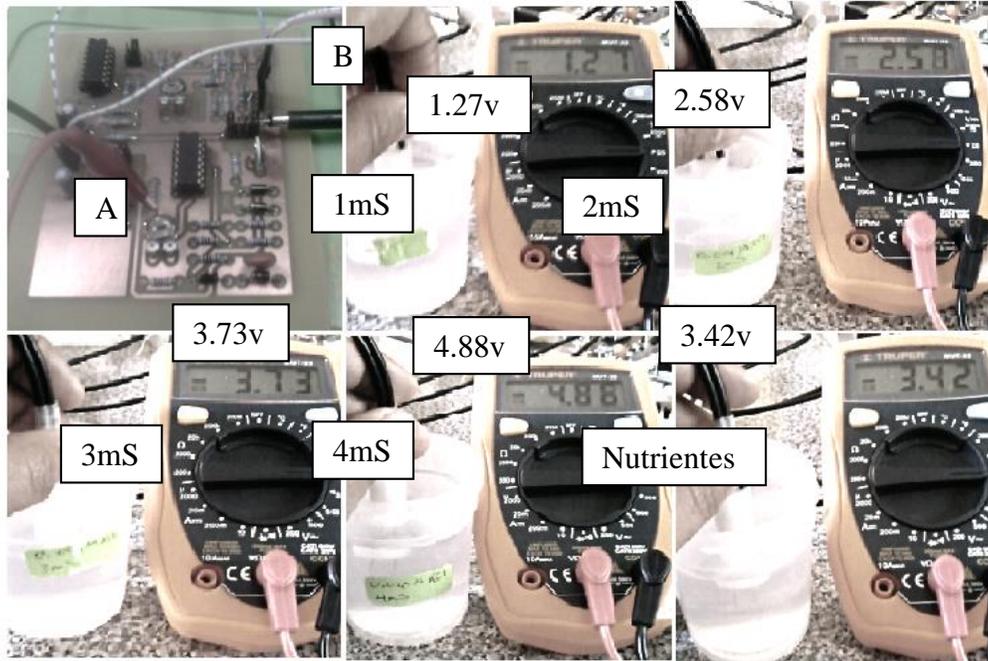


Figura 4.7. Conductímetro (A), Soluciones de calibración (B).

Para la comprobación de las soluciones de calibración se realizaron pruebas con un conductímetro Handheld LCR Meters (Models 878B/879B). Los resultados arrojados son en ohm como se muestra en la figura 4.8.

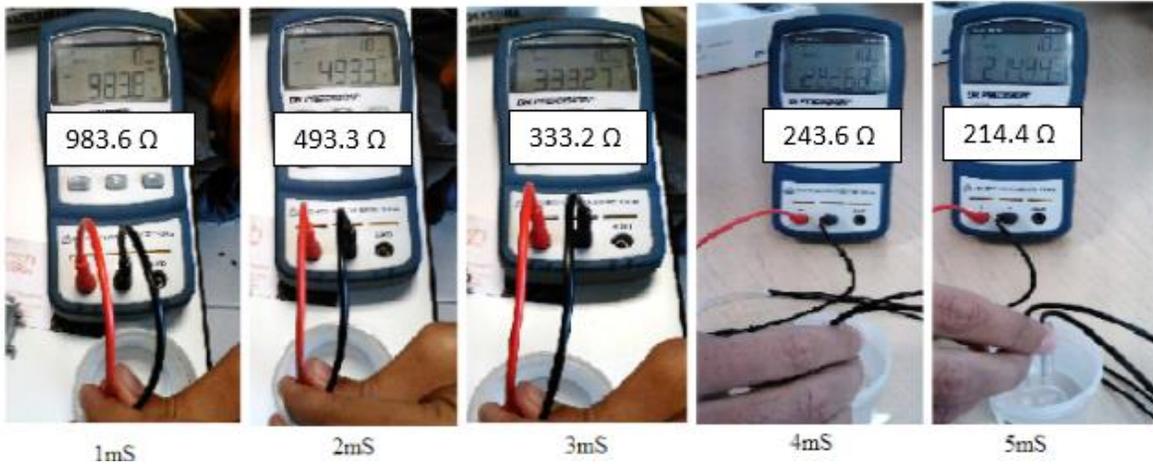


Figura 4.8. Evaluación de la conductividad en las soluciones de calibración con un conductímetro Handheld LCR Meters.

Después de realizar las pruebas con el sensor de CE para verificar que se estuviera midiendo realmente la conductividad esperada, el siguiente paso fue realizar una gráfica que describe el comportamiento del sensor y así poder hacer una aproximación de la curva obtenida para ser representada como una ecuación y utilizarla en el sistema de control. De tal manera que al obtener un voltaje del sensor, el controlador asigne un valor de CE para cada valor de voltaje adquirido.

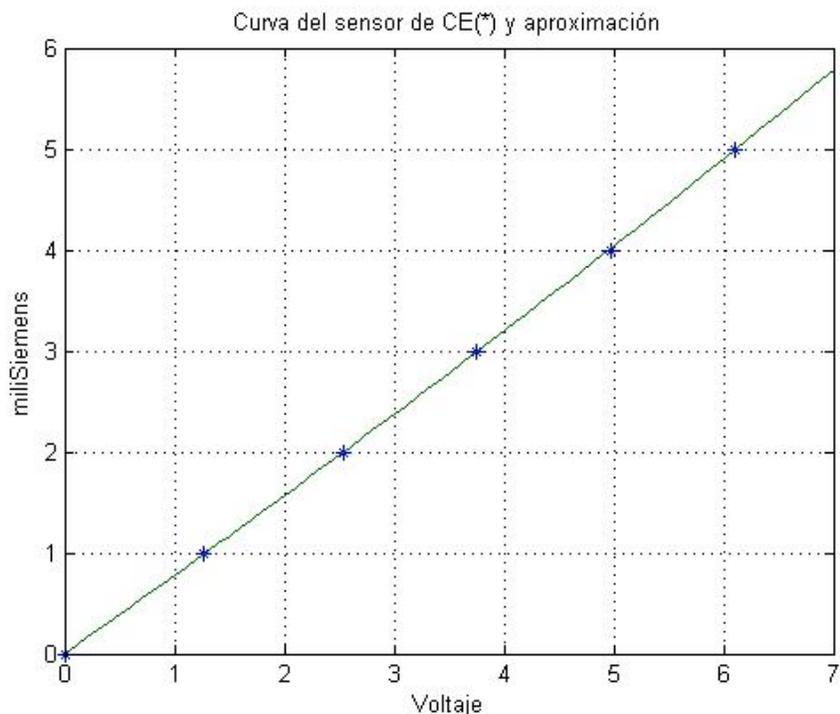


Figura 4.9. Grafica de la respuesta del sensor de CE.

La ecuación con la cual se aproximó la respuesta del sensor de CE queda dada de la siguiente manera:

$$CE = 0.0064 + (0.7630)(Voltaje) + (0.0087)(Voltaje^2)$$

4.5 Evaluación del filtro pasa bajas

La función del filtro es separar y dejar pasar las señales en ciertas bandas de frecuencia así como bloquear las señales de otras bandas que no sean deseables. En este caso el filtro universal UAF42 basa su configuración en un amplificador no inversor y dos integradores. Para poder obtener una configuración exacta y con los valores precisos se utilizó un software compatible con DOS (sistemas operativos de disco), este software brinda los valores deseados que se quiere obtener dependiendo de la configuración, el software nos brinda valores exactos de resistencias y capacitores externos para poder generar los filtros con valores precisos [24].

El software utilizado, proviene de una serie de programas de diseño llamado FilterPro creados por Burr-Brown. Utilizando el llamado FILTER42, que es específicamente usado para configuraciones del UAF42. El programa es sencillo, es una guía paso a paso y realiza el cálculo exacto de los valores de los componentes. Para un filtro Butterworth, se tiene una atenuación de 3dB en la frecuencia de corte. El circuito más simple consiste en un solo subcircuito de dos polos (una entrada de voltaje y una salida de voltaje con la señal filtrada) [24].

En ambos casos, en el sensor de CE y el de pH se utilizó un filtro pasa bajas mediante el circuito integrado UAF42 para mantener una señal a la salida de los sensores un poco más limpia de ruido. Los efectos de ruido ocasionados por el ambiente (radio frecuencia, sistema inalámbrico, luces fluorescentes, etc.) [25] provocaban que las señales de salida presentaran una mayor amplitud de la esperada dado que las señales de los sensores son del orden de mili volts (Figura 4.10).

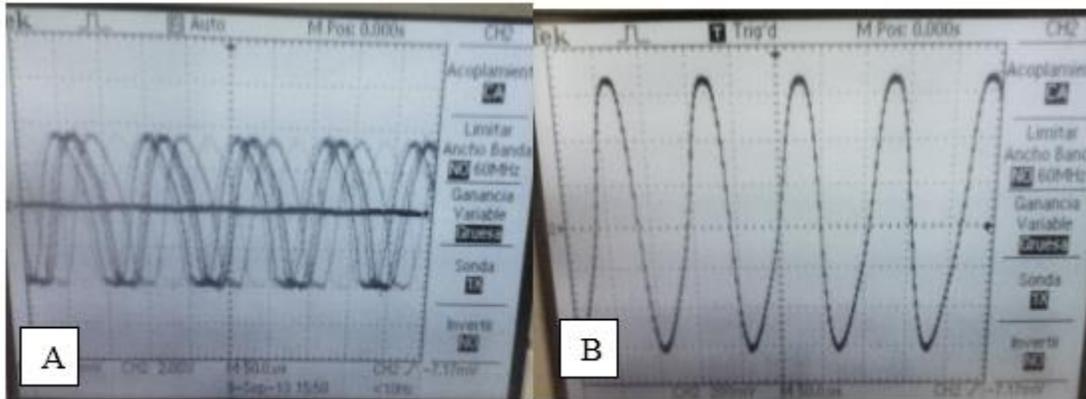


Figura 4.10. Señal sin el UAF42 (A), señal con el filtro pasa bajas (B).

4.6 Resultados del monitoreo de temperatura

Durante el día a partir de las siete horas el sistema de control monitoreaba la temperatura y verificaba que la temperatura se mantuviera en un rango de 22°C en adelante, entonces si en algún momento el clima estaba nublado a pesar de que las ventilas estuvieran abiertas el calefactor se activaba para mantener la temperatura deseada. Por las noches las ventilas se cerraban y el rango de temperatura que se buscaba mantener es que no fuera menor a 16°C, en caso contrario activaba el calefactor.

Algunas observaciones con respecto al monitoreo de temperatura por las noches, es que la temperatura llega a ser muy baja en algunas ocasiones, se monitorearon por ejemplo temperaturas entre 12°C a 18°C (D.F.). Y en algunas horas de la madrugada no bastaba el calefactor que se utilizó ya que la temperatura la mantenía entre 14°C y 15°C, menores al rango de temperaturas que se esperaba mantener ,aunque según la tabla 1.1 la planta soporta temperaturas nocturnas de 13°C.

En la figura 4.11 se muestra una imagen donde se muestra el momento en que las ventilas laterales se levantaban y se bajaban. Durante todos los días a las nueve de la mañana todas las ventilas se abren para renovar el oxígeno dentro del invernadero y se cierran a las ocho de la noche. La razón por la cual se optó por subir las ventilas durante la mañana y dejar abierto el invernadero durante todo el día es porque las plantas necesitan constantemente de oxígeno, entonces si se abren y cierran varias veces durante el día las ventilas, implica un gasto de energía mayor que subirlas por la mañana y bajarlas por la noche. En caso de que durante el día el clima sea nublado, el calefactor se activa para compensar la temperatura.

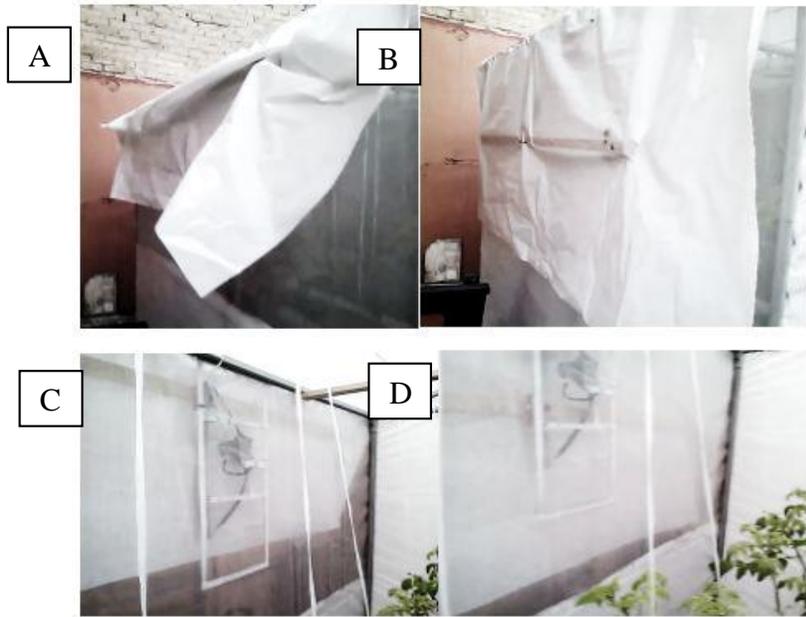


Figura 4.11. Vista exterior del momento en que se abre y se cierra la ventila lateral (A) y (B), Vista interior del momento en que se abre y se cierra la ventila lateral (C) y (D).

4.7 Resultados del monitoreo del sensor de radiación

Para evaluar si la luz durante el día era la necesaria se utilizó un sensor de radiación OPT101; el cual es activado a partir de las siete de la mañana por el sistema de control para comenzar el monitoreo de radiación hasta las ocho de la noche, fuera de este periodo el sensor es desactivado. Entonces si durante el día estaba nublado o estaba lloviendo, la luz artificial era activada para compensar la luz faltante según la radiación leída en el sensor. En la figura 4.12 se observa el momento en que se activan las lámparas RGB. Es importante destacar que aunque en el cálculo de las lámparas necesarias se obtuvo un total de cuatro lámparas, solo se instalaron dos debido al presupuesto limitado.



Figura 4.12. Lámpara RGB dentro del invernadero.

4.8 Crecimiento del jitomate cherry en el sistema N.F.T.

Se presentan a continuación fotos del crecimiento de jitomate cherry dentro del invernadero. En este desarrollo de las plantas en principio se implementó el control de riegos, el cual comienza desde las siete de la mañana hasta las ocho y media de la noche, en este lapso de riegos durante la primera media hora se activa la bomba sumergible para suministrar los nutrientes y durante la siguiente media hora se desactiva, así durante todo el periodo de riegos.

El monitoreo de la CE y el de pH se realizó periódicamente ya que aún no se incorporaban al sistema de control estos sensores. Posteriormente conforme fue avanzando el tiempo se fueron incorporando al sistema de control, la calefacción, el sensor de radiación y el control de las ventilas. El proceso de crecimiento que se muestra a continuación es en un lapso de 55 días como se muestra en la figura 4.13.



Figura 4.13. Crecimiento del jitomate cherry en el sistema N.F.T.

Durante este proceso se realizó otro experimento en el que al mismo tiempo que se colocaron las plantas de jitomate cherry se colocó otra planta en sustrato (fibra de coco, B) para ver cómo se desarrollaban en ambos sistemas (Figura 4.14). A los veinte días se puede observar que a pesar de que la planta en la fibra de coco se encontraba más grande que la mayoría de las colocadas en el sistema N.F.T. Las plantas del sistema N.F.T. comenzaron a desarrollar primero sus flores.



Figura 4.14. Planta en el sistema N.F.T. (A), Planta en sustrato de fibra de coco (B).

4.9 Sistema de control

En la figura 4.15 se muestran imágenes del resultado final del sistema de control, el cual cuenta con la parte del controlador en el que se hace la adquisición de los datos de CE, pH y también se adquieren los datos de los sensores relacionados con la adquisición del estado del clima dentro del invernadero. Finalmente cuenta con una etapa de potencia y visualizadores LCD para ver la temperatura, la humedad relativa, el estado de CE, el estado de pH y la hora.

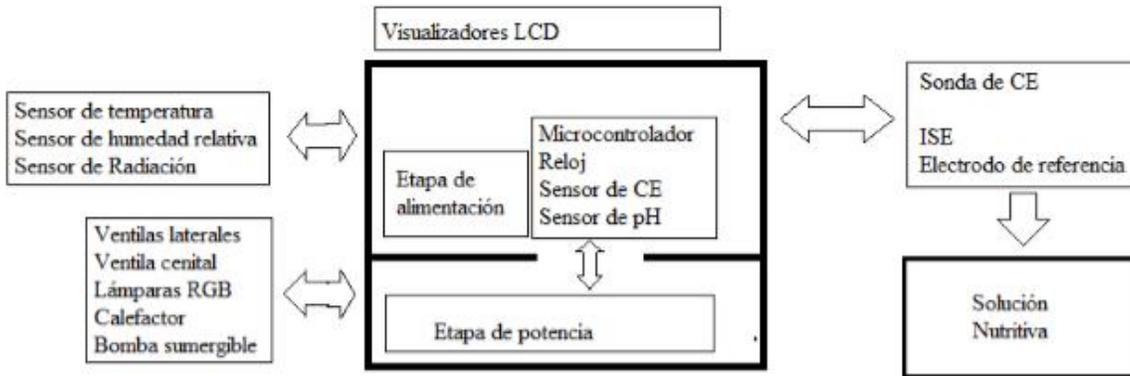


Figura 4.15. Sistema de control.

Diseñar la estructura y mecanismos de ventilación del invernadero

El invernadero construido resulto ser útil en la implementación y barato en comparación con un invernadero comercial. Al menos para la utilización en casa resulta ser una muy buena opción construir un invernadero con PTR. Más allá de elegir un material para construir la estructura en apariencia resistente se realizaron cálculos en los que se comprueba que realmente sirve para un invernadero, a pesar de que construirlo no es algo nuevo, si buscamos la forma de hacerlo barato (si se cuenta con la herramienta suficiente para hacerlo), duradero y resistente.

En cuanto a los mecanismos de ventilación se verifico que los mecanismos para elevar los cristales de los automóviles pueden ser una excelente opción para las ventilas laterales y ventila cenital. El cuidado que se tiene que tener en la utilización de estos motores es que la etapa de potencia tiene que estar muy bien diseñada para la corriente que manejan estos motores.

Diseñar y construir el sistema hidropónico

El sistema hidropónico N.F.T. diseñado funciono de manera adecuada para el crecimiento de la planta de jitomate cherry e incluso se observó una ventaja sobre el cultivo en sustrato, que fue el desarrollo de las flores de jitomate antes que la planta del cultivo en sustrato. Sin embargo por el contrario es muy demandante la atención que se requiere en el sistema N.F.T., pues aun con el sistema de control hay que prestar mucha atención a la concentración de los nutrientes dado que si no se suministran los nutrientes, los efectos negativos son casi inmediatos y devastadores, si se pretendiera tener un cultivo a mayor escala.

Diseñar y construir el sistema de control

Los resultados del sistema de control diseñado son satisfactorios y se logró conjuntar en un solo sistema, el control de los sensores y actuadores requeridos para un invernadero. A pesar de haber logrado el objetivo los requerimientos de los cultivos hidropónicos en invernadero son muy variados para cada especie vegetal o fruto y dependiendo del lugar geográfico donde se encuentre se modifican los rangos de las variables a controlar.

Diseñar y construir la etapa de alimentación del sistema

Respecto a la etapa de alimentación, a pesar de no haber alcanzado este objetivo se sabe que tiene que estar muy bien diseñada para poder suministrar la corriente y voltajes necesarios sobre todo para los actuadores y a la vez cuidar que el consumo de energía sea mínimo.

Referencias

- [1]. InfoAgro, “Control Climático en Invernadero”.
[Online]. Available: http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm
- [2] Samperio Ruiz Gloria. “Un paso más en la hidroponía”. Ed. México: Diana, 2ª impresión, Abril de 2005.
- [3] Herrera Ramírez Alejandra Sofía. Asiain Tapia Yamila, “Prototipo de invernadero hidropónico semiautomatizado para el cultivo de jitomate en casa habitación”, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingenierías y Tecnologías Avanzadas, 2009.
- [4] Mendoza Calvillo Ana Cecilia. Santiago Paz Maricela. Villanueva Reyes Mary Tere, “Prototipo de un sistema mecatrónico de riego para cultivos hidropónicos”, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingenierías y Tecnologías Avanzadas, 2009.
- [5] J. C. Gilsanz, “Hidroponía”, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay, Septiembre 2007.
- [6] Fondo de Capitalización e Inversión del Sector Rural, “Hidroponía, altos rendimientos en el cultivo de hortalizas”, 1 de Julio 2005.
- [7] J. Pérez, G. Hurtado, V. Aparicio, Q. Argueta, M. Larín, *Guía Técnica Cultivo de Tomate*, Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal.
- [8] Araujo F.G., Jiménez L., “Producción comercial de jitomate”. Atención Medica y Ayuda Rural A.C. México.
- [9]. Urrestarazu Gavilán Miguel. *Tratado de cultivos sin suelo*. Ed. España: Ediciones Mundi-Prensa, 3a edición, 2004.
- [10] Actividades Rurales, “Tomates cherry”.
[Online]. Available: <http://www.actividadesrurales.com/la-agricultura/tomates-cherry.php>
- [11]. A. Matamalla. J.I Montero. “Invernaderos. Diseño, construcción y climatización”. España: Ediciones Mundi-Prensa, p. 22.
- [12]. Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos, “Tipos de invernadero”.
[Online]. Available: http://www.amci.org.mx/certificacion_invernaderos.php
- [13]. Global Aceros, “PTR”.
[Online]. Available: <http://www.saapsa.com.mx/site/index.php/ptr>
- [14]. Comisión Federal de Electricidad, “Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento”, 2008.
- [15]. Hydro Environment, “Instalación de mallas y plásticos en un invernadero”.
[Online]. Available: <http://www.hydroenv.com.mx>
- [16]. Z. S. Cermeño. “Construcción de invernaderos”. España: Ediciones Mundi-Prensa, 2005, p. 224.

- [17]. SENER, “*Eficiencia energética de bombas sumergibles. Límites y método de prueba*”
[Online]. Available: <http://www.sener.gob.mx>
- [18]. Horticom plataforma,” *Portal temático para la industria, comercio distribución y economía hortícolas*”.
[Online]. Available: http://www.horticom.com/tematicas/cultivosinsuelo/pdf/soluciones_nutritivas.pdf
- [19]. Robles, Martha. 2008. Solución nutritiva. *Día Siete*, 453,54-55.
- [20]. G. S. Juan Manuel, “*Sistema de monitoreo en tiempo real para la cuantificación de compuestos en soluciones acuosas basado en lenguas electrónicas hidráulicas e inteligencia artificial*”, Tesis. Enero de 2008.
- [21]. “*La medida de conductividad. Un poco de teoría*”. Catálogo de laboratorio. 2004, 1 edición. Crison Instruments.
- [22]. Thomas L. Floyd, “*Dispositivos electrónicos*”, 8ª Edición, Editorial PEARSON, México, 2008.
- [23]. Mondragón, Sosa Lucio, “*Producción de jitomate en invernadero*”. Ed. México: Programa editorial del estado de México, 1ra. Edición, 2007.
- [24]. A. T. Juan Alejandro, D. L. Herson Daniel, M. P. José Roberto, “*Diseño y construcción de un electroencefalógrafo portátil con salida a un equipo de cómputo*”, Tesis. Abril 2012.
- [25]. Instrumentación y control, “*Efecto de ruido en los circuitos de Instrumentación: criterios para minimizar los efectos*”. [Online]. Available: <http://www.instrumentacionycontrol.net>.

Reportes:

L.A. Velázquez, “*Desarrollo del sensor de conductividad eléctrica*”, Reporte final de servicio social.

Publicación:

L. A. Velázquez, M. A. Hernández, CCE 2013. *First Advances on the Development of a Hydroponic System for Cherry Tomato Culture*. Paper, México D.F.



Instituto Politécnico Nacional

“La Técnica al servicio de la Patria”

Luis Antonio Velázquez Ramírez

Ingeniería Mecatrónica

Boleta: 2009640467

Reporte Final de Servicio Social

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados




SECCION DE BIOELECTRONICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA
CINVESTAV - IPN

Contenido

<i>Introducción</i>	71
<i>Objetivo</i>	71
<i>Material y equipo</i>	71
<i>Desarrollo del sensor de Conductividad Eléctrica</i>	73
Puentes de Wien	73
Amplificador no inversor	74
Convertidor de CA a CC	74
Esquemático del conductímetro	75
Sonda de CE	77
Calibración del sensor de CE	77
<i>Resultados</i>	78
<i>Conclusiones</i>	82
<i>Referencias</i>	82
<i>Anexos</i>	¡Error! Marcador no definido.

Introducción

En este reporte se presenta el desarrollo de un sensor para medir la Conductividad Eléctrica (CE) en una disolución. La conductimetría es una técnica instrumental que junto con potenciometría y la voltamperometría permiten el análisis de muestras líquidas.

El desarrollo del sensor busca complementar en forma útil y económica una lengua electrónica que ya es capaz de reconocer distintos elementos químicos en una disolución. La lengua electrónica se basa en el uso de sensores electroquímicos y el procesamiento avanzado de datos para distinguir entre cada elemento presente en la disolución. El sensor de CE diseñado pretende contribuir con medida de la conductividad de la disolución y completar la información analítica entregada por los sensores de la lengua electrónica.

La lengua electrónica disponible en el laboratorio 11 de la Sección de Bioelectrónica del Cinvestav, está constituida por un arreglo de sensores potenciométricos para el reconocimiento de diferentes aniones y cationes. Dichos sensores, generan una diferencia de potencial en su superficie respecto de un electrodo de referencia al momento de sumergirlos en una disolución. Esta clase de sensores son conocidos como Electroodos Selectivos a Iones (ISE).

La medida de conductividad por su parte, se basa en la aplicación de voltaje alterno entre dos conductores y dependiendo de la molaridad presente en la disolución, se mide la impedancia generada entre los dos conductores.

Objetivo

- Desarrollar un sensor de Conductividad Eléctrica

Material y equipo

Material:

6 Resistencias de 1 k Ω

1 Resistencia de 33 k Ω

1 Resistencia de 56 k Ω

4 Resistencias de 100 k Ω

1 Resistencia de 3.9 k Ω

1 Resistencia de 22 k Ω
3 Resistencias de 220 k Ω
2 Resistencias de 1.6 k Ω
1 Resistencia de 5.6 k Ω
1 Resistencia de 50 k Ω
1 Resistencia de 2.2 k Ω
1 Resistencia de 27 k Ω
2 Potenciómetros de 100 k Ω
1 Potenciómetro de 2 k Ω
2 Capacitores de 0.015 μ F
1 Capacitor de 0.22 μ F
2 Capacitores de 10 μ F
2 Capacitores de 22 pF
2 Diodos zener HP4148
4 Diodos 1N4004
1 Amplificador operacional TL074
1 Filtro universal UAF42
Headers macho 1x9
Headers macho 2x8
1 PIC16F887
LCD 16x2
1 Cristal de 4 MHz

Equipo:

Osciloscopio

Multímetro

Fuente de voltaje de -12VCD a 12VCD

Desarrollo del sensor de Conductividad Eléctrica

Una forma de medir la Conductividad Eléctrica en una disolución es mediante una sonda que consta de dos conductores de oro. La elección de un metal noble se debe a que ofrece una buena conducción eléctrica y es resistente a la oxidación (figura 1, B). A través de los conductores de la sonda se hace circular una corriente alterna generada por un puente de Wien de tal manera que se genera una resistencia entre los conductores. Posteriormente dicha resistencia se mide utilizando un amplificador no inversor (figura 1, A). La magnitud de la resistencia medida dependerá por tanto, solo de la concentración de iones presentes en la disolución [1].

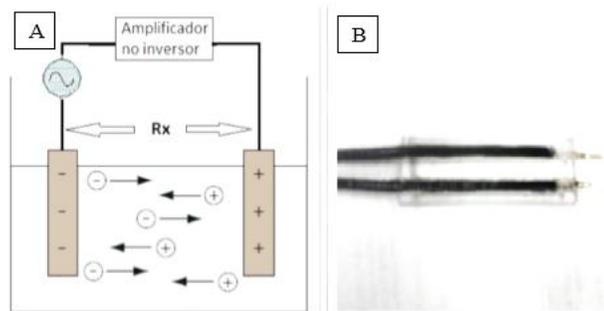


Figura 1. Medida de la CE (A), Sonda para medir la CE (B).

Puente de Wien

El puente de Wien genera la onda de corriente alterna sin necesidad de una señal externa y tiene la capacidad de variar la frecuencia cambiando resistencias y condensadores. La frecuencia de oscilación está dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \dots (1)$$

Donde C1 y C2 son iguales a C mientras que R es igual a R6 y R7 en la figura 2.

El puente de Wien (figura 2) implementado para el circuito de CE ofrece una onda de corriente alterna con una frecuencia de 10 kHz y una amplitud de 220 mVpp. La amplitud de la onda puede ser modificada variando la resistencia R2, mientras que las resistencias R8 y R9 se ocupan para atenuar la señal saliente de volts a milivolts.

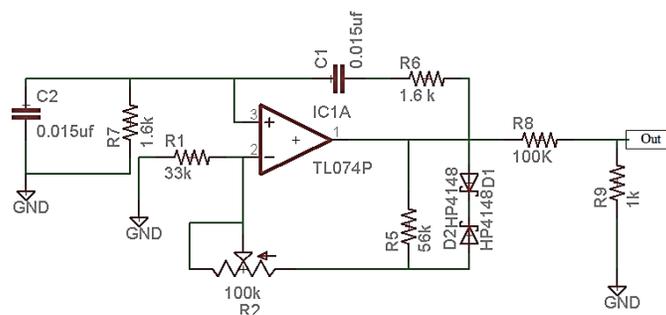


Figura 2. Puente de Wien para el circuito de CE.

Amplificador no inversor

La onda de corriente alterna obtenida del puente de Wien es introducida a la configuración de amplificador no inversor con el objetivo de mandar la señal alterna por uno de los conductores de la sonda, recibirla en el otro extremo cuando este dentro de la disolución y mediante las ecuaciones de esta configuración obtener la resistencia generada. En la figura 3 se muestra la configuración del amplificador que se utiliza para el circuito de CE y diremos que la sonda es Rx conectada a los pines 2 y 3 del JP1.

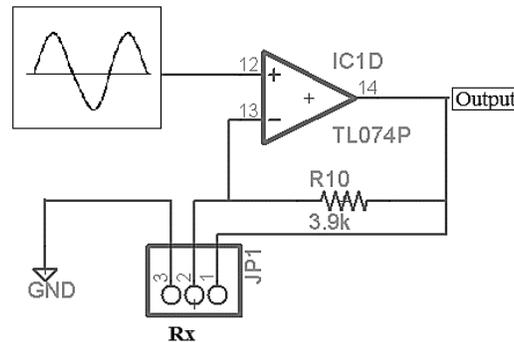


Figura 3. Amplificador no inversor.

Entonces para obtener Rx es necesario resolver las ecuaciones descritas a continuación [2]. Sabemos que la ganancia en un amplificador no inversor es:

$$A_0 = \frac{V_{salida}}{V_{entrada}} \dots (2)$$

Mientras que para saber el valor de Rx tenemos que:

$$A_0 = \left(1 + \frac{R10}{Rx}\right) \dots (3)$$

Así, despejando obtenemos:

$$Rx = \frac{R10}{A_0 - 1} \dots (4)$$

La amplitud de voltaje que se obtiene a la salida del amplificador no inversor dependerá de la cantidad de iones presentes en la disolución, por lo tanto cuando varía la señal de salida cambia el valor de Rx. Este factor permite diferenciar entre distintos valores de conductividad.

Convertidor de CA a CC

El puente de Wien en conjunto con el amplificador no inversor ofrecen una señal de corriente alterna que varía de amplitud dependiendo de la conductividad que se este midiendo. Para lograr medir y ver las señales de estos circuitos se hace necesario la utilización de un osciloscopio, por lo tanto para evitar la utilización de instrumentos de medición de alto costo monetario, se implementa a la salida del amplificador no inversor un convertidor de corriente alterna a corriente continua. La señal de corriente continua es posible medirla con el multímetro o bien

introducirla a un ADC de un microcontrolador para ser procesada digitalmente sabiendo que para cada valor de voltaje corresponde un valor de CE.

En la figura 4 observamos el convertidor de CA a CC, la onda de corriente alterna pasa a través de un rectificador de onda completa y posteriormente a un amplificador operacional en configuración sumador escalador. R3 y R24 permiten ajustar el voltaje de salida en corriente directa, mediante estas dos resistencias variables se pueden proponer los voltajes de salida para cada valor de CE, es decir, si se está midiendo una disolución con una conductividad de 1 mS se puede ajustar el convertidor para obtener a la salida 1.2 VCD o bien 2 VCD dependiendo del valor sea más conveniente.

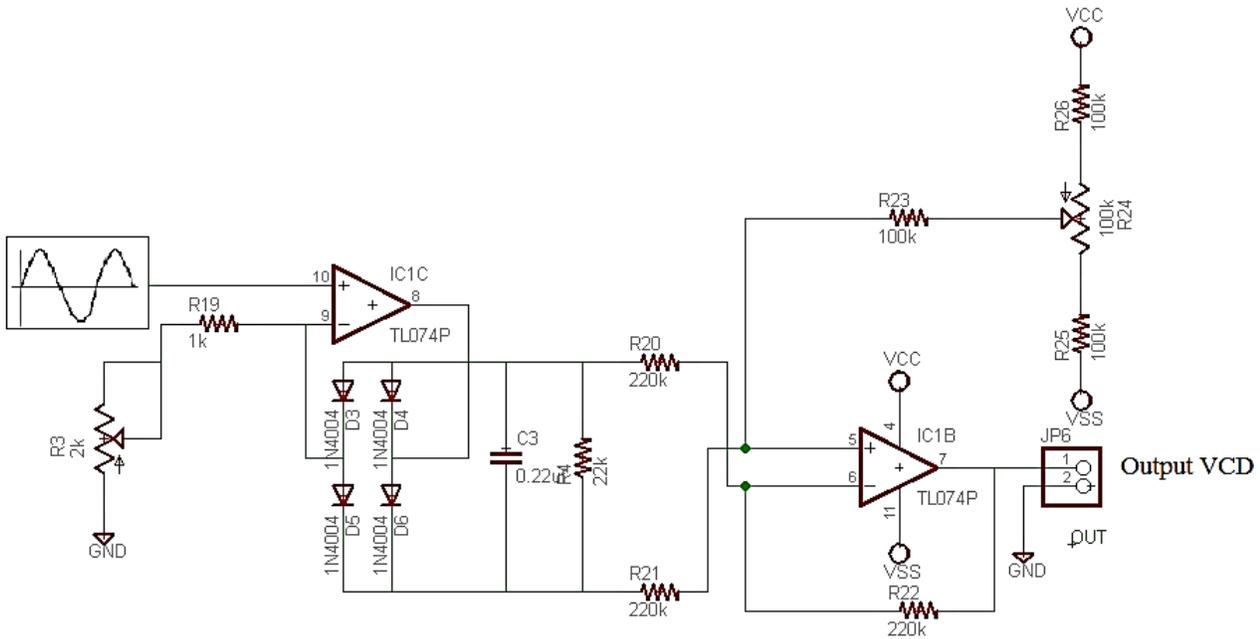


Figura 4. Convertidor de CA a CC.

Esquemático del conductímetro

Finalmente el circuito del conductímetro es el conjunto de los tres circuitos antes descritos [3] (figura 5). Además de los circuitos antes descritos es posible observar que el conductímetro cuenta con un UAF42 con la finalidad de disminuir el ruido presente que se genera en el circuito, aunque no se realizó un análisis de la causa del ruido observado con ayuda del osciloscopio a la salida del amplificador no inversor, fue posible observar una señal más estable con el filtro UAF42. El filtro universal está configurado como filtro pasa bajas de segundo orden tipo Butterworth de frecuencia de corte de 10 kHz. El software utilizado, proviene de una serie de programas de diseño llamado FilterPro creados por Burr-Brown. Utilizando el llamado FILTER42, que es específicamente usado para configuraciones del UAF42. El programa es sencillo, es una guía paso a paso y realiza el cálculo exacto de los valores de los componentes. Para un filtro Butterworth, se tiene una atenuación de 3dB en la frecuencia de corte [4]. En JP4 existe la posibilidad de poner o quitar el filtro pasa bajas, para ponerlo se conecta el pin 1 con el 2 y el pin 7 con el 8 y para quitarlo se conecta el pin 3 con el 4, el objetivo en el circuito fue evaluar el conductímetro con y sin el filtro. JP5 es la alimentación del circuito y en JP1 se conecta la sonda a los pines 2 y 3.

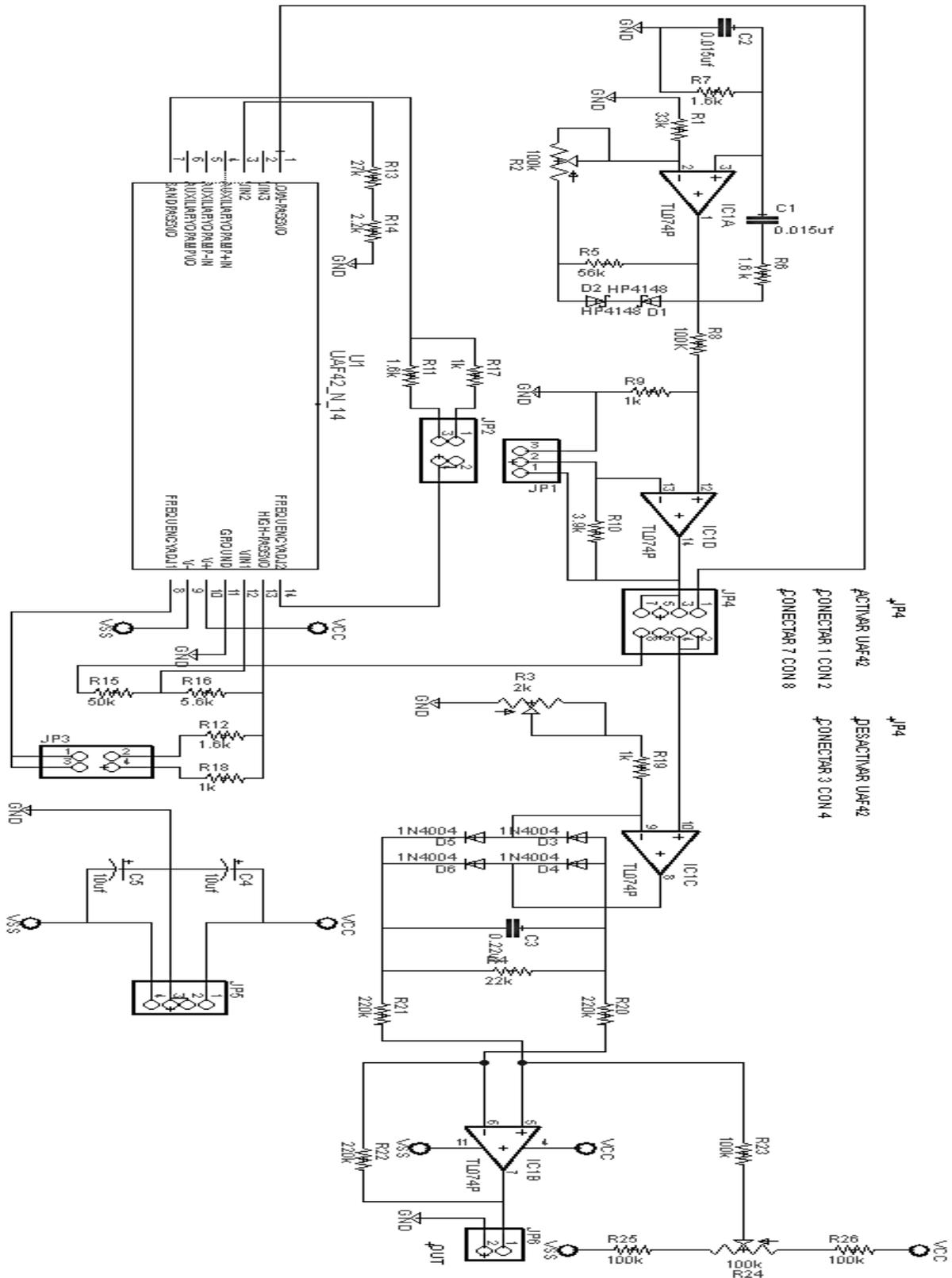


Figura 5. Esquemático del conductímetro realizado en EAGLE 6.4.

Sonda de CE

La sonda de CE fue diseñada en base a prueba y error, se realizaron mediciones de conductividad con alambres conductores de oro a diferentes distancias de 0.5, 1, 1.5 y 2 centímetros, con una separación de 5 mm las medidas de conductividad resultaron ser las más aproximadas a los valores esperados. Sin embargo en el diseño final de la sonda la distancia entre los conductores quedo a 6 mm de separación con resultados favorables.

Para la construcción de la sonda se utilizaron dos cables coaxiales de 20 cm de largo que se soldaron a cada conductor de oro de 8 mm de largo y 1 mm de diámetro cada uno. Los cables coaxiales con los conductores de oro soldados a los extremos de cada cable se fijaron a una barra de acrílico transparente de 2 por 5 centímetros para mantener la distancia de 6 mm entre cada conductor, a la barra de acrílico se le realizaron canales para meter ahí los cables conductores y finalmente cuando los cables estaban en los canales del acrílico se recubrieron con silicón para peceras (figura 6).

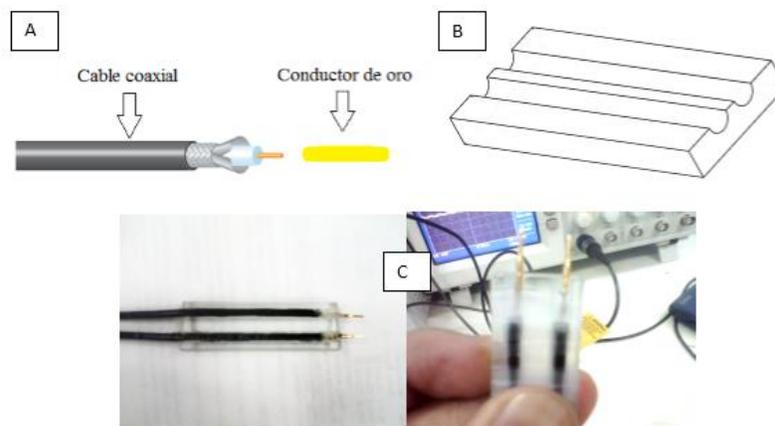


Figura 6. Conexión del cable coaxial con el conductor de oro (A), Diseño de la barra de acrílico (B), Sonda de CE (C).

Calibración del sensor de CE

Para calibrar el sensor se realizaron 5 soluciones de calibración con KCl (Cloruro de Potasio, figura 7) de 1, 2, 3, 4 y 5 mili Siemens.

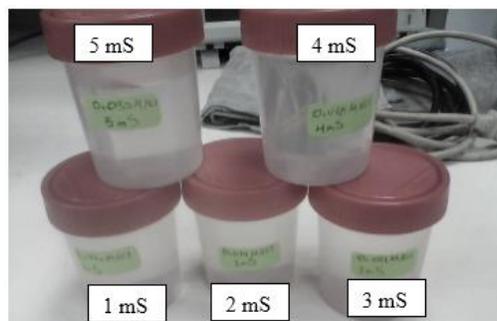


Figura 7. Soluciones de calibración.

Para proceder con la calibración se inserta dentro de una de las soluciones de calibración la sonda de CE previamente conectada al circuito del conductímetro y con ayuda del osciloscopio observar en la salida del amplificador no inversor como cambia la amplitud de la onda alterna, si la sonda de CE permanece fuera de la solución de calibración se debiera ver en el osciloscopio que la amplitud de la onda alterna a la salida del amplificador no inversor es la misma que la entrante por que la ganancia es de uno.

Se calibro el puente de Wien con una señal de amplitud de 220 mVpp a una frecuencia de 10 kHz para enviarla al amplificador no inversor. Se introdujo la sonda a una solución de calibración de 1 mS se midió la amplitud de la señal de salida del amplificador no inversor y con ayuda de las ecuaciones 2, 3 y 4 se obtiene el valor resistivo, mismo que fue variando con cada solución de calibración. Para saber si la conductividad medida es la correcta se utiliza la siguiente ecuación:

$$Siemens = \frac{1}{Rx (Ohms)} \dots (5)$$

Entonces con ayuda de la ecuación 5 podemos hacer la equivalencia de que valor resistivo esperar del sensor de CE para cada valor de conductividad.

Resultados

Se muestran los resultados obtenidos en la tabla 1 medidos en la salida del amplificador no inversor y calculados con las ecuaciones 2, 3, 4, y 5. Para cada valor de conductividad a su vez se ajustan valores de voltaje en corriente directa a la salida del convertidor CA a CC.

Tabla 1. Resultados de la calibración del sensor de CE.

Soluciones de calibración	Valores calculados Prueba 1	Valores calculados Prueba 2	Valores resistivos ideales	Voltaje de salida del Convertidor CA a CC
CE (mS)	R1(Ω)	R2(Ω)	Rx (Ω)	VCD (V)
1	1005	975	1000	1.27
2	550	481.4	500	2.54
3	331.91	333	333.33	3.75
4	256.57	254.9	250	4.97
5	207.4	205	200	6.1

Se consideró que los valores obtenidos de las pruebas son correctos tomando una tolerancia del 10%, si esto se considera entonces todos los resultados están dentro de la tolerancia y por lo tanto las pruebas son favorables. Otro aspecto importante a destacar es que las mediciones se realizaron entre una temperatura de 24 a 26 grados centígrados.

Con los resultados obtenidos sabemos entonces que valor de voltaje en corriente directa corresponde a cada valor de conductividad. De tal manera que los resultados pueden ser representados en una gráfica como se muestra en la figura 8.

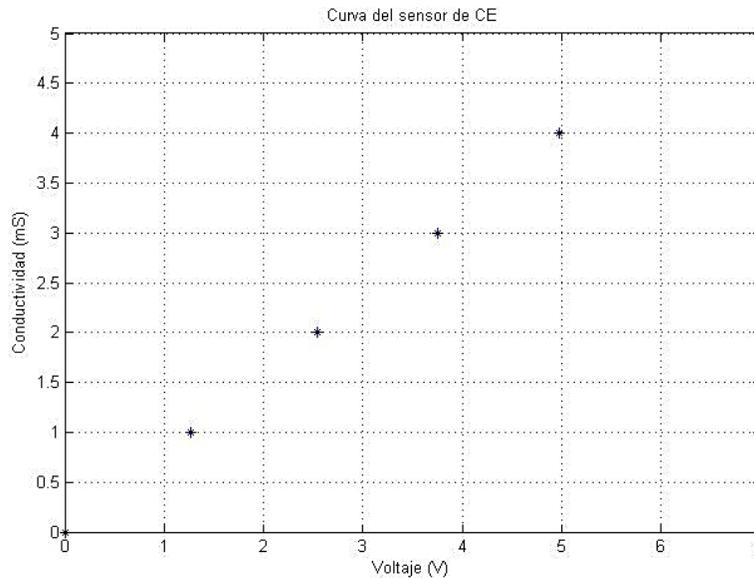


Figura 8. Grafica de la respuesta del sensor de CE.

Con la curva obtenida es posible modelar el comportamiento del sensor mediante una ecuación que aproxime los puntos principales en la gráfica. Para ello se utilizó el comando de MATLAB `polyfit(x,y,n)`, que dado un conjunto de pares de datos (puntos en el plano), representados en MATLAB mediante dos vectores **x** e **y** que almacenan, respectivamente, las coordenadas x e y de dichos datos, puede realizarse un ajuste polinómico de grado **n** ($n=1$ para una recta).

Entonces dados los vectores (en la ventana de comandos de MATLAB) **x** e **y**:

`X = [0 1.27 2.54 3.755 4.975 6.1050]`

`Y = [0 1 2 3 4 5]`

Escribimos el comando `polyfit` especificando que queremos aproximar los puntos descritos en el vector **X** e **Y**, con $n=2$ para decir que queremos aproximar los puntos con una ecuación de segundo orden.

`Aproximación = polyfit(X, Y, 2)`

Así obtenemos:

`Aproximación = 0.0087 0.7630 0.0064`

Por lo tanto la ecuación queda descrita como se muestra a continuación:

$$CE = 0.0064 + (0.7630)(Voltaje) + (0.0087)(Voltaje^2) \dots (6)$$

Graficando la ecuación 6 en un rango de -200 a 200 en x (eje de voltaje), obtenemos la gráfica mostrada en la figura 9A donde podemos apreciar el comportamiento de la ecuación. Sin embargo solo es útil la aproximación en un rango de x (eje de voltaje) de 0 a 5, ya que en ese rango es donde opera la curva del sensor de CE. En la figura 9B se aprecia la certeza de aproximación de la ecuación 6.

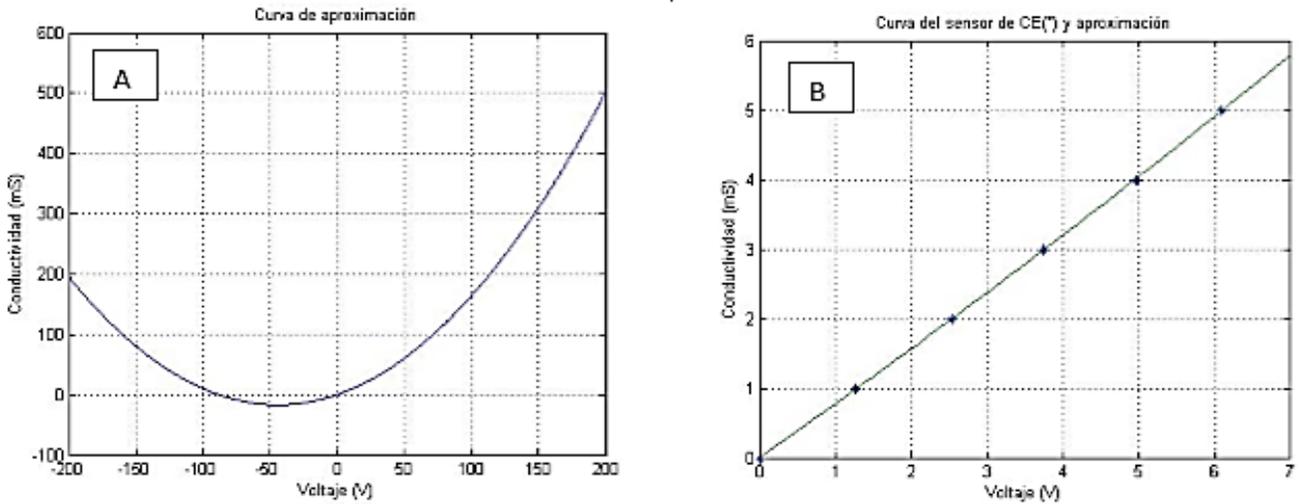


Figura 9. Curva de aproximación de la ecuación 6 (A), Curva del sensor de CE y aproximación (B).

Con el comportamiento del sensor de CE modelado con una ecuación es posible utilizar la ecuación 6 en un microcontrolador para medir el voltaje mediante un ADC e introducir cada valor digital a la ecuación y esta arroje un valor de CE por cada voltaje.

Entonces se utiliza un microcontrolador PIC16F887 para leer los valores de voltaje y mostrar en una LCD el valor de CE medido. En la figura 10 se muestra el esquemático del PIC con la LCD para mostrar los valores de conductividad.

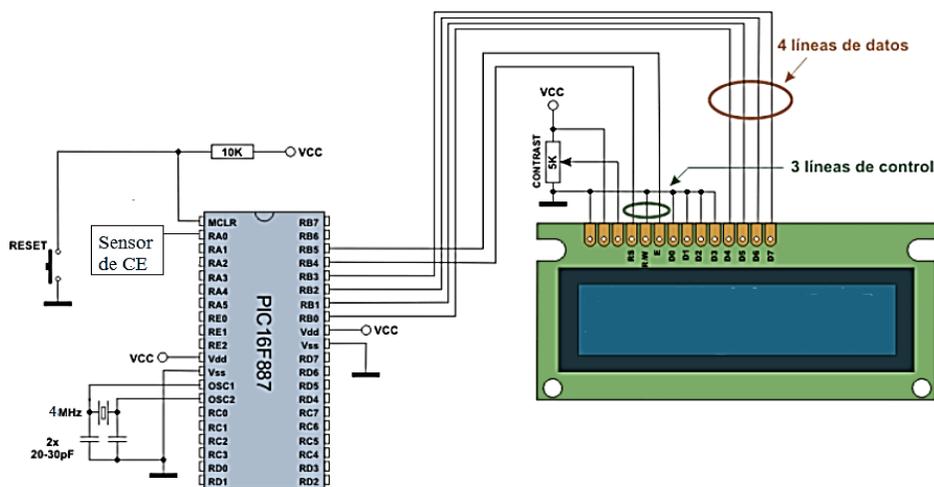


Figura 10. Conexión del PIC16F887 con la LCD.

El diagrama de flujo mostrado en la figura 11 ilustra la lógica de programación del PIC16F887.

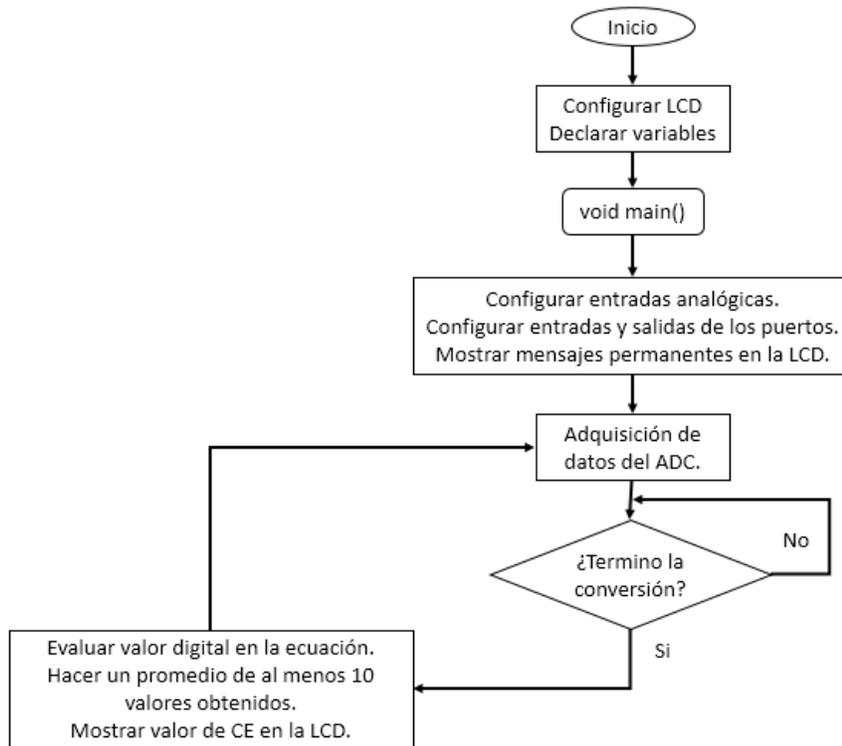


Figura 11. Lógica de programación del PIC16F887.

En la figura 12A se muestra una prueba de campo del sensor de CE en una disolución, mientras que en 12B se muestra el resultado en la LCD.

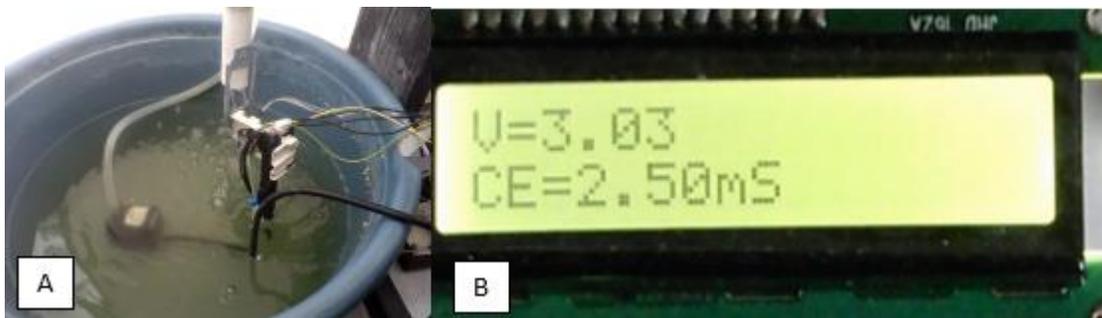


Figura 12. Prueba de campo (A), Mensaje en la LCD (B).

Conclusiones

Se logró desarrollar un sensor económico y útil para el sensado de la Conductividad Eléctrica, aunque el costo detrás de todo el desarrollo del mismo es elevado en cuanto a la instrumentación y los cuidados que se deben tener a la hora de trabajar con señales que pueden ser fácilmente afectadas por el ruido presente en el ambiente o bien causado por los mismos dispositivos electrónicos con los que opera el sensor de CE. Se requieren de más pruebas para terminar de caracterizar el sensor de CE, tales como verificar si cuando se mide la conductividad en una disolución es necesario o no el filtro universal, aunque si es necesario para pruebas de medición con ayuda del osciloscopio debido a que ofrece una señal más estable. Se requiere además realizar la caracterización del sensor a distintas temperaturas con el objetivo de mantener una medida estable mediante una compensación de temperatura y no cambie la CE.

Referencias

- [1]. “*La medida de conductividad. Un poco de teoría*”. Catálogo de laboratorio. 2004, 1 edición. Crison Instruments.
- [2]. Thomas L. Floyd, “*Dispositivos electrónicos*”, 8ª Edición, Editorial PEARSON, México, 2008.
- [3]. Otiva, “*Measuring PPM/EC/TDS*”, junio de 2007.
[Online]. Available: <http://www.otiva.net/projects/ppm/>
- [4]. A. T. Juan Alejandro, D. L. Herson Daniel, M. P. José Roberto, “*Diseño y construcción de un electroencefalógrafo portátil con salida a un equipo de cómputo*”, Tesis. Abril 2012.