

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

**Invernadero hidropónico automatizado en riego, con
monitoreo de pH, conductividad eléctrica y control de
variables climáticas**

TRABAJO RECEPCIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

PRESENTA

VERONICA OLVERA RODRÍGUEZ

DIRECTOR DEL TRABAJO

M. en I. Luis Rene Sagredo Hernández

Ciudad de México, diciembre de 2016.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

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

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

Invernadero hidropónico automatizado en riego, con monitoreo de pH, conductividad eléctrica y control de variables climáticas.

Veronica Olvera Rodríguez

diciembre 2016

Agradecimientos

A mi familia, profesores, amigos y compañeros.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por el apoyo otorgado para la impresión y empastado del presente trabajo recepcional.

Resumen

Este trabajo aborda la implementación de un invernadero hidropónico con un sistema hidráulico que permitió un riego homogéneo en las plantas y la recirculación del fluido drenado. Este sistema protegido consiste en la instrumentación de variables principales y automatización de las acciones que intervienen en el crecimiento de la planta.

Por parte de la instrumentación se realizó la medición y registro de las variables de temperatura ambiente y humedad relativa del interior del invernadero; potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE) tanto del riego como del fluido drenado, y la temperatura de la raíz de la planta. La automatización implicó la programación del número de riegos al día y su duración, control de la temperatura del sistema y la esterilización del lixiviado mediante una lámpara UV.

El cultivo bajo este enfoque generó ventajas como aislar el sistema de propagación de enfermedades, cambios climáticos y el ahorro de agua y nutrientes. El monitoreo de pH y CE permitió cambiar tanto la cantidad de solución nutritiva como la fórmula de acuerdo a la etapa fenológica de la planta. El cultivo se realizó para dos plantas diferentes, tomate rojo de la variedad Ramsés y fresa de la variedad California y Monterrey; ambas plantas se cultivaron en diferentes ciclos agrícolas. En ambos casos se obtuvieron resultados favorables, obteniendo tamaño y peso adecuado, consistencia y buen sabor para el tomate, en el caso del fruto de la fresa su tamaño fue mediano, carne jugosa y buen sabor.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Motivación	3
1.3. Objetivo general	3
1.4. Objetivos específicos	3
2. Invernadero	5
2.1. Características generales	5
2.2. Ventajas de cultivo en invernaderos	6
2.3. Consideraciones	6
2.4. Tipos de invernaderos	7
2.5. Hidroponía	8
2.6. Sustrato para cultivo hidropónico	9
2.7. Cultivos hidropónicos	9
2.8. Selección de semilla	11
2.9. Necesidades climatológicas	11
2.9.1. Temperatura	11
2.9.2. Humedad relativa	12
2.9.3. Intensidad luminosa	12
2.9.4. Altitud	13

2.10. Etapas fenológicas del tomate rojo y fresa	14
2.11. Componentes de un sistema hidropónico	16
2.11.1. Sistema de riego	16
2.11.2. Solución nutritiva hidropónica	17
2.12. Variables para determinar la absorción de nutrientes	17
2.12.1. Conductividad eléctrica (CE)	17
2.12.2. Potencial de hidrógeno (pH)	18
2.12.3. Potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE) en el sustrato	18
3. Implementación	21
3.1. Sistema de riego por goteo	21
3.2. Número, tiempo y presión de cada riego	23
3.3. Sistema de almacenamiento	24
3.4. Recirculación	26
3.5. Sistema eléctrico	27
3.5.1. Costos de implementación	30
4. Instrumentación	31
4.1. Adquisición de temperatura y humedad	32
4.1.1. Medición de potencial de hidrógeno (pH)	37
4.1.2. Medición de conductividad eléctrica (CE)	38
4.2. Automatización de temperatura de un invernadero	38
4.3. Programación gráfica	43
5. Resultados y análisis	49
5.1. Riegos	49
5.2. Comparación entre sensores: calibrados y utilizados	49
5.3. Automatización de encendido y apagado de calefacción	52

5.4. Tomate rojo	53
5.5. Fresa	58
5.5.1. Temperatura en la raíz de la planta	59
5.6. Plagas	63
6. Conclusiones	65
A. Especificaciones de sensores y equipos utilizados en la implementación y automatización del invernadero	69
A.1. Sonda de ph Vernier	69
A.2. Medidor de pH, CE, TDS, (HI 98129)	70
A.3. Sensor de temperatura y humedad relativa HMZ-433A1	70
A.4. Circuito de mando	70
A.5. Especificaciones MyRio	71
A.6. Especificaciones lámpara UV	73
A.7. Especificaciones de la bomba	74
A.8. Especificaciones del ventilador	74
A.9. Especificaciones de los paneles solares	75
A.10. Especificaciones de controlador de sistema fotovoltaico y batería	75

Índice de figuras

1.1. Distribución de producción agroalimentaria protegida, México 2015. . .	2
2.1. Bolsa agrícola con tezontle y fibra de coco.	10
2.2. Luxómetro modelo LX-105.	14
2.3. Etapas fenológicas del tomate rojo.	14
2.4. Etapas fenológicas de la fresa.	16
2.5. Influencia del pH del suelo en la disponibilidad de nutrientes.	19
3.1. Estructura metálica e invernadero terminado.	22
3.2. Componentes de un sistema de riego por goteo.	22
3.3. Bolsa agrícola con 2 piquetas y gotero con 4 líneas de distribución. . . .	23
3.4. Distribución hidráulica. El tanque del lado izquierdo de la figura contiene agua simple, el tanque del lado derecho, solución nutritiva.	24
3.5. Diagrama de flujo para la programación de la automatización del riego.	25
3.6. Lámpara UV.	26
3.7. Tablero de control.	27
3.8. Contactor.	29
3.9. Relevador bimetalico.	29
3.10. Panel solar, controlador de carga y batería de 12 Volts	30
4.1. Diagrama de bloques de un sistema de medición.	31
4.2. Sensor de temperatura y humedad relativa HMZ-433A1.	33

4.3. Ubicación de los sensores de temperatura y humedad relativa para el cultivo de tomate rojo.	34
4.4. Ubicación de los sensores de temperatura y humedad relativa para el cultivo de fresa.	35
4.5. Sensor de temperatura y humedad DTH11.	35
4.6. Sonda de temperatura de acero inoxidable TMP-BTA la marca Vernier.	36
4.7. Sensor de pH marca Vernier.	37
4.8. Curva de calibración del sensor de pH.	38
4.9. Despliegue de valores de pH y conductividad eléctrica.	39
4.10. Control encendido-apagado.	39
4.11. Lazo de control.	40
4.12. Diagrama de flujo para la calefacción.	41
4.13. NI MyRio	41
4.14. Ventilador de 125 Watts.	42
4.15. Calefactor.	43
4.16. Interface para programación de riegos del encendido y apagado de actuadores.	44
4.17. Diagrama de bloques de la adquisición de temperatura ambiente.	45
4.18. Diagrama de bloques de la adquisición de temperatura de la raíz.	45
4.19. Diagrama de bloques de la adquisición de humedad relativa.	46
4.20. Diagrama de bloques de la adquisición de potencial de hidrógeno (pH).	46
4.21. Diagrama de bloques de la adquisición de conductividad eléctrica (CE).	46
4.22. Diagrama de bloques para el encendido-apagado del calefactor o ventilador.	47
4.23. Diagrama de bloques del módulo de riego.	48
5.1. Termohigrómetro digital.	51
5.2. Medidor de bolsillo pH/CE/°C HI 98130, marca Hanna.	52
5.3. Evolución de humedad relativa en el interior del invernadero, 16 agosto 2015.	54

5.4. Evolución de temperatura ambiente en el interior del invernadero, 16 agosto 2015.	54
5.5. Gráfica de pH en las etapas fenológicas del tomate rojo, abril a julio 2015.	55
5.6. Gráfica de CE en las etapas fenológicas del tomate rojo, de abril a julio 2015.	56
5.7. Peso del fruto del racimo uno.	57
5.8. Medida del diámetro y longitud del fruto del racimo uno.	57
5.9. Sistema Radicular de la planta uno.	58
5.10. Gráfica de humedad relativa, del día 08 febrero 2016.	59
5.11. Gráfica de temperatura valores del día 08 febrero 2016.	59
5.12. Gráfica de temperatura ambiente y temperatura en la raíz de la planta.	60
5.13. Sonda de temperatura colocada en la raíz de la planta.	61
5.14. Pesaje de fresa.	61
5.15. Pesaje de fresa.	62
5.16. Mosca blanca.	63
5.17. Araña roja.	63
A.1. Diagrama de mando.	71
A.2. Diagrama de bloques del NI myRIO.	72
A.3. Pines del puerto MXP.	73
A.4. Controlador fotovoltaico	76

Capítulo 1

Introducción

En México existen empresas que se dedican a la automatización de invernaderos integrando tecnologías de Holanda, España, China, entre otros, con sistemas de: control de riego y clima, dosificación de fertilizantes, calefacción y enfriamiento, siendo, estas tecnologías muy costosas que no todos los interesados en instalarlas pueden comprar. Una de las soluciones es recurrir a tecnologías con un nivel de automatización menor y/o acotando la operación del sistema a espacios menores.

Por otro lado, el desarrollo de tecnología mexicana para la automatización de invernaderos no ha tenido un desarrollo considerable generando un desbalance en la oferta y la demanda; a tal grado que aun no se ve reflejado la disminución de los costos de automatización, y se tiene la desventaja de que los productores interesados, no puedan cambiar del cultivo tradicional al cultivo protegido.

La falta de tecnificación, los grandes gastos iniciales y el prolongado tiempo de retorno de inversión en los invernaderos, son algunos de los factores por los cuales los invernaderos son abandonados después del segundo año de cultivo y sólo los productores que han podido invertir y sostener la operación del cultivo, siguen produciendo.

Es claro que el cambio climático terrestre está afectando los ciclos agrícolas, colocando en desventaja desde esta vertiente a los cultivos tradicionales. Es por estas razones que los cultivos protegidos son una de las soluciones tentativas. Por ejemplo, en el 2016 el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) supone un incremento en producción de cultivos bajo invernaderos que va de un 15 a 20 %, frente a un mismo cultivo tradicional en suelo, debido a que las plantas se encuentran en unas condiciones de nutrición ideales. Por otro lado, se sabe de los programas del gobierno federal que apoyan al sector agrícola, a través de sus secretarías, con un porcentaje del costo total del sistema. Pero no todos los que se inscriben en las convocatorias son beneficiados y además, los recursos proporcionados para su financiamiento no son suficientes para alcanzar un nivel de automatización alto.

1.1. Antecedentes

En la década de 1980, se presenta un auge en el desarrollo de los invernaderos en la zona sur de México, principalmente para floricultura y producción de hortalizas [García Aguilar, 1991]; su desarrollo se basó en la construcción de estructuras multicapilla a dos aguas con ventila cenital.

En México, los primeros invernaderos con interés comercial fueron instalados en la región oriente del Estado de México por inmigrantes alemanes y japoneses, en sus inicios la construcción era de concreto, herrería y cristal [Loredo, 2014].

Para la década de 1990 en México se inicia con la implementación de invernaderos con estructura de materiales más ligeros, las cubiertas de plástico, sistemas sencillos de control climático-automatizado e implementación de sistemas de riego automatizado.

A partir de 1995 los productores de hortalizas de los estados de Sinaloa, Sonora, Baja California, Jalisco, zona del Bajío y algunos otros estados del sur, inician con la inversión en producción hortícola bajo invernadero.

De acuerdo con el Atlas Agroalimentario 2015, en México existen 25814 unidades de producción de agricultura protegida, de las cuales 65 % son invernaderos, 10 % son macrotúneles, 10 % microtúnel y 15 % son casa sombra, techo sombra o pabellón, en la Figura 1.1 se muestra la distribución de los tipos de invernaderos mencionada.

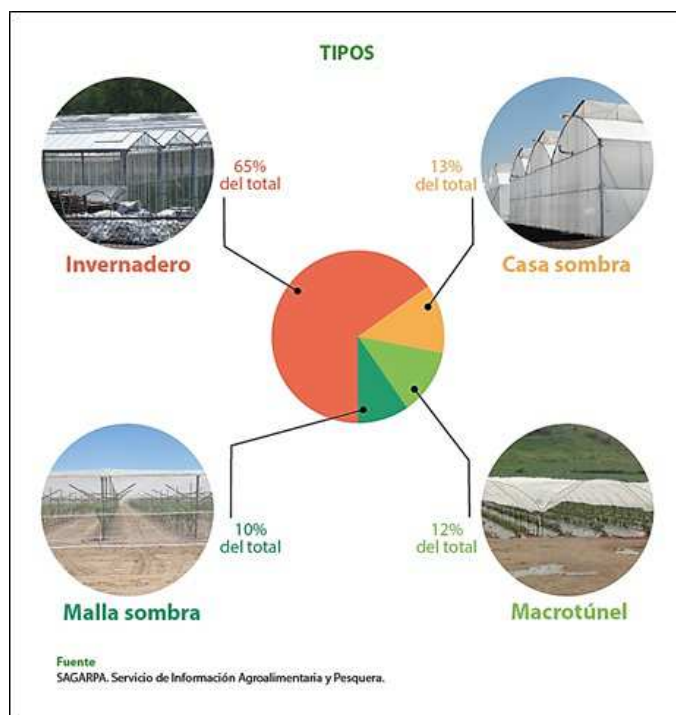


Figura 1.1: Distribución de producción agroalimentaria protegida, México 2015.

Los cultivos que principalmente se tienen en los invernaderos en México son: tomate rojo, pepino, fresa, pimientos, rosas y cultivos ornamentales, forestales y medicinales.

1.2. Motivación

La principal motivación, fue el aplicar los conocimientos adquiridos de las diferentes asignaturas de la carrera de Ingeniería en Sistemas Electrónicos Industriales a un sistema del área de la agricultura.

Además del gusto por las plantas, la importancia de emplear un sistema protegido automatizado (invernadero), que garantice la siembra y cosecha de una planta empleando un mínimo de recursos de agua y nutrientes.

Otro motivo fue destacar las grandes ventajas en producción y calidad que prometen los sistemas hidropónicos ampliando el número de variedades de plantas que se pueden cultivar. En este caso se optó por el tomate y la fresa que son un fruto de consumo básico, además de la facilidad en la adquisición de la semilla y plántula, respectivamente.

Finalmente, el interés fue llevar la implementación y automatización de un invernadero a un nivel en el que con sensores y actuadores se obtenga la automatización y medición de variables, en la producción de un cultivo.

1.3. Objetivo general

- Automatización de un invernadero e implementación de un sistema hidropónico con medición de potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica y recirculación de solución nutritiva.

1.4. Objetivos específicos

- Implementación de un sistema de riego por goteo.
- Implementación de un sistema de recirculación de solución nutritiva
- Automatización ambiental de un invernadero.
- Instrumentación de un sistema para adquisición y registro de las variables de potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica, temperatura y humedad relativa.

Capítulo 2

Invernadero

En el siguiente capítulo se mencionan cuatro tipos de invernaderos, sus características y las ventajas que se tienen al cultivar en un invernadero.

Se describen las características generales, necesidades climatológicas y etapas fenológicas del tomate rojo y fresa; frutos seleccionados para cultivar en el invernadero implementado.

2.1. Características generales

Un invernadero es una instalación cubierta y abrigada artificialmente con materiales transparentes para proteger a los cultivos de las variaciones climatológicas al igual que de las plagas y enfermedades a las que pueden ser susceptibles los cultivos [Castilla and Prados, 2007].

Esta instalación permite el control de las condiciones de temperatura y humedad relativa; la adquisición de pH y conductividad eléctrica (CE) en la solución nutritiva suministrada a la planta y en el lixiviado¹, para mantener los valores óptimos para el buen desarrollo del cultivo.

La estructura de un invernadero debe estar formada por un armazón ligero sobre el que se asienta una cubierta superior de material transparente fabricado con polietileno con una opacidad², generalmente, de 30 %. Este porcentaje es seleccionado de acuerdo al análisis de las condiciones climáticas del lugar donde se quiere colocar y al cultivo seleccionado.

Los costados se pueden cubrir con malla antiáfidos³, fabricada de polietileno de alta densidad de color cristal para un máximo aprovechamiento de la luz solar, también puede cubrirse lateralmente por cristal. Se deben colocar ventanas frontales o cenitales

¹Agua de riego que se filtra a través del sustrato.

²Capacidad de un material para impedir el paso de la luz solar a través de éste.

³Familia de insectos homópteros que se alimentan de materias vegetales y forman plagas.

al igual que puertas para el servicio del invernadero.

2.2. Ventajas de cultivo en invernaderos

A continuación se indican las ventajas por las cuales se considera favorable el cultivo en un invernadero [Aristega, 2010]:

- Realizar cultivos en determinadas zonas climáticas y épocas estacionales que no son adecuadas para los cultivos tradicionales.
- Optimización del consumo de agua.
- Disminuir el tiempo de los ciclos vegetativos de las plantas, permitiendo obtener mayor número de cosechas por año.
- Cambiar la cantidad de nutrientes en cualquier etapa del crecimiento de la planta de acuerdo a las necesidades del cultivo.
- Aumento de producción a casi 300 % respecto a los cultivos tradicionales.
- Mejoramiento en la calidad de los cultivos.
- Control de plagas y enfermedades.

2.3. Consideraciones

Sin embargo, los invernaderos demandan aspectos como:

- Conocimientos de agronomía.
- Personal capacitado en esta actividad productiva que tengan especialización empresarial y técnica.
- Los gastos de producción (semillas, nutrientes, conservación, etc.) se encuentran muy por encima respecto a los cultivos realizados tradicionalmente.

Los costos aproximados por metro cuadrado para un invernadero que van desde los \$ 235,00 pesos por metro cuadrado en invernaderos muy pasivos y sencillos, hasta los \$ 900,00 pesos por metro cuadrado en invernaderos activos con equipos sofisticados de automatización [Carrasco, 2011].

2.4. Tipos de invernaderos

Hay diversas clasificaciones para los invernaderos, pero de acuerdo a su arquitectura se distinguen dos formas básicas:

- Invernadero unimodular o moncapilla: constituido por un invernadero aislado de otras estructuras.
- Invernadero multimodular o multicapilla: lo forman una serie de invernaderos unidos.

Algunos de los diseños de invernaderos más utilizados son los siguientes:

Invernadero tipo túnel: se trata de invernaderos que tienen una anchura y altura variable. Entre sus principales ventajas se encuentran:

- Alta resistencia a los vientos y fácil instalación (recomendable para productores que se inician en el cultivo protegido).
- Solamente recomendado en cultivos de bajo a mediano porte (lechuga, flores, frutilla, etc).
- Apto tanto para materiales de cobertura flexibles, así como rígidos.

Invernadero tipo capilla: tienen la techumbre formando uno o dos planos inclinados, según sea a una o dos aguas, las principales ventajas son las siguientes:

- Fácil construcción y conservación.
- Es muy aceptable para la colocación de todo tipo de plástico, malla o material rígido.
- Facilidad para evacuar el agua de lluvia y evitar estancamientos.

Invernaderos tipo dientes de sierra o asimétrico: es una variación de los invernaderos tipo capilla. Este diseño se recomienda para zonas con muy baja precipitación y altos niveles de radiación [Ceballos et al., 2006]. Estos invernaderos tienen una techumbre única inclinada en ángulos entre 5 y 15 grados. Entre las ventajas de este tipo de invernadero se encuentran:

- Su construcción es de mediana complejidad.
- Buen aprovechamiento de la luz en la época invernal.
- Elevada inercia térmica debido a su gran volumen unitario.

- Excelente ventilación.

Invernaderos con techumbre curva: este tipo de invernaderos tienen su origen en los invernaderos túneles. Dentro de este tipo de invernaderos, se pueden encontrar diferentes alternativas según la forma que adopta el techo, estos pueden ser: circulares, semielípticos, medio punto, ojivales etc.

Principales ventajas de los invernaderos con techumbre curva:

- Buen volumen interior de aire.
- Buena resistencia frente a los vientos.
- Espacio interior totalmente libre: facilidad de desplazamiento, conducción de cultivos, etc.
- Su construcción es de mediana a baja complejidad.

2.5. Hidroponía

La palabra hidroponía derivada de los vocablos griegos *hidro* (agua) y *ponos* (labor). Esta técnica puede ser definida como la ciencia del crecimiento de las plantas sin utilizar el suelo, usando agua o un medio inerte como la grava, arena, vermiculita (mineral formado por silicatos de hierro o magnesio, del grupo de las micas), piedra pómez o cultivo en agua [Gavilán, 2015].

En un sistema hidropónico se pueden cultivar: hortalizas, flores, plantas ornamentales, condimentos y plantas medicinales [Alpízar Antillón, 2004]. La implementación de este sistema es una opción de mejora cuando se presentan pérdidas en la calidad del suelo, contaminación, plagas y/o enfermedades. Este esquema de producción se puede aplicar desde escalas pequeñas hasta un nivel industrial.

Como escala pequeña se considera la producción que se puede realizar en el jardín o patio de una casa, mientras que un nivel industrial es la implementación de sistemas hidropónicos en terrenos no menores a una hectárea.

En un sistema hidropónico es recomendable el uso de sustratos biodegradables que permitan ser reutilizados para disminuir el impacto ambiental negativo. Además, se debe tener un sistema de riego diseñado para recolectar o recircular los lixiviados para evitar la contaminación del suelo y generar un ahorro de agua.

Los sistemas de cultivo hidropónico se pueden dividir en dos grupos:

- Cerrados: en este sistema el lixiviado se recircula con el objetivo de ahorrar agua y solución nutritiva.

- Abiertos: también llamados a solución perdida, donde el lixiviado y la solución nutritiva no se recicla, sino se pierde, vía subsuelo.

2.6. Sustrato para cultivo hidropónico

El sustrato constituye el lecho que sirve de sostén y soporte para el desarrollo del sistema radical de la planta, éste debe proporcionar un medio de reserva de agua y aeración para las raíces.

Las características que debe reunir un sustrato para cultivo hidropónico son [Urrestarazu et al., 2006]:

- Sin residuos industriales y/o humanos.
- Sus propiedades físicas no se deben de alterar con el tiempo.
- Permitir una buena oxigenación y drenaje.
- Buena capacidad de retención de humedad, de forma homogénea.

En general los sustratos se pueden clasificar en tres grupos.

- Sustratos inorgánicos inertes: piedra pómez, grava, tezontle, roca volcánica, carbón vegetal y arena.
- Sustratos orgánicos: fibra de coco, cascara de arroz, aserrines y *peat moss*⁴.
- Sustratos sintéticos: espuma de poliestireno y espuma de poliuretano.

El sustrato debe de mantener la cantidad de agua requerida para la planta porque ésta sólo absorbe la cantidad de agua que necesita para mantenerse hidratada.

En la Figura 2.1 se muestra una bolsa agrícola con la mezcla de dos sustratos orgánicos: tezontle y fibra de coco.

2.7. Cultivos hidropónicos

Se seleccionó el cultivo de tomate rojo y fresa, pues las condiciones climatológicas que requieren estos cultivos son muy parecidas a las de la Ciudad de México, y son de los frutos que tienen mayor demanda en el mercado.

⁴El *peat moss* es un musgo que se forman en regiones nórdicas con pantanos, es un material orgánico de una masa esponjosa y ligera, cuya variación de color va del pardo claro al oscuro, y es rico en carbono.



Figura 2.1: Bolsa agrícola con tezontle y fibra de coco.

En el Cuadro 2.1 se describen algunas características que se deben considerar para el cultivo del tomate rojo y fresa.

Características generales del tomate rojo y fresa	
Tomate rojo	<p>El tomate rojo (<i>lycopersicum esculentum</i>) es una hortaliza de fruto, pues nace de una flor y tiene semillas de las cuales nacerá otra planta.</p> <p>Es común que se le llame tomate o jitomate, dependiendo de la región de México en la que se encuentre.</p> <p>Por su crecimiento, las variedades del tomate rojo pueden ser de crecimiento determinado o crecimiento indeterminado.</p> <p>Las variedades de crecimiento determinado tienen forma de arbusto y la producción está determinada por una cantidad de ramilletes florales.</p> <p>En la variedad de crecimiento indeterminado la planta continuamente está emitiendo ramilletes florales y su cultivo se detiene cuando el productor lo decide. Este tipo de crecimiento es el que se recomienda para los sistemas hidropónicos intensivos.</p>
Fresa	<p>La fresa pertenece a la familia Rosácea y género <i>Fragaria</i> es una planta herbácea y de pequeña altura.</p> <p>La planta de fresa es de tipo herbáceo y perenne, es decir, puede producir brotes nuevos cada temporada.</p> <p>El tallo principal se llama corona, y es donde surgen los tallos florales así como las hojas, y los estolones (de 2 cm de longitud) crecen en múltiples direcciones produciendo así nuevas plantas que se enraízan.</p> <p>La planta de fresa tiene un periodo de vida de 2 años, aproximadamente, con frutos de buen desarrollo.</p>

Cuadro 2.1: Características del tomate rojo y fresa.

2.8. Selección de semilla

Para tener una buena calidad en el cultivo se debe iniciar desde la selección de una semilla certificada por las normas de la International Seed Testing Association (ISTA)⁵. Esta asociación se creó en 1921 con el objetivo de estandarizar los diferentes análisis aplicados en semillas así como facilitar el mercado internacional [Poulsen, 2000].

Al seleccionar una semilla certificada se asegura un mayor porcentaje de germinación y una mejor calidad en el cultivo.

2.9. Necesidades climatológicas

El cultivo del tomate rojo y fresa requieren diferentes condiciones climatológicas para lograr un buen desarrollo y producción, por ello es importante conocer los intervalos de temperatura y humedad relativa en los cuales estos cultivos pueden desarrollarse y tener una mayor productividad, comparada con los cultivos tradicionales.

2.9.1. Temperatura

En el Cuadro 2.2 se describen los efectos de temperatura mínima, óptima y máxima en el cultivo del tomate rojo [Cabrera, 2004].

Intervalos de temperatura para el cultivo de tomate rojo		
Mínima	Óptima	Máxima
12 °C	18 a 25 °C	30 a 35 °C
Temperaturas menores detienen el crecimiento y en la maduración del fruto se originan tonalidades amarillentas.	Temperatura ideal para la floración y crecimiento vegetativo. El tomate rojo es una planta de clima cálido, las temperaturas óptimas para su crecimiento se encuentran en 25 °C en el día, y entre 18 °C por la noche.	En este intervalo de temperaturas se afectan la polinización, causando aborto floral y originando tonalidades amarillentas en el fruto.

Cuadro 2.2: Efectos de temperatura en el cultivo del tomate.

En el Cuadro 2.3 se describe los diferentes intervalos de temperatura y sus efectos sobre el cultivo de fresa [Empresarial, 2015].

La fresa es un cultivo que se adapta muy bien a muchos tipos de climas, pero los rangos

⁵El ISTA es una institución intergubernamental, sus miembros son trabajadores individuales en semillas y estaciones de análisis de semillas. Algunas de estas estaciones tienen la autorización de la ISTA, para expedir oficialmente sus certificados.

Intervalos de temperatura para el cultivo de fresa		
Mínima	Óptima	Máxima
Menores a 15 °C	18 a 25 °C	Mayores a 32 °C
Temperaturas menores a los 12 °C los frutos presentan deformaciones y maduración lenta. A 0 °C los órganos florales quedan destruidos. Temperaturas de -8 °C causan daños muy severos a los tejidos y entre -10 a -12 °C muere la planta.	Temperatura ideal para la floración y crecimiento vegetativo. La temperatura óptima para su crecimiento es de 18 a 25 °C	En este intervalo de temperaturas se afectan la polinización, causando aborto floral.

Cuadro 2.3: Efectos de temperaturas en el cultivo de fresa.

de temperatura extremos que se describen en el Cuadro 2.3 anterior pueden dañar por completo al cultivo.

2.9.2. Humedad relativa

Los rangos de humedad relativa adecuados para el cultivo del tomate rojo se describen en el Cuadro 2.4.

Intervalo de humedad relativa para el cultivo de tomate rojo		
Mínima	Óptima	Máxima
Menor a 15 %	60 a 75 %	mayor a 94 %
Causa en la planta una transpiración excesiva produciendo estrés hídrico que es perjudicial para los frutos.	Rango ideal de humedad relativa para el desarrollo de la fresa.	Disminuye la polinización debido a que el polen se compacta.

Cuadro 2.4: Efectos de humedad relativa en el cultivo de tomate rojo.

Los rangos de humedad relativa adecuados para el cultivo de la fresa se muestran en el Cuadro 2.5.

2.9.3. Intensidad luminosa

La luz provee de la energía necesaria a las plantas para la fotosíntesis, con la cual se produce la materia orgánica para su crecimiento y desarrollo.

La fotosíntesis es el proceso mediante el cual las plantas combinan el dióxido de carbono de la atmósfera con el agua y producen materia vegetal, emitiendo al ambiente oxígeno.

Intervalos de humedad relativa para el cultivo de fresa		
Mínima	Óptima	Máxima
Menor a 30 %	60 a 75 %	90 %
Causa en la planta una transpiración excesiva produciendo fenómenos de estrés hídrico que es perjudicial para los frutos.	Rango ideal de humedad relativa para el cultivo de fresa.	Humedad relativa mayor a 90 % favorece el desarrollo de enfermedades en el follaje, agrietamientos en el fruto y dificulta la fecundación debido a que el polen se compacta.

Cuadro 2.5: Efectos de humedad relativa en el cultivo de fresa.

La fotosíntesis de las plantas depende de la intensidad luminosa y de la calidad de la luz, a niveles altos de intensidad luminosa puede dañarse el cultivo y disminuir el proceso de floración, fecundación y desarrollo vegetativo.

Toda la radiación visible promueve la fotosíntesis pero la longitud de onda en el intervalo de 380 nm a 710 nm es donde se desarrolla mejor este proceso por la absorción de las clorofilas [Reol, 2003]. La incidencia de la radiación lumínica sobre los organismos no es homogénea en calidad e intensidad, depende de la latitud y altitud.

Los niveles de intensidad luminosa recomendados para el cultivo del tomate rojo y fresa se encuentra entre 10000 y 35000 lux. Existe una correlación entre la temperatura óptima y la intensidad luminosa, por ejemplo, para el tomate la temperatura óptima se encuentra entre 18 y 25 °C y esta temperatura se alcanza entre los 10000 y 35000 lux [Alpi and Tognoni, 1991].

El tomate requiere de días soleados de 8 a 10 horas de luz para un buen desarrollo y coloración en el fruto.

La fresa durante las etapas de floración y crecimiento requiere de 8 a 10 horas de luz para el crecimiento, pero para lograr un mayor tamaño en el fruto se requieren días largos de 12 horas de luz.

El instrumento de medición que permite medir el nivel de iluminación se llama luxómetro, Figura 2.2, la unidad de medida es el lux derivada del Sistema Internacional.

2.9.4. Altitud

El tomate puede cultivarse desde los 20 a los 2000 msnm (metros sobre el nivel del mar), tomando en cuenta la capacidad de adaptación de cada variedad o híbrido, y la fresa desde los 0 a 3000 msnm.



Figura 2.2: Luxómetro modelo LX-105.

2.10. Etapas fenológicas del tomate rojo y fresa

Las etapas que forman el ciclo de la vida de la planta se llaman etapas fenológicas. De acuerdo a la etapa de desarrollo en que se encuentre la planta, ésta tiene diferentes demandas hídricas, nutricionales y una menor o mayor resistencia a las plagas o enfermedades.

En la Figura 2.3 se muestra el desarrollo del tomate rojo en cada una de las etapas fenológicas.





Plantula	Desarrollo Vegetativo	Floración	Fructificación
			
1 - 21 días	22 - 49 días	51- 80 días	81-100 días
Etapas Inicial	Etapas Vegetativa		Etapas Reproductiva

Figura 2.3: Etapas fenológicas del tomate rojo.

En el Cuadro 2.6 se describen las cuatro etapas de crecimiento de la planta de tomate rojo y fresa.

Etapas	Tomate rojo	Fresa
Inicial	Comienza con la germinación; en esta etapa la semilla requiere oscuridad y una temperatura ambiente entre 20 y 25 °C. En esta etapa la planta invierte su energía en la síntesis de nuevos tejidos de absorción y en el proceso de la fotosíntesis. La variedad de tomate seleccionada para su cultivo fue Saladette con un porcentaje germinación mayor a 92 %. Esta etapa dura de 1 a 21 días y termina con el trasplante, el cual consiste en cambiar la plántula a una bolsa agrícola en la cual continuará su desarrollo. El requerimiento hídrico de la planta en esta etapa es mínimo, sólo es necesario mantener húmedo el sustrato.	Puede iniciar desde la germinación de la semilla de fresa o hacer la compra de la planta para realizar el trasplante de ésta a las bolsas agrícolas.
Vegetativa	Esta etapa inicia partir del día 22 después de la germinación hasta el día 49 antes de la floración, aproximadamente. La cantidad de agua que requiere la planta en esta etapa es de 350 a 400 ml de agua por día. El exceso de luz afecta a la coloración verde de las hojas y disminuye su crecimiento, la falta de luz también daña a las hojas causando una coloración amarilla y posteriormente caen.	En la etapa vegetativa las yemas principales comienzan a crecer e inicia el desarrollo de las primeras hojas. Inicia el desarrollo de las partes vegetativas y comienza la formación de estolones.
Floración	Después del desarrollo vegetativo, inicia la etapa de floración, en esta etapa el tomate no tolera altas temperaturas ya que al alcanzar los 40 °C la planta pierde su flor, sin importar que esta temperatura permanezca por periodos cortos. En esta etapa es importante mantener una temperatura en el rango de 12 °C y 35 °C, así como la humedad relativa en el rango de 60 % a 80 %. La demanda hídrica de la planta en esta fase es de 450 a 550 ml de agua por día.	Al día 120 después del trasplante se da la aparición del órgano floral y abren las primeras flores. Primeras flores abiertas, plena floración y caída de pétalos.

Etapa	Tomate rojo	Fresa
Reproductiva	Esta etapa inicia entre los 30 y 40 días. Se caracteriza porque el crecimiento de la planta disminuye para iniciar la fructificación. En esta etapa los frutos extraen de la planta los nutrientes necesarios para su crecimiento y maduración. La cantidad de agua que demanda la planta en esta fase es de 550 a 1500 ml de agua por día, el requerimiento de agua depende del tamaño de la planta.	A los 150 días después del trasplante se da la maduración del fruto.

Cuadro 2.6: Etapas fenológicas del tomate rojo y fresa.



Figura 2.4: Etapas fenológicas de la fresa.

En la Figura 2.4 se muestra el desarrollo de fresa en cada una de las etapas fenológicas.

2.11. Componentes de un sistema hidropónico

2.11.1. Sistema de riego

Un sistema de riego consiste en aportar agua al suelo o sustrato para que las plantas tengan el suministro necesario de líquido manteniendo un nivel de humedad adecuado. Para un sistema hidropónico, además de proporcionar el agua necesaria, se tiene que aplicar nutrientes por medio del riego para favorecer el crecimiento de la planta.

Existen diferentes sistemas de riego, entre los más utilizados en los cultivos se encuentran:

- Riego por aspersión.
- Puente móvil.
- Riego por goteo.

2.11.2. Solución nutritiva hidropónica

La solución nutritiva (SN) es la mezcla de agua y nutrientes con la formulación óptima que depende de la especie, variedad, etapa fenológica de la planta, la época del año, la duración del día y el clima. Debido a estos factores Steiner⁶ estudió sistemáticamente el efecto de la SN.

Existe una relación directa entre la concentración de nutrimentos y la conductividad eléctrica de la SN al aumentar la conductividad eléctrica, la planta debe destinar mayor energía para absorber agua y nutrimentos (Asher y Edwards, 1983; Ehret y Ho, 1986).

La conductividad eléctrica apropiada para la producción de tomate está estrechamente relacionada con la temperatura de la solución nutritiva.

Tanto Steiner (1973) como Resh (1991) observaron que las plantas toleran una mayor CE en invierno que en verano [Rangel et al., 2006]. La temperatura de la SN influye en la absorción de agua y nutrientes. La temperatura óptima de la SN para la mayoría de las variedades de tomate rojo es de 22 °C, aproximadamente, en la medida que la temperatura disminuye también disminuye la absorción y asimilación de los nutrientes, una temperatura en la SN menor a 15 °C ocasiona que la planta reduzca la absorción de los nutrientes.

Para el crecimiento y desarrollo de las plantas son indispensables 16 nutrientes, tres de ellos: carbono, hidrógeno y oxígeno elementos no minerales. Estos elementos son asimilados por las plantas obteniéndolos del agua o del aire, por lo cual, no se incluyen en la nutrición mineral, por no ser objeto de adición como fertilizantes [Aristu, 2012].

Los 13 nutrientes restantes son suministrados mediante la solución nutritiva y están divididos en dos grupos:

- **Macronutrientes:** son los elementos requeridos en mayor proporción por las plantas, estos son; nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre.
- **Micronutrientes:** son los elementos que también son esenciales para el desarrollo y deben ser agregados a la solución de las plantas. Su requerimiento es menor, los elementos que pertenecen a este grupo son: cobre, boro, hierro, manganeso, zinc, molibdeno y cloro.

2.12. Variables para determinar la absorción de nutrientes

2.12.1. Conductividad eléctrica (CE)

Expresa la concentración total de sales solubles contenidas en el agua. El agua pura presenta una conductividad de cero o valores cercanos y el agua potable se encuentra en

⁶Dr. Abram A. Steiner de la Universidad de Wageningen, Holanda, uno de los máximos investigadores de la hidroponía de los años 60.

un rango de 1, entre más sales en solución contenga el agua la conductividad eléctrica será mayor. En el Cuadro 2.7, se muestran los niveles de CE para las diferentes etapas fenológicas de la planta.

Etapas fenológicas	Conductividad eléctrica
Fase inicial- trasplante	0,5
Vegetativa	1,0 - 1,5
Floración	1,5 - 2,0
Reproductiva- fructificación	2,0 - 2,5

Cuadro 2.7: Niveles de conductividad eléctrica para las etapas de desarrollo del tomate rojo.

Es recomendable realizar un análisis del agua que será destinado para la preparación de la solución nutritiva, ya que una salinidad alta puede provocar toxicidad al cultivo.

2.12.2. Potencial de hidrógeno (pH)

El pH es una unidad de medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia.

El pH apropiado de la solución nutritiva (SN) para el desarrollo de los cultivos se muestra en el Cuadro 2.8. Sin embargo, el pH de la SN no es estático, ya que depende del dióxido de carbono en el ambiente y del contenedor en el que se encuentra la SN si es abierto o cerrado. El pH del agua de riego generalmente se encuentra entre 7,0 y 7,5; antes de preparar la SN se debe establecer un pH de 5,5 en el agua.

Para disminuir el nivel de pH, se puede emplear algún ácido comercial, como ácido sulfúrico, fosfórico o cítrico.

El control del pH es necesario para evitar que se precipiten los nutrientes en forma de sales insolubles que pueden obstruir el sistema de riego por goteo.

Cultivo	Intervalo de pH en la SN
Tomate rojo	5,5 a 6,5
Fresa	5,5 a 6,0

Cuadro 2.8: Niveles de pH para el agua de riego.

2.12.3. Potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE) en el sustrato

El pH del sustrato determina la absorción de los nutrientes y se puede medir tomando una muestra del lixiviado, es decir, se realiza una medición indirecta.

El intervalo de pH en el que se absorbe la mayor cantidad de nutrientes debe estar entre 5,5 y 7,0 Figura 2.5. Si el sustrato tiene un pH muy alejado a estos valores las plantas

no absorben los nutrientes que necesitan y presentan una deficiencia nutricional, en ocasiones se llega a confundir con la falta de nutrientes, pero si se realiza un análisis de pH se puede deducir que es por un nivel menor o mayor al rango ideal de pH en el sustrato y no a la falta de nutrientes.

Para que se tenga una mayor absorción por las plantas de los macronutrientes, el intervalo de pH en el sustrato se tiene que mantener entre 6,5 y 7,5.

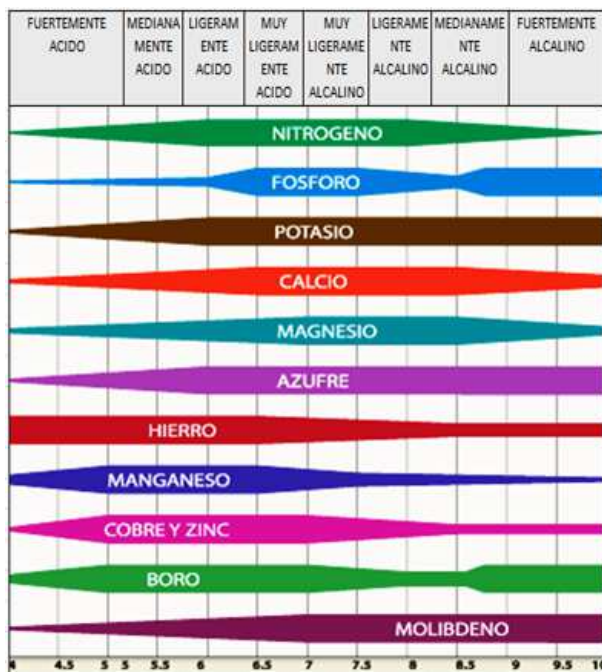


Figura 2.5: Influencia del pH del suelo en la disponibilidad de nutrientes.

La conductividad eléctrica del sustrato en la que se tiene una mayor absorción de nutrientes [Quintero et al., 2011] se encuentra en el intervalo de 2,3 a 3,5.

Capítulo 3

Implementación

El invernadero hidropónico se localiza dentro del plantel San Lorenzo Tezonco de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, delegación Iztapalapa, Ciudad de México. De acuerdo a las coordenadas de Google Maps la ubicación del invernadero se encuentra a una altitud de 2258 msnm. La altitud es uno de los factores a considerar para seleccionar el cultivo, a la altitud que se encuentra el plantel San Lorenzo Tezonco se pueden cultivar el tomate rojo y fresa ya que se encuentra en el rango de altitud recomendada para estos frutos.

La estructura base (esqueleto del invernadero) es metálica y se encuentra montada sobre una cimentación para fijarla al suelo, una de las principales características en el diseño del techo que evita el estancamiento de agua de lluvia ya que consta de dos planos inclinados. A este tipo de diseño se le llama a "dos aguas", Figura 3.1.

El invernadero tiene las siguientes dimensiones: ancho 3,0 m, largo 6,5 m, alto 2,7 m. Sin embargo, el área del cultivo es de 12 m², cuenta, además, con una área séptica y de almacén. La orientación del eje del invernadero es aproximadamente 8° norte, alineado al largo de la estructura.

En el diseño se separó la entrada principal y el área de cultivo. Esta separación permite mantener al cultivo aislado, previniendo algún tipo de contaminación por el ingreso, en este espacio se colocó un recipiente en el suelo con un poco de cloro, llamada almoadilla sanitizante la cual deben pisar las personas que ingresan para desinfectar la suela de los zapatos.

En el invernadero se tiene una distribución de 32 bolsas agrícolas de 23 cm de diámetro, cuya altura es de 25 cm, con capacidad para dos plantas. Las bolsas agrícolas se encuentran distribuidas en dos filas horizontales.

3.1. Sistema de riego por goteo

El sistema de riego por goteo es un método de riego que tiene como principal característica el suministrar el agua al cultivo en forma controlada a través de goteros. Este tipo



Figura 3.1: Estructura metálica e invernadero terminado.

de riego permite un ahorro considerable de agua debido a que se aplica directamente a la base de la planta y la uniformidad del riego hace que ésta crezca de forma similar.

Al colocar este tipo de riego se tiene la ventaja de que el follaje no está en contacto con el agua de riego evitando la humedad en las hojas y con ello previene la generación de hongos.

Para implementar el sistema de riego por goteo se requiere de los siguientes materiales: tubing hidropónico, piquetas o estacas, goteros autocompensados, mini válvulas para manguera, filtro de malla o anillos, tubo y accesorios de PVC. En la Figura 3.2 se muestran los componentes en el orden mencionado.

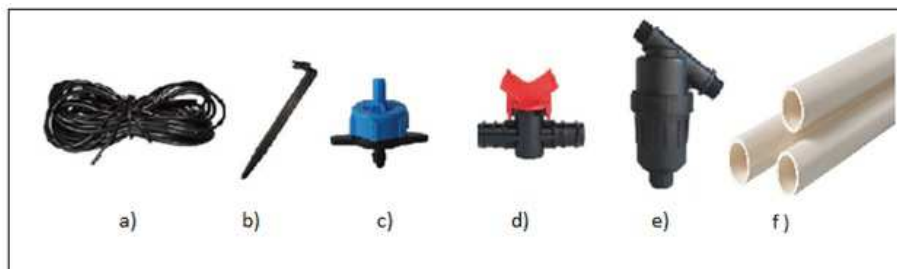


Figura 3.2: Componentes de un sistema de riego por goteo.

El sistema de riego implementado en el invernadero cuenta con 15 goteros, con una descarga de 4 litros por hora, y 60 piquetas, cada gotero tiene una distribución de cuatro salidas, donde se colocan las piquetas. De esta manera cada piqueta puede drenar 1L/hora.

La presión necesaria para inyectar 30,4 ml/piqueta /min es de alrededor de 1 kPa. Cada bolsa agrícola se riega con 60,8 ml/min debido a que se tienen dos piquetas por bolsa agrícola, Figura 3.3.



Figura 3.3: Bolsa agrícola con 2 piquetas y gotero con 4 líneas de distribución.

3.2. Número, tiempo y presión de cada riego

Dependiendo la etapa vegetativa en la que se encuentre la planta se requiere de un abastecimiento de agua diferente. Por ejemplo, para el tomate en su etapa vegetativa, se requieren de 350 ml a 400 ml por día. Esto implica un cálculo para determinar el tiempo que se debe activar la bomba y con ello regar la cantidad indicada.

Si se elige un caudal Q por día de 400 ml, se obtiene:

$$\text{Tiempo de riego} = \frac{400 \text{ [ml]}}{1000 \text{ [} \frac{\text{ml}}{\text{h}} \text{]}} = 0,4 \text{ [h]}$$

$$\text{Tiempo de riego} = (0,4)(60) \text{ [min]} = 24 \text{ [min]}$$

Es importante señalar que en los cultivos hidropónicos no se realiza un riego al día, sino una distribución de riegos de acuerdo con los tiempos de alimentación de la planta y garantizando un mínimo de lixiviado. En este sentido, y con la asesoría de un ingeniero agrónomo, se establecieron riegos cada dos horas iniciando a las 08:00 horas y terminando a las 18:00 horas.

Dando un total de riegos al día de:

$$\text{Riegos por día} = ((\text{Rango de tiempo})/(\text{Tiempos muertos}))+1$$

$$\text{Riegos por día} = ((18:00-8:00)/2)+1$$

$$\text{Riegos por día} = (10)/(2)+1 = 6 \text{ [riegos]}$$

De acuerdo a los cálculos se tienen que distribuir en 24 minutos los 6 riegos que requiere el cultivo, dando como resultado 4 minutos por riego.

Para garantizar que cada gotero tenga un flujo de líquido se requiere establecer una presión mínima de 1 kPa y no mayor a 1,5 kPa. En este intervalo de presión las membranas internas de cada gotero permiten el paso de líquido.

Para establecer esta presión, se diseñó una distribución hidráulica con una derivación de recirculación al tanque. En específico, se tienen dos derivaciones: una para el riego de agua simple y la otra para el riego de la solución nutritiva. En la Figura 3.4 se muestra con flechas (color rosa), el sentido del caudal, nodo hidráulico (deriva) y válvula de regulación de presión. La válvula tiene la función de obstruir o permitir el paso del líquido hacia el tanque, dando como consecuencia un aumento y/o disminución de presión en la línea principal de riego. Se observa que los caudales de ambos tanques inciden en un mismo punto para dirigirse a la línea de riego.



Figura 3.4: Distribución hidráulica. El tanque del lado izquierdo de la figura contiene agua simple, el tanque del lado derecho, solución nutritiva.

3.3. Sistema de almacenamiento

Para este sistema se tienen cuatro recipientes almacenadores de líquido:

- Tinaco principal de abastecimiento de agua al invernadero, con capacidad de 800 litros.
- Contenedor de agua acidulada con capacidad de 200 litros, en éste se almacena el agua para riego y su pH se debe mantener en un rango de 5,0 a 5,5.
- Contenedor de solución nutritiva con capacidad de 60 litros, en éste se almacena y prepara la solución nutritiva aplicada al cultivo.
- Contenedor posterior con capacidad de 60 litros, almacena el lixiviado del cultivo.

Se tienen colocadas tres bombas de $\frac{1}{2}$ caballo de fuerza [HP] caballo de fuerza con entrada de $1 \frac{1}{4}$ plg y salida de $1 \frac{1}{2}$ plg con un gasto de 30 l/min, cada bomba tiene destinada una función para mantener el desarrollo del cultivo en condiciones apropiadas.

- Bomba uno, destinada para proporcionar el riego de agua acidulada.
- Bomba dos, destinada para proporcionar el riego de la solución nutritiva.
- Bomba tres, esta bomba es la encargada realizar la recirculación del lixiviado al contenedor de la solución nutritiva, a través de la lámpara de desinfección.

Para verificar que la presión del agua sea la indicada se utiliza un manómetro, éste permite verificar que la presión con la cual se suministra el agua a los goteros es constante, ya que una variación de presión puede alterar la cantidad de agua suministrada al cultivo.

Teniendo implementado el sistema de riego, se debe continuar con la programación de la automatización, para ello, se realizó el diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.5.

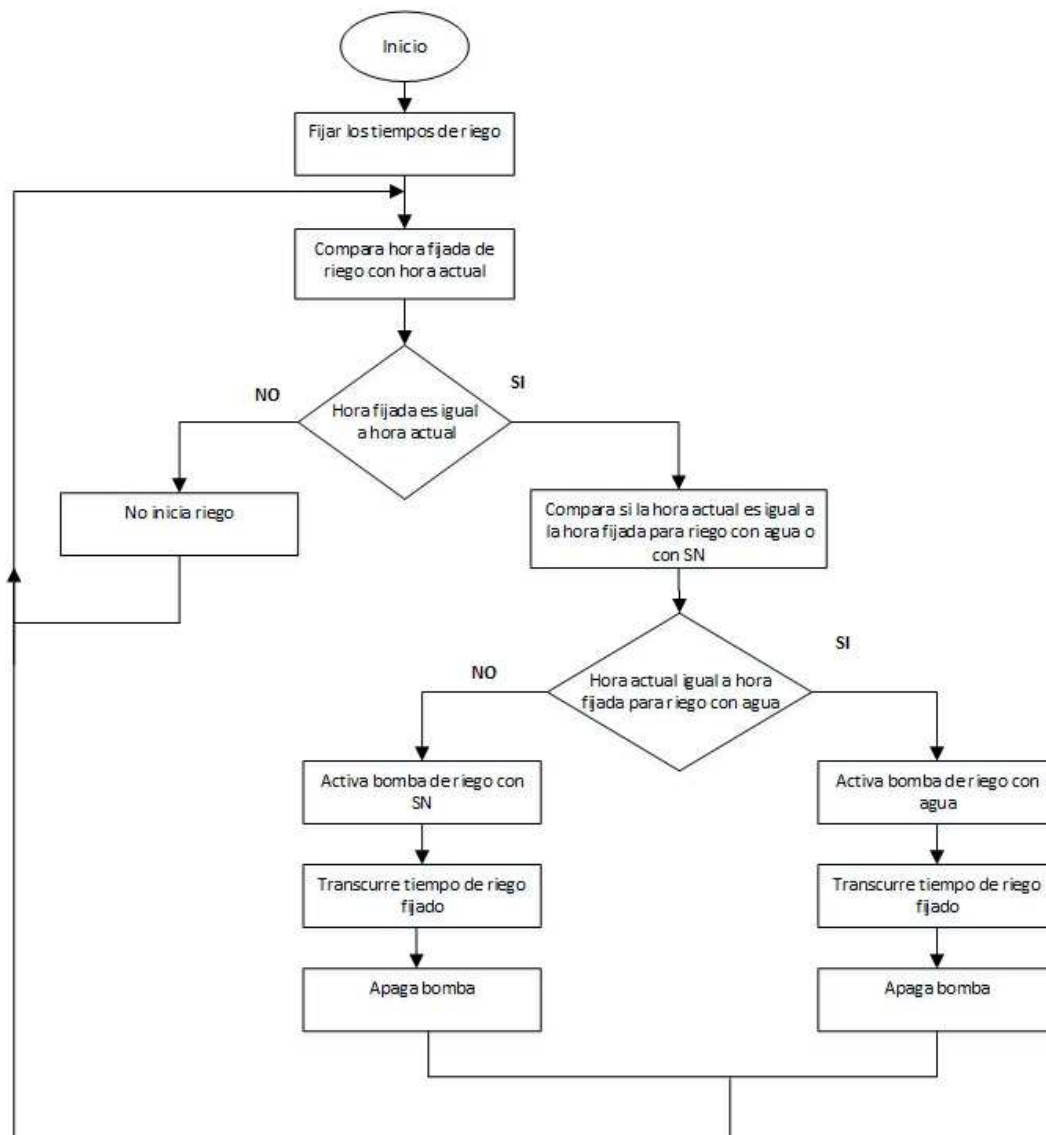


Figura 3.5: Diagrama de flujo para la programación de la automatización del riego.

3.4. Recirculación

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, el lixiviado puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando un deterioro y un riesgo potencial a la salud humana, y de los demás organismos vivos. Lo anterior sólo aplica para el caso de residuos industriales. En este caso, el lixiviado del invernadero sólo está constituido por agua y nutrientes que puede ser aprovechado para el riego de los cultivos.

Para evitar que el lixiviado del invernadero se deseché directamente a la tierra se implementó un sistema de riego de tipo lazo cerrado, es decir, la recolección del lixiviado de todas las bolsas agrícolas se almacena en un contenedor, que se encuentra en la parte trasera del invernadero en el cual desemboca el lixiviado de todas las plantas.

Las bolsas agrícolas están colocadas en dos filas sobre un tubo de PVC cortado horizontalmente y cubierto con plástico negro. Este plástico evita que el lixiviado escurra hacia los lados y lo guía al contenedor de recolección. La inclinación de 5° a la cual se encuentra el invernadero facilita la recolección del lixiviado.

El lixiviado que se recolecta, es recirculado al contenedor de nutrientes, pero antes pasa por una lámpara de luz Ultra Violeta (UV) para esterilizarlo y eliminar los agentes patógenos que pudieran causar algún daño al cultivo. El tratamiento del agua con luz UV es efectivo contra virus, hongos y bacterias; su longitud de onda se encuentra entre 100 y 400 nm, considerando que el valor óptimo de longitud de onda como germicida fuerte es de 254 nm [Albán et al., 2010].

El sistema de recirculación implementado en el invernadero consta de una bomba y una lámpara UV, Figura 3.6, que enciende 5 segundos antes de que la bomba de recirculación se active, la lámpara UV previene que llegue al contenedor de la solución nutritiva agua contaminada que pudiera generar alguna enfermedad al cultivo.



Figura 3.6: Lámpara UV.

Algunas de las ventajas para utilizar una lámpara UV para la desinfección del agua son:

- La desinfección por UV no es un proceso químico y no produce ningún residuo que se pueda añadir al agua.
- La desinfección por UV es muy eficaz en la inactivación de microorganismos, incluidos patógenos resistentes al cloro como el *Cryptosporidium*¹
- Evita riesgos a las personas, ya que no realizan el manejo de sustancias para la desinfección del agua.
- Los costos operativos son bajos pues las lámparas UV tienen un tiempo de vida de un año.

3.5. Sistema eléctrico

En la Figura 3.7 se observa el tablero del sistema eléctrico que controla el funcionamiento del invernadero.

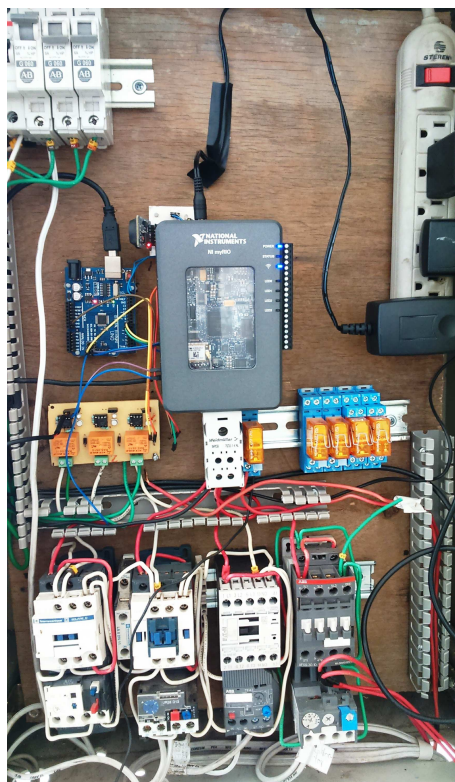


Figura 3.7: Tablero de control.

Cable

La alimentación del tablero es de tipo monofásico de 110 V a 60 Hz. El cable que alimenta al tablero es de calibre 14 (uso rudo) con un soporte de máximo de 20 Amperes.

¹Cryptosporidium es un parásito epicelular, monóxeno, con varias especies. Es un patógeno emergente e importante agente etiológico no viral de diarrea en humanos y animales a nivel mundial.

Este calibre se seleccionó de acuerdo a la demanda de corriente del sistema.

En Cuadro 3.1 se muestra la potencia de los dispositivos y actuadores utilizados en el invernadero. Conociendo los datos de potencia de los dispositivos y actuadores se calculo la corriente maxima consumida por cada uno con la Ec 3.1.

$$I_{max} = \frac{P[Watts]}{V} \quad (3.1)$$

El calibre del cable que se emplea para las conexiones del tablero eléctrico es de calibre 16.

Sistema	Cantidad	Potencia [Watts]
Bomba de agua	2	1080,0
Calefactor	1	1200,0
Lámpara UV	1	16,0
Lámpara UV	1	16,0
MyRio	1	14,0
Total		2310,0

Cuadro 3.1: Balance de potencia.

Contactor

Es un dispositivo diseñado para realizar funciones de conmutación repetida para la activación o desactivación de máquinas eléctricas de potencia, por medio de una señal de control eléctrica. Los contactores se clasifican en dos tipos: electromagnético y de estado sólido.

Los contactores utilizados en el tablero del control de invernadero son de tipo electromagnético, éstos operan bajo el principio de inducción de Faraday, ya que son accionados cuando se energiza la bobina que forma parte de un electroimán, Figura 3.8.

En el tablero se tienen colocados cuatro contactores electromagnéticos, cada uno destinado para activar la bomba correspondiente de riego y uno para la activación del calefactor.

Componente de protección bimetálico

Este elemento bimetálico es un dispositivo de seguridad para evitar un exceso en la corriente de un actuador. Este dispositivo se activa cuando las corrientes generadas en el tubo de cobre calientan la palanca bimetálica porque una corriente de sobrecarga produce el calor suficiente para curvar la armadura bimetálica y desplazar los contactos del circuito de carga normalmente cerrados. En la Figura 3.9 se muestra el modelo JR28 D13 con un rango de corriente de 6 A.



Figura 3.8: Contactor.



Figura 3.9: Relevador bimetalico.

Sistema de iluminación solar y batería

El sistema de iluminación solar consta de dos paneles fotovoltaicos, un controlador de carga solar para regular la carga de la batería y una batería de 12 Volts.

Se tienen colocados dos paneles solares fotovoltaicos en la parte frontal del invernadero a una altura de 2,20 metros. El principal objetivo es el aprovechamiento y producción de energía renovable, la energía generada se almacena en la batería y es utilizada para alimentar cuatro lámparas de led para proporcionar la iluminación al invernadero durante la noche.

Otro de los objetivos del sistema-celda batería es que en caso de una interrupción en la energía eléctrica, la tarjeta de adquisición de datos *NI MyRio*² sea alimentada por la energía almacenada en la batería para evitar la interrupción de la en adquisición de las variables climáticas.

²NI myRIO está equipado con un FPGA Xilinx Zynq integrado y procesador ARM Cortex-A9 para programar E/S personalizadas e implementar procesamiento en tiempo real en un dispositivo.



Figura 3.10: Panel solar, controlador de carga y batería de 12 Volts .

3.5.1. Costos de implementación

En el Cuadro 3.2 se enlistan los costos de los materiales que se requieren para implementar un invernadero hidropónico con las mismas características que el descrito en este trabajo.

Descripción	Monto
Estructura tubular de 1 1/2 plg, cubierta de malla y plástico, dimensiones 3 x 6 metros y montaje	\$ 20,000.00
Charolas para germinación, 30 bolsas agrícolas de plástico con sustrato (tezontle, agrilita y PeatMoss)	\$ 3,000.00
Sistema hidráulico para riego por goteo (PVC, bombas, filtros, 3 contenedores, 1 tinaco, 3 bombas de $\frac{1}{2}$ Hp) Riego por goteo (60 piquetas, turbinas, manguera, 15 goteros autocompensados)	\$ 8,000.00
Semillas, rafia, anillos sujetadores	\$ 1,000.00
Tablero de control y sistema eléctrico	\$ 10,000.00
Fertilizantes solubles en agua marca Haifa y SQM	\$ 5,000.00
Instrumentos de medición (pH, CE, temperatura y humedad relativa)	\$ 4,000.00
Ventilador	\$ 500,00
Calefactor.	\$ 800,00
Total	\$ 52,300.00

Cuadro 3.2: Costo de implementación e instrumentación del invernadero hidropónico.

Capítulo 4

Instrumentación

El objetivo básico de la instrumentación es la adquisición de información del mundo físico con la mayor exactitud posible. En cualquier proceso o sistema es indispensable realizar mediciones para analizar el comportamiento del sistema mismo y de las variables que intervienen en su evolución. Los objetivos para realizar una medición pueden ser por vigilancia o análisis de valores, dependiendo el caso para el cual aplique el sistema de medida [Solé, 2012].

Una cadena de medición lo integran los siguientes elementos: transductor, acondicionamiento, procesamiento y presentación de la señal de salida, Figura 4.1.

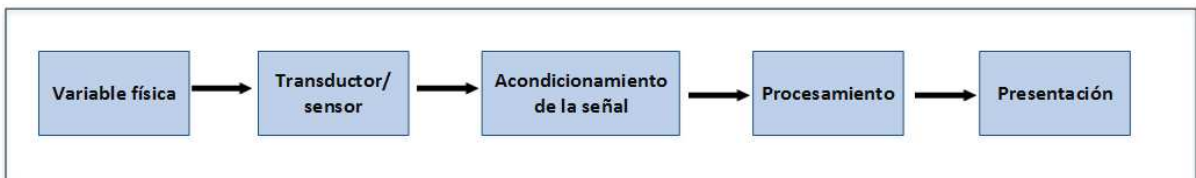


Figura 4.1: Diagrama de bloques de un sistema de medición.

Transductor

Es todo dispositivo que transforma una magnitud física en una señal eléctrica, con las siguientes ventajas:

- Aunque las señales provenientes de los transductores puedan ser muy pequeñas, hoy en día se cuenta con dispositivos de amplificación del orden de 10^6 .
- Los nuevos transductores inteligentes son digitales, de tal manera que bajo un protocolo de comunicación generan información no sólo de la variable a medir, sino también valores de error y tiempo de vida útil de dicho transductor.
- En el mercado se cuenta con transductores en los que ya viene integrada la etapa de acondicionamiento y amplificación.

Sensor

El sensor es el elemento que se encuentra en contacto directo con la magnitud a medir, al interactuar con ésta, aquél sufre cambios en sus propiedades y tienen una señal de salida eléctrica transducible que es función de la variable a medir [Areny, 2004]. Un sensor debe perturbar lo menos posible la variable de interés para no introducir errores en la medición.

Acondicionamiento

Los acondicionadores son los elementos del sistema de medida que a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, ofrecen una señal apta para ser presentada o procesada por un equipo o instrumento convencional.

Procesamiento

Para el procesamiento de señales se puede utilizar microprocesadores o procesadores dependiendo de la naturaleza de la señal. El procesamiento de los datos permite convertir los valores de los datos adquiridos a valores que puedan ser comprendidos para su análisis o ejecución de alguna acción mecánica.

Presentación

Para la presentación de los resultados se usan diferentes indicadores analógicos o digitales. Para facilitar la lectura se prefiere usar indicadores digitales. El registro de los resultados también puede ser almacenado en medios electrónicos como memorias (SD), discos de estado sólido, siempre y cuando la información de entrada esté en forma de señal eléctrica.

4.1. Adquisición de temperatura y humedad

Para la adquisición de las variables de temperatura y humedad relativa se utiliza el sensor HMZ-433A1, Figura 4.2, el cual de acuerdo a su hoja de especificaciones tiene las siguientes características de .

- Voltaje de alimentación 5 VDC .
- Salida lineal de voltaje para la lectura de humedad de 0 a 3,3 volts.
- Tiene un termistor integrado del tipo NTC (*Negative Temperature*) para medir la temperatura.

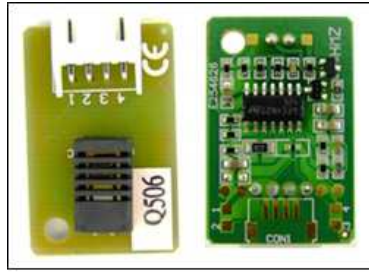


Figura 4.2: Sensor de temperatura y humedad relativa HMZ-433A1.

- Bajo consumo de corriente, 5 mA máximo.
- Señal de salida analógica.

Intervalo de operación:

- Temperatura: -20 a 60 °C
- Humedad relativa: 20 % a 95 %

El sensor HMZ-433A1 consta de un termistor tipo NTC, su coeficiente de temperatura es negativo por lo cual se denomina termistor NTC. La Ec. (4.1) describe el comportamiento del sensor:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R_T + C[\ln(R_T)]^3, \quad (4.1)$$

donde:

T = Temperatura [K]

R_T = Resistencia del termistor [$k\Omega$]

A, B y C = Constante de la curva de aproximación del sensor.

La ubicación correcta de los sensores, permite el reflejo más cercano de las condiciones ambientales del sistema. En este sentido, se optó por colocarlos en diferentes alturas para abarcar las diferentes etapas de crecimiento de la planta.

La posición exacta de los sensores, es en medio de la primer fila, Figura 4.3, en las siguientes posiciones:

- Sensor A en el interior del invernadero a 2,20 m de altura.
- Sensor B en el interior del invernadero a 1,15 m de altura.
- Sensor C en el nivel de la planta.

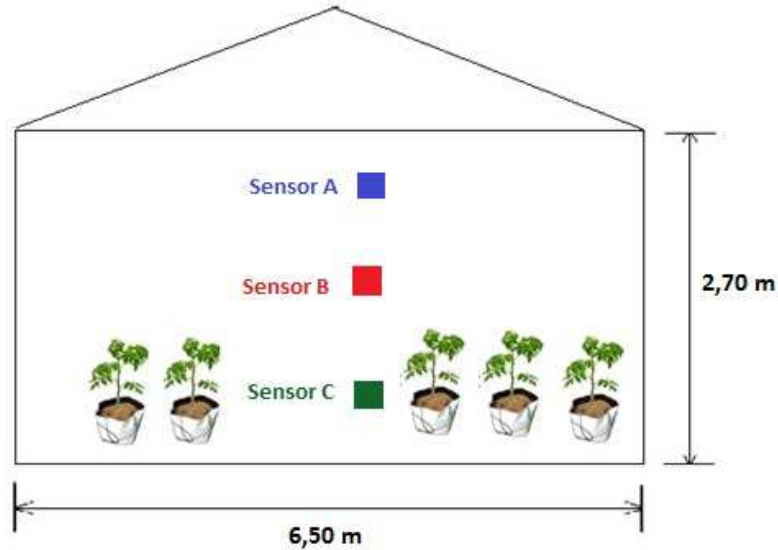


Figura 4.3: Ubicación de los sensores de temperatura y humedad relativa para el cultivo de tomate rojo.

El colocar los sensores a diferentes alturas, permite registrar las variaciones de temperatura y humedad relativa, que puede presentar la planta de tomate en las diferentes alturas que vaya alcanzando, de acuerdo a su crecimiento.

Para el cultivo de la fresa, los sensores de temperatura y humedad relativa se colocarán de forma horizontal dentro del invernadero, en la primer fila con una separación de 1,5 metros entre cada uno y a una altura de 25 cm con respecto al suelo. Las posiciones se muestran en la Figura 4.4.

Además, se instrumentó con el sensor digital de temperatura y humedad relativa DTH11, Figura 4.5, este sensor se ubicó dentro del invernadero, en la parte superior de una bolsa agrícola de la fila dos, a una altura de 25 cm con respecto del suelo.

Características generales del sensor DTH11 de acuerdo a su hoja de especificaciones:

- Alimentación: $\pm 3,3$ a 5 VDC
- Señal de salida: digital.
- Rango de medida temperatura: 0 a 50 °C
- Precisión temperatura: 2 °C
- Resolución temperatura: 0,1°C
- Rango de medida humedad: 20 % a 90 %
- Precisión humedad: ± 4 %

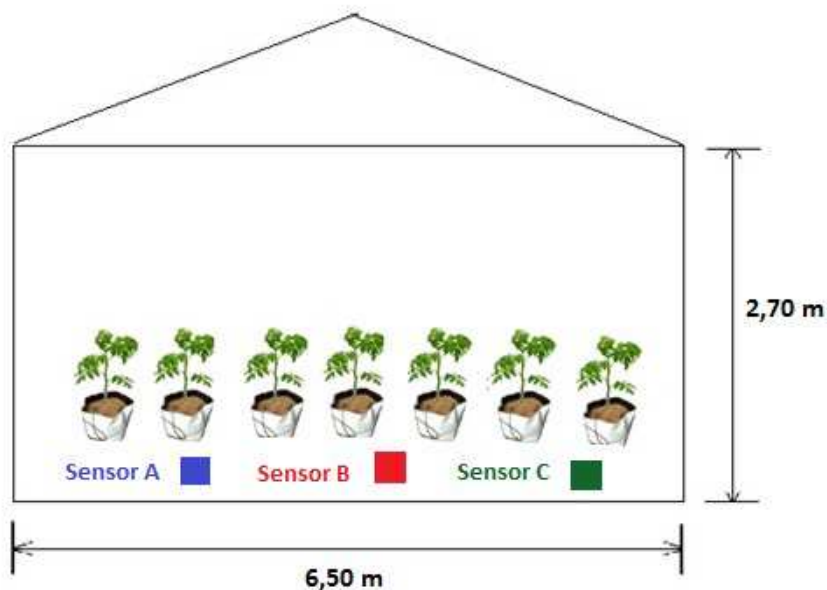


Figura 4.4: Ubicación de los sensores de temperatura y humedad relativa para el cultivo de fresa.

- Resolución humedad: 1 %
- Tiempo de respuesta: 1 segundo.



Figura 4.5: Sensor de temperatura y humedad DTH11.

Medición de temperatura en la raíz de la planta

En la raíz de la planta, además de llevarse el proceso de absorción del agua y nutrientes, también ocurre la síntesis de hormonas y otras sustancias indispensables para el crecimiento de la planta y desarrollo de los frutos.

La temperatura de la planta en la raíz influye en el desarrollo y crecimiento de la planta, el Cuadro 4.1 [Fischer et al., 1997] muestra el intervalo de temperatura óptima para la raíz del cultivo del tomate rojo y fresa.

La temperatura de la zona edáfica¹, además de la temperatura y la humedad relativa de

¹Relativo al suelo, especialmente en lo que respecta a la vida de las plantas.

Cultivo	Intervalo de temperatura [°C]
Tomate rojo	18 a 24
Fresa	26 a 30

Cuadro 4.1: Temperatura optima de la zona radical para el tomate rojo y fresa.

la parte aérea, es muy importante para el desarrollo del tallo y hojas; si la temperatura en la raíz excede los rangos determinados para la planta, ésta puede morir.

Debido a la importancia que tiene el efecto de temperatura en la raíz, se realizó la medición de esta variable, para tener un análisis completo de los efectos climáticos, no sólo en la parte aérea sino también en la raíz. Con estos factores se determina cómo será el crecimiento y desarrollo de la planta, lo cual permite predecir su desarrollo.

Para obtener los valores de temperatura en la raíz de la planta se usa la sonda de temperatura de acero inoxidable TMP-BTA de la marca Vernier, Figura 4.6, con las siguientes características:

- Tipo: NTC termistor.
- Voltaje de alimentación: 5 VDC.
- Intervalo de temperatura: 40 a 135 °C.



Figura 4.6: Sonda de temperatura de acero inoxidable TMP-BTA la marca Vernier.

La Ec.(4.2) describe el comportamiento de la sonda de temperatura TMP-BTA.

$$T = [K_0 + K_1(\ln 1000R) + K_2(\ln 1000R)^3] - 1 - 273,15, \quad (4.2)$$

donde:

T = Temperatura [°C]

R = Resistencia del termistor [kΩ]

$K_0, K_1,$ y K_2 = Constante de la curva de aproximación del sensor.

4.1.1. Medición de potencial de hidrógeno (pH)

La medición de pH se realiza de forma calendarizada en el agua destinada para el riego, solución nutritiva y en el lixiviado, para verificar que los valores de dicha variable se mantengan en los límites deseados.

Para la medición de esta variable se utilizó el sensor de pH de la marca Vernier, este sensor produce un voltaje de 1,75 volts para un pH de 7. El voltaje aumenta 0,25 volts para cada unidad de pH que disminuye y disminuye 0,25 volts por cada unidad de pH que aumente.



Figura 4.7: Sensor de pH marca Vernier.

De acuerdo a la hoja de especificaciones del sensor, la curva de calibración dada por el sensor se muestra en la Figura 4.8 y la Ec.(4.3) que describe su comportamiento.

$$pH = a(V_{out}) + b, \quad (4.3)$$

donde:

V_{out} = Voltaje de salida del sensor.

Los coeficientes de calibración dados por la hoja de especificaciones son:

$a = -4,04$ y $b = 13,68$.

La adquisición de los valores de acidez/alcalinidad se realiza directamente en el agua de riego y es una medición indispensable, ya que no se deben sobrepasar los valores que se encuentran en el intervalo de 5,5 a 6,0. Si el nivel de pH se encuentra por arriba de los valores mencionados se aplica ácido fosfórico al agua de riego, para garantizar que al preparar la solución nutritiva no se sobrepase un pH de 6,5, ya que se puede dañar al cultivo.

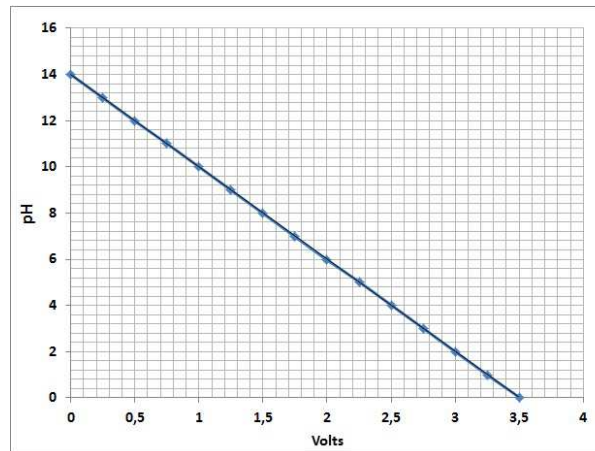


Figura 4.8: Curva de calibración del sensor de pH.

4.1.2. Medición de conductividad eléctrica (CE)

La adquisición de los valores de conductividad eléctrica se realiza directamente en el agua de riego, en la solución nutritiva y en el lixiviado. Es importante conocer el comportamiento de esta variable, para prevenir daños o la falta de nutrientes en los cultivos.

La medición de conductividad eléctrica en el lixiviado ayuda a detectar cuando el sustrato comienza a salinizarse. Además ayuda a determinar si la planta está absorbiendo los nutrientes aplicados o no.

Algunas de las medidas preventivas, al detectar un nivel alto de conductividad eléctrica en el sustrato, es suspender el riego de la solución nutritiva y realizar riegos con agua acidulada hasta, que el nivel de conductividad eléctrica se reestablezca dentro del intervalo establecido para el cultivo de tomate rojo y fresa.

Los valores de conductividad eléctrica y los de pH se despliegan en una pantalla de cristal líquido para ser observados y detectar cualquier cambio en el pH y CE del agua de riego, solución nutritiva y lixiviado, Figura 4.9.

4.2. Automatización de temperatura de un invernadero

La automatización ambiental de un invernadero se considera desde el diseño de la estructura, la ubicación y la orientación de ésta debe permitir aprovechar las condiciones climáticas naturales.



Figura 4.9: Despliegue de valores de pH y conductividad eléctrica.

Control encendido-apagado

En este tipo de controlador sólo proporciona dos posiciones: encendido y apagado, por lo tanto el actuador tiene dos posiciones fijas [Ogata, 2003].

La Figura 4.10 muestra la relación entre la salida de control, $U(t)$, la señal de error, $e(t)$. La Ec. (4.4) define la relación matemática entre ambas señales.

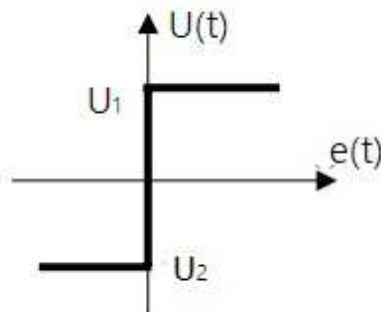


Figura 4.10: Control encendido-apagado.

$$U(t) = \begin{cases} U_1, & \text{para } e(t) \geq 0, \\ U_2, & \text{para } e(t) < 0, \end{cases} \quad (4.4)$$

Sistemas de control en lazo abierto

Son sistemas en los cuales la señal de salida no afecta la acción de control, debido a que no se mide y no es retroalimentada aquélla, para ser comparada con la entrada de referencia. Por lo tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija. En la práctica los sistemas en lazo abierto sólo se usan si se conoce la

relación entre la entrada y la salida y sin perturbaciones internas o externas [Ogata, 1998].

Sistemas de control en lazo cerrado

En un sistema de control en lazo cerrado o control retroalimentado, se suministra al controlador la señal de error, que es la diferencia entre la señal de referencia y la señal medida, a fin de reducir el error y llevar la señal de salida del sistema a un valor deseado [Ogata, 1998].

La Figura 4.11 muestra el lazo de control utilizado en el invernadero hidropónico.

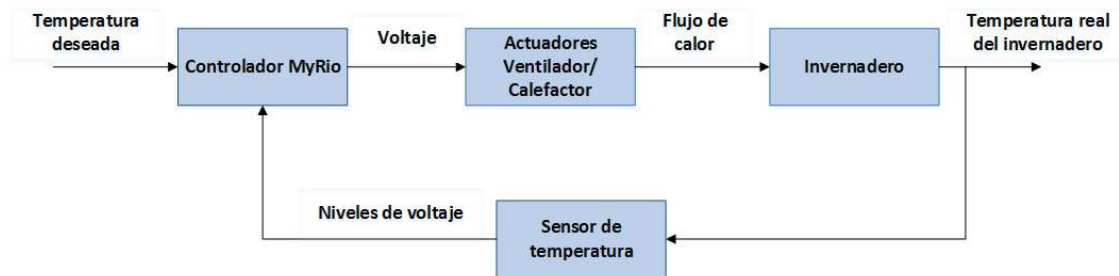


Figura 4.11: Lazo de control.

Controlador

Es el elemento que examina la medición realizada, hace la comparación con el valor deseado y determina la acción programada a ejecutar.

Un controlador automático compara el valor real de la señal de salida de una planta con la entrada de referencia, obtiene el error y produce una señal de control que reducirá el error a cero o a un valor muy pequeño.

El programa de automatización usado en el invernadero hidropónico, de acuerdo al diagrama de flujo mostrado en la Figura 4.12, está programado en la tarjeta de adquisición de datos MyRio, Figura 4.13, la cual tiene las siguientes características:

- FPGA Xilinx Zynq-7010 y procesador doble-core ARM
- 10 entradas analógicas
- 6 salidas analógicas
- 40 líneas de E/S digitales
- WiFi
- Programable por LabVIEW o lenguaje C.

Se eligió esta tarjeta de adquisición de datos porque no requiere estar conectada a una computadora para realizar el procesamiento de los datos, debido a que cuenta con un procesador doble-core ARM.

Además, esta tarjeta cuenta con suficientes entradas analógicas y digitales para realizar la adquisición de los datos de: temperatura ambiente, humedad relativa, temperatura de la raíz de la planta, pH y conductividad eléctrica, y el número de salidas suficientes para activar los relevadores para las tres bombas de riego, el calefactor, ventilador y lámpara UV.

Actuador

El actuador es el dispositivo que lleva a cabo las acciones ordenadas por el controlador. La función de los actuadores es realizar una acción mecánica en respuesta de una señal de entrada, en el caso de los actuadores eléctricos, aquella es eléctrica, pero no obstante, puede ser neumática, hidráulica, mecánica o termica.

Control de ventilación

El invernadero tiene ventilación natural a través de las ventanas laterales que están cubiertas por malla antiáfidos, para proteger al cultivos de plagas externas pero permiten la circulación de aire. Estas ventanas ayudan a disminuir la temperatura interna durante las estaciones de primavera y verano.

En la Ciudad de México las temperaturas llegan a sobrepasar los 30 °C por lo tanto, además de la ventilación natural, es indispensable colocar un sistema de ventilación controlado para disminuir las altas temperaturas.

Para el invernadero hidropónico se eligió un control encendido-apagado para encender o apagar un ventilador, Figura 4.14. De acuerdo al cultivo que se tenga en el invernadero se fija una temperatura óptima, cuando la temperatura exceda el nivel de temperatura ideal, el ventilador se enciende y éste se apaga cuando la temperatura disminuya al nivel más bajo fijado para el cultivo.

Para tener una mayor ventilación durante primavera y verano las cortinas laterales deben permanecer abiertas para una mayor circulación de aire dentro del invernadero.



Figura 4.14: Ventilador de 125 Watts.

Para la selección del ventilador se debe considerar el area que se desea ventilar, el área del invernadero es de 12 m^2 y el ventilador colocado cubre esta área, además, las ventanas laterales permanecen abiertas para aumentar la circulación del aire. Por el diseño del ventilador se puede ajustar la dirección vertical 120° y se pueden seleccionar tres velocidades.

Control de calefacción

Durante el invierno, el cultivo se debe proteger de temperaturas bajas que pudieran dañarlo, por ello, además, de que las ventanas laterales deben permanecer cubiertas, es necesario colocar un sistema de calefacción.

Existen diferentes tipos de calefacción que se usan para mantener el interior de los invernaderos en una temperatura apropiada para evitar daños en el cultivo, entre las más comunes se encuentran la eléctrica, de gas y tuberías de agua caliente.

De acuerdo a las dimensiones del invernadero, se colocó un calefactor eléctrico, Figura 4.15, regulado por un control encendido-apagado retroalimentado por la señal de un sensor de temperatura que adquiere la temperatura cada diez minutos.

Se fijó una temperatura mínima para que cada vez que se alcanza ésta, el calefactor se encienda, y una temperatura máxima para que cada vez que la temperatura aumentara hasta este nivel el calefactor se apague.



Figura 4.15: Calefactor.

Uno de los parámetros que se deben de considerar para la selección del calefactor, es el area que se tiene que calentar. El calefactor seleccionado cubre un área de 5 m^2 . Su consumo máximo de 1200 Watts y realiza movimientos oscilatorios en 120° que permite la distribución de calor en un rango mas amplio a comparación de un calefactor fijo.

4.3. Programación gráfica

LabVIEW es un entorno de programación gráfico de National Instruments, especialmente diseñado para establecer una comunicación entre la PC y elementos externos

como: tarjetas de adquisición de datos, sensores y actuadores. Uno de los objetivos del diseño de la interface en LabVIEW es crear un ambiente atractivo y de fácil manejo para el usuario.

Para la supervisión, control y adquisición de datos del invernadero hidropónico se diseñó una interface en LabVIEW, mostrada en la Figura 4.16, desde la cual se puede controlar el sistema de riego del invernadero.

La forma de programar el riego para el usuario, es muy sencilla, sólo debe especificar los minutos y el horario en que debe iniciar.

Desde esta interface también se supervisa el encendido-apagado de las bombas de riego, calefactor, ventilador y lámpara UV. Visualiza la adquisición de los valores de temperatura ambiente, temperatura de la raíz de la planta, humedad relativa, pH y conductividad eléctrica. Y se almacenan los datos de los sensores en una tabla, para generar un historial de estos.

La interface tiene 6 pestañas en la parte superior, cada pestaña es un módulo de adquisición y visualización de datos que se interrelacionados entre sí.

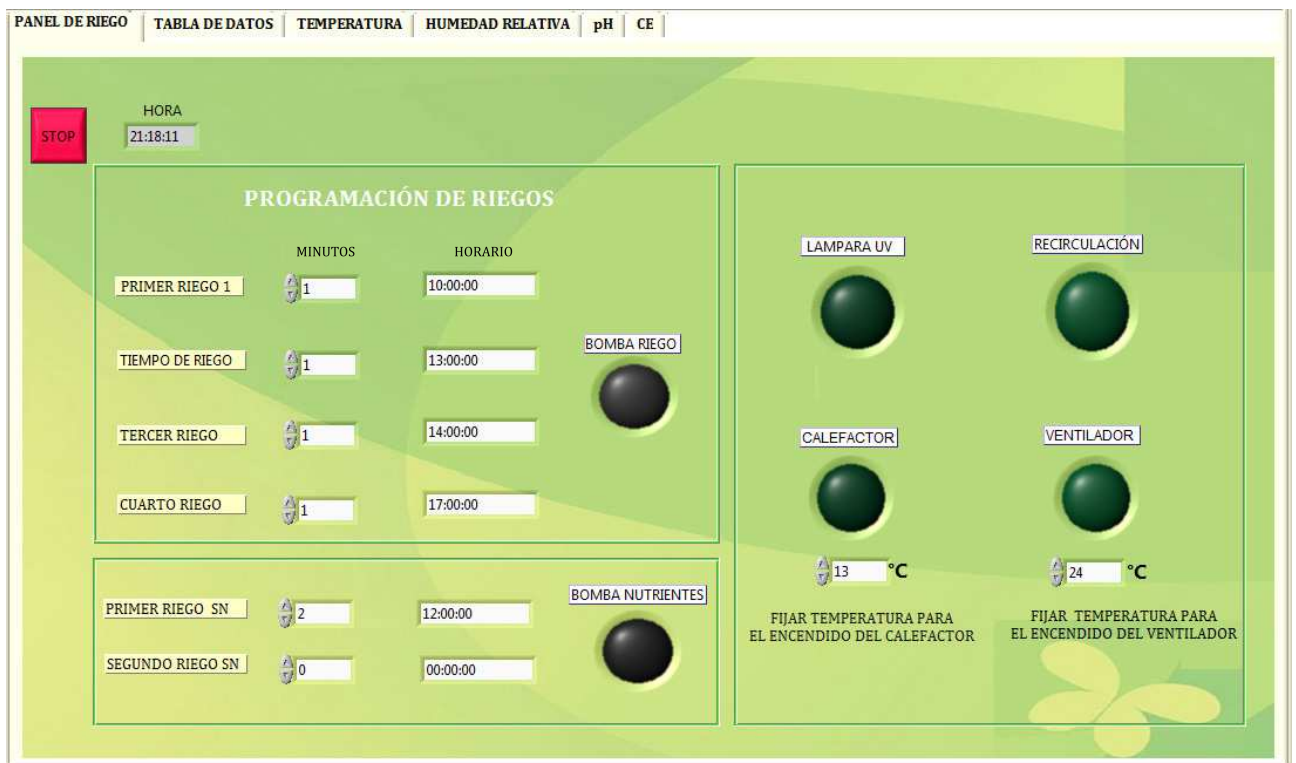


Figura 4.16: Interface para programación de riegos del encendido y apagado de actuadores.

Módulo de adquisición de temperatura ambiente y de la temperatura de la raíz de la planta

En este módulo, se realiza una de las tareas más importantes; es donde se adquiere los valores dados por los sensores de temperatura ambiente y temperatura de la raíz de planta. Los dos datos se adquiere cada 10 minutos y se visualizan en la pestaña del panel frontal llamada temperatura. Al conjuntar los valores de estas dos variables se

puede hacer un comparativo, entre el comportamiento de ambas, para su respectivo análisis.

En las Figuras 4.17 y 4.18 se muestran los diagramas de bloques que integran a este módulo.

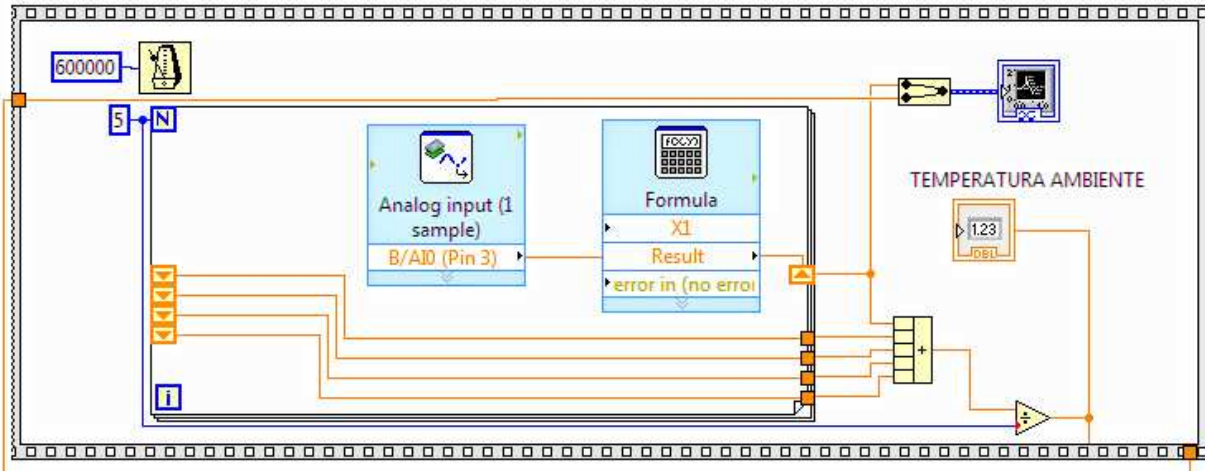


Figura 4.17: Diagrama de bloques de la adquisición de temperatura ambiente.

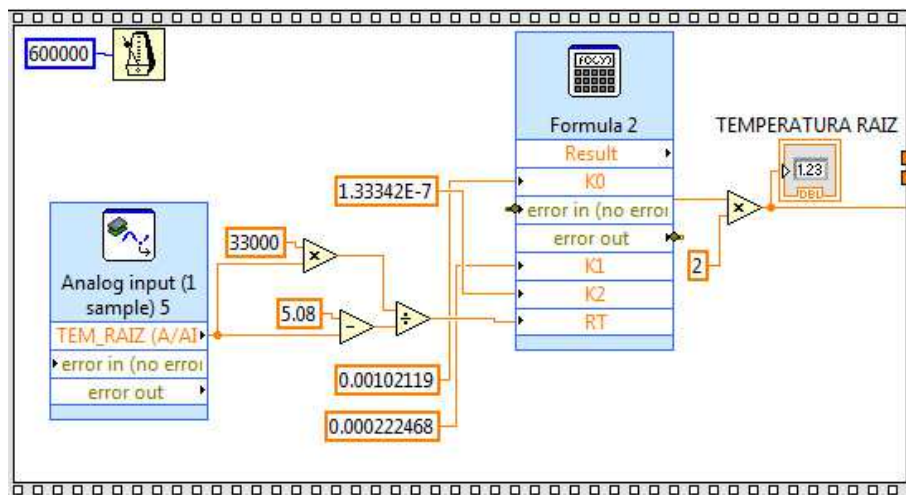


Figura 4.18: Diagrama de bloques de la adquisición de temperatura de la raíz.

Módulos de medición de humedad relativa, potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE)

Estos módulos tiene una distribución similar que el de adquisición de temperatura y humedad relativa, los datos adquiridos se pueden visualizar en una gráfica.

La adquisición de datos se realiza cada 10 minutos y se visualizan en la pestaña del panel frontal con el nombre correspondiente a cada variable.

En las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21 se muestran los diagramas de bloques que integran a cada módulo.

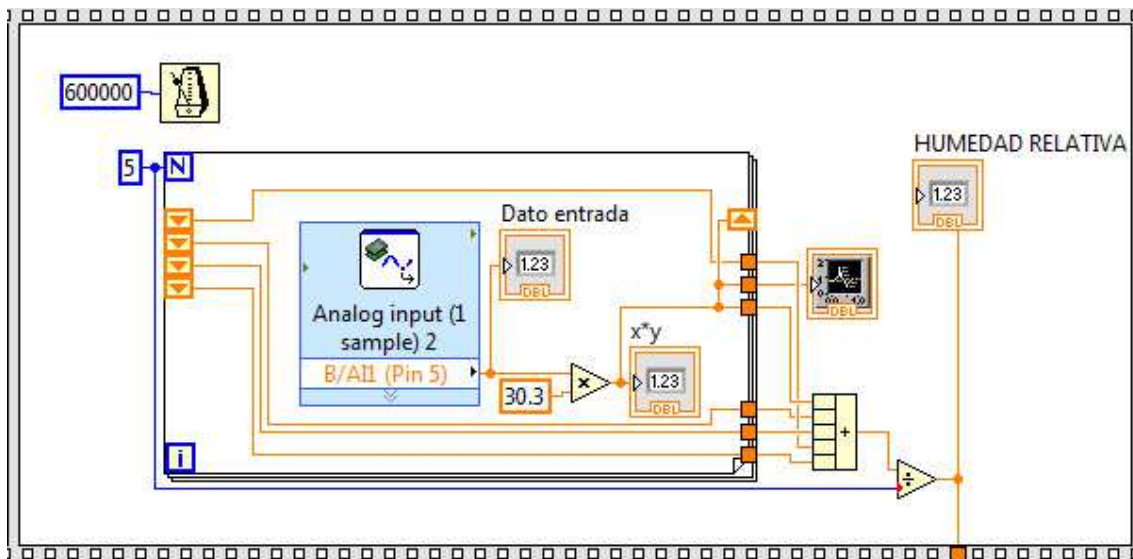


Figura 4.19: Diagrama de bloques de la adquisición de humedad relativa.

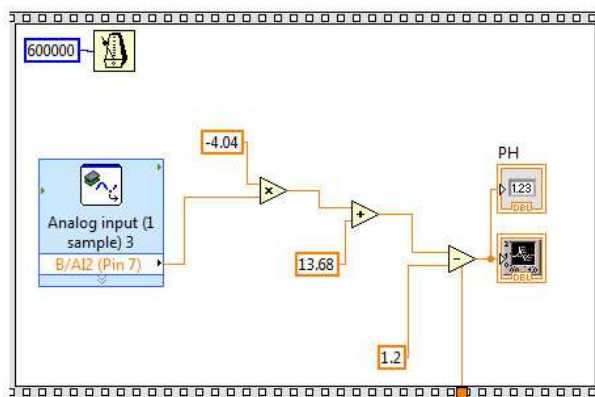


Figura 4.20: Diagrama de bloques de la adquisición de potencial de hidrógeno (pH).

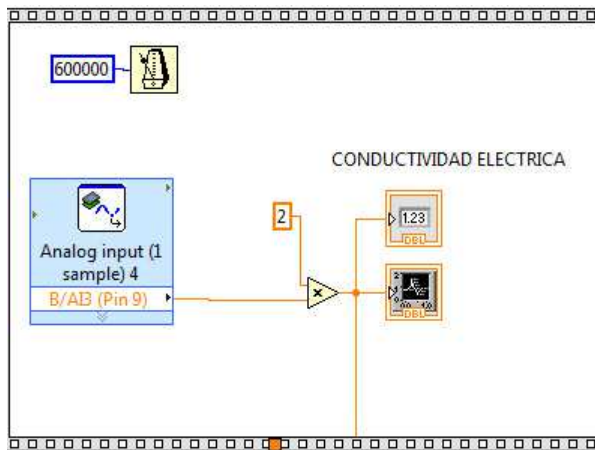


Figura 4.21: Diagrama de bloques de la adquisición de conductividad eléctrica (CE).

Módulo para el encendido o apagado del calefactor y ventilador

Este módulo se encarga de apagar-encender el ventilador o calefactor.

La programación a bloques hace una comparación entre la temperatura entregada por el sensor y la fijada por el usuario en la interface. Cuando se cumple la condición de igualdad entre ambas temperaturas se activa la salida de la tarjeta de adquisición de datos para encender o apagar el ventilador, de igual forma para el calefactor.

En la Figura 4.22 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a este módulo.

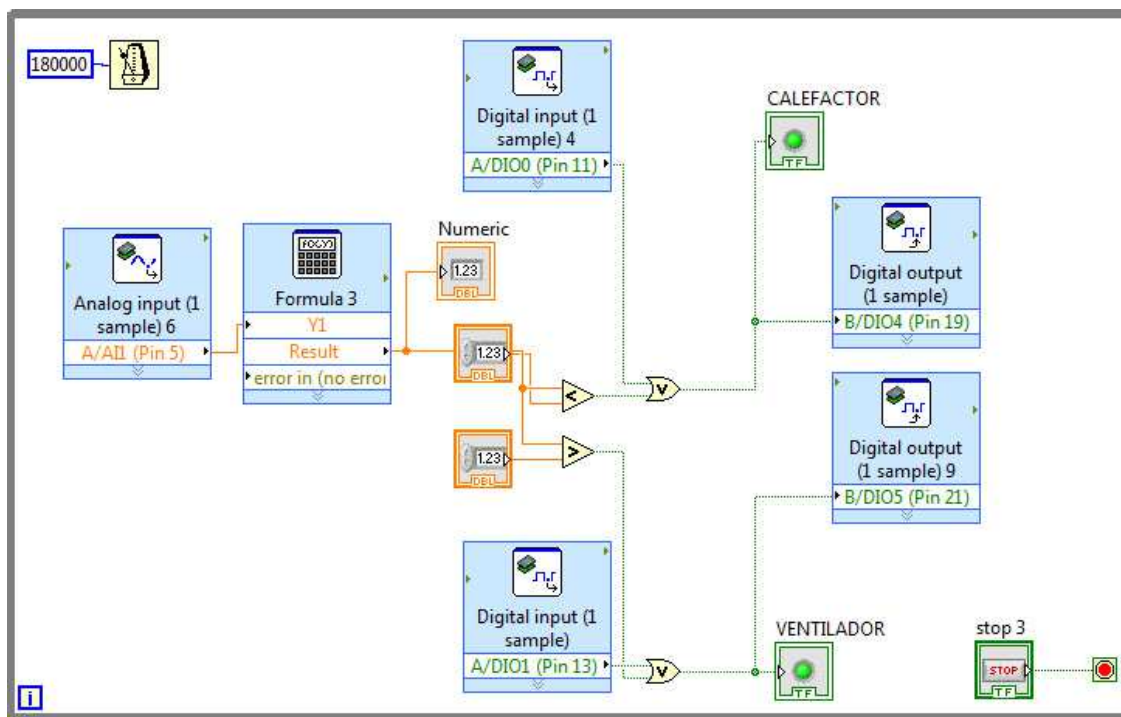


Figura 4.22: Diagrama de bloques para el encendido-apagado del calefactor o ventilador.

Módulo de control de riego

Este módulo controla el número y tiempo de riego, de cada día para el cultivo. Se puede programar cuatro o más riegos al día dependiendo de las necesidades hídricas de la planta, la etapa fenológica y el tipo de cultivo.

El cultivo de tomate y fresa tienen diferentes necesidades hídricas en cada una de sus etapas. El tomate siempre requiere mayor cantidad de agua por el tamaño de la planta, mientras que la fresa requiere alrededor de 4 riegos al día con una duración de 1 a 2 minutos.

En la Figura 4.23 se muestra el diagrama de bloques de este módulo.

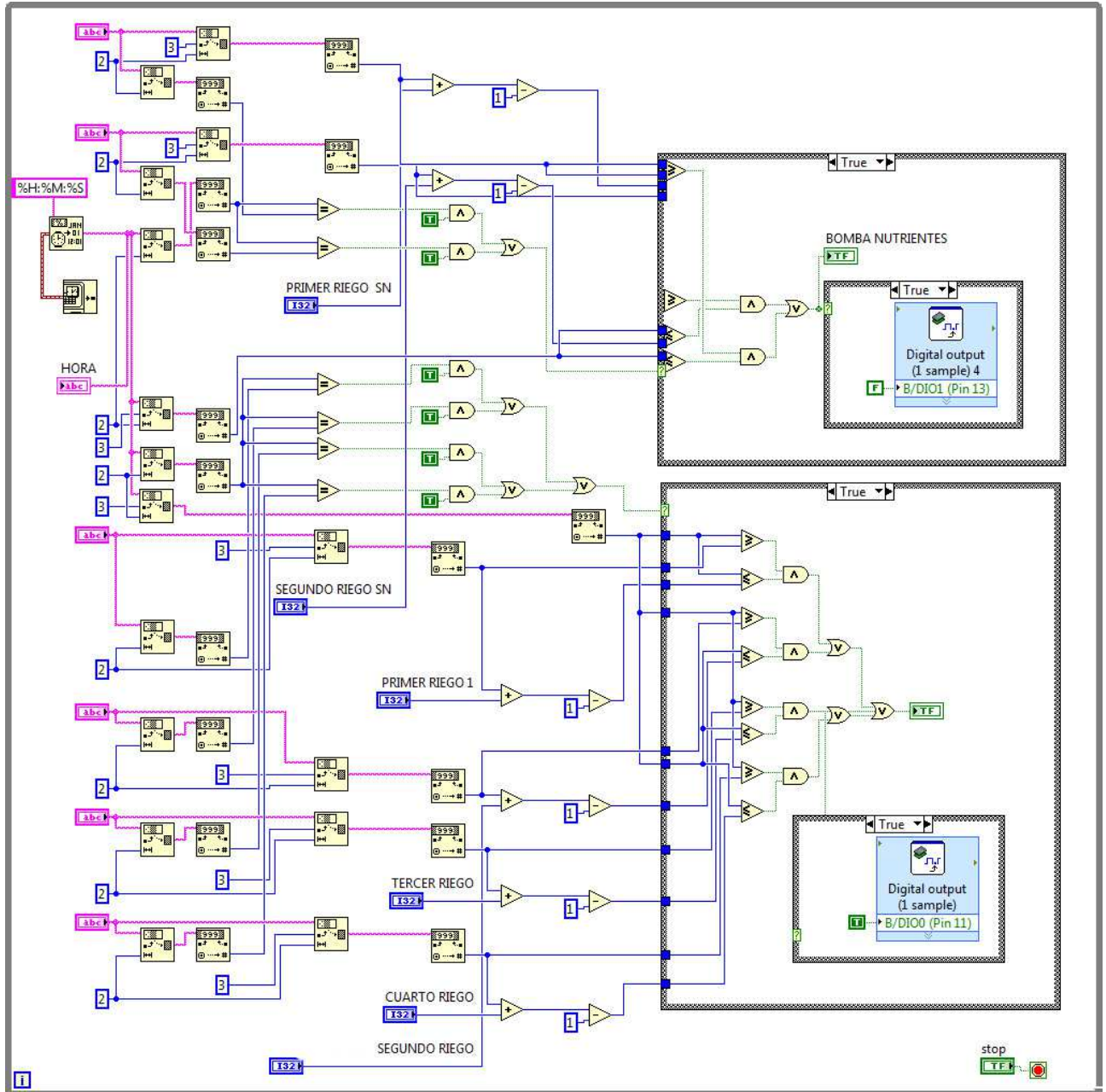


Figura 4.23: Diagrama de bloques del módulo de riego.

Capítulo 5

Resultados y análisis

En este capítulo se describen los resultados obtenidos, mostrando gráficas y tablas de los valores medidos de las variables climáticas, potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), temperatura en la raíz de la planta y las características de los frutos cosechados.

5.1. Riegos

La planta sólo absorbe la cantidad de agua que necesita para mantenerse hidratada, por lo tanto, el sustrato sólo debe tener la cantidad de agua requerida por la planta.

El sistema de riego por goteo está programado en determinados horarios. La precisión de los riegos depende del código para la programación de la tarjeta de adquisición de datos NI MyRio.

El objetivo de la automatización del riego es proporcionar a la planta la cantidad de agua necesaria, en las horas de mayor demanda hídrica, de acuerdo, al análisis de temperatura y a la etapa fenológica en que se encuentre el cultivo. Además, la implementación del sistema de riego por goteo permitió un aprovechamiento óptimo del agua de riego y solución nutritiva, debido a que se aplica el agua directo a la raíz de la planta.

En el Cuadro 5.1 se muestran los riegos realizados con agua y solución nutritiva (SN) para cada etapa fenológica, para el cultivo de tomate rojo y fresa.

5.2. Comparación entre sensores: calibrados y utilizados

Para verificar que las medidas de temperatura y humedad relativa obtenidas con el sensor HMZ-433A1 y el sensor DTH11 fueran correctas, se hizo una comparación entre las medidas de los sensores y las medidas obtenidas con un termohigrómetro digital,

Riegos en cada etapa fenológica		
Etapa	Tomate rojo	Fresa
Inicial	<ul style="list-style-type: none"> - 09:00 hrs, 1 minuto con agua - 11:00 hrs, 2 minutos con SN - 13:00 hrs, 1 minuto con agua - 15:00 hrs, 1 minuto con agua 	<ul style="list-style-type: none"> - 10:00 hrs, 1 minuto con agua - 12:00 hrs, 1 minutos con SN - 13:00 hrs, 1 minuto con agua - 15:00 hrs, 1 minuto con agua
Vegetativa	<ul style="list-style-type: none"> - 09:00 hrs, 1 minuto con agua - 11:00 hrs, 2 minutos con SN - 13:00 hrs, 1 minuto con agua - 15:00 hrs, 2 minutos con SN - 17:00 hrs, 1 minuto con agua 	<ul style="list-style-type: none"> - 10:00 hrs, 1 minuto con agua - 12:00 hrs, 1 minutos con SN - 13:00 hrs, 1 minuto con agua - 15:00 hrs, 1 minuto con agua - 16:00 hrs, 1 minuto con agua
Floración	<ul style="list-style-type: none"> - 09:00 hrs, 1 minuto con agua - 11:00 hrs, 2 minutos con SN - 13:00 hrs, 1 minuto con agua - 15:00 hrs, 2 minutos con SN - 17:00 hrs, 2 minuto con agua 	<ul style="list-style-type: none"> - 10:00 hrs, 1 minuto con agua - 12:00 hrs, 2 minutos con SN - 13:00 hrs, 1 minuto con agua - 14:00 hrs, 1 minuto con agua - 15:00 hrs, 1 minuto con agua - 16:00 hrs, 1 minuto con agua
Reproductiva	<ul style="list-style-type: none"> - 09:00 hrs, 2 minuto con agua - 11:00 hrs, 2 minutos con SN - 13:00 hrs, 3 minuto con agua - 15:00 hrs, 3 minutos con SN - 17:00 hrs, 2 minuto con agua 	<ul style="list-style-type: none"> - 10:00 hrs, 1 minuto con agua - 12:00 hrs, 2 minutos con SN - 13:00 hrs, 1 minuto con agua - 14:00 hrs, 1 minuto con agua - 15:00 hrs, 1 minuto con agua - 16:00 hrs, 1 minuto con agua

Cuadro 5.1: Riegos del cultivo de tomate rojo y fresa.

Figura 5.1, calibrado bajo la norma ISO/IEC 7025:2006, con una exactitud de $\pm 1,0$ °C y resolución de $\pm 0,01$ °C.



Figura 5.1: Termohigrómetro digital.

Se tomaron 10 mediciones cada tres minutos de temperatura y humedad relativa con el termohigrómetro y los sensores que se encuentran en el invernadero al mismo tiempo y bajo las mismas condiciones, los resultados se observan en el Cuadro 5.2

No.	Temperatura °C		Humedad relativa %	
	Termo-higrómetro	Sensor HMZ-433A1	Termo-higrómetro	Sensor HMZ-433A1
1	24,7	25,3	36	39
2	24,7	25,2	36	39
3	24,5	24,8	35	38
4	24,6	25,1	36	38
5	24,6	25,3	36	39
6	24,3	24,8	36	39
7	24,2	24,6	35	38
8	24,2	24,5	35	38
9	24,0	24,4	35	37
10	24,1	24,4	36	38

Cuadro 5.2: Registro de mediciones de temperatura y humedad relativa.

Los valores medidos por los sensores implementados en el invernadero no se encuentran muy separada de los medidos por el instrumento calibrado, en la medición de temperatura existe una diferencia de $0,7$ °C y en la medición de humedad relativa de 3 %, de acuerdo a estos valores, el sistema opera de forma correcta, porque la diferencia entre las medidas realizadas es menor a 1 °C.

Para la medición de pH y CE, se realizó una comparación entre las medidas dadas por el medidor de bolsillo HI 98130, Figura 5.2, con precisión en temperatura de $\pm 0,5$ °C, conductividad eléctrica ± 2 % y pH $\pm 0,01$ y los sensores de la marca Vernier implementados en el invernadero.

Se tomó una muestra del lixiviado diaria por 5 días de la planta piloto y se midió pH y CE, los valores adquiridos se encuentran en el Cuadro 5.3.



Figura 5.2: Medidor de bolsillo pH/CE/°C HI 98130, marca Hanna.

No.	pH		CE	
	HI 98130	Vernier pH	HI 98130	Vernier CE
1	7,35	7,25	1,97	2,11
2	7,33	7,13	2,21	2,56
3	7,80	7,77	2,37	2,60
4	7,51	7,23	2,72	2,68
5	7,79	7,52	2,26	2,55

Cuadro 5.3: Mediciones de ph y CE.

La mayor diferencia entre los valores medidos, de pH del medidor de bolsillo y el sensor implementado en el invernadero, fue de 0.28 y de CE de 0.35. La diferencia es muy pequeña, por lo cual, se consideraron medidas confiables, debido a que el medidor HI 98130 es uno de los instrumentos mas utilizados para realizar mediciones en campo por los agronomos.

5.3. Automatización de encendido y apagado de calefacción

El calefactor y ventilador se activan dependiendo de las temperaturas medidas. Las temperaturas se eligen de acuerdo al cultivo que se tenga; para el tomate y fresa, por ser similares los intervalos de temperatura óptimos, la programación es la misma.

El ventilador se enciende cuando se alcanza una temperatura de 25 °C y se apaga a los 24 °C. Además de tener un ventilador para disminuir la temperatura del invernadero durante primavera y verano, también se mantienen descubiertas las ventanas laterales sólo con la malla antiáfidos, para mejorar la circulación del aire. En invierno estas ventanas se mantienen cubiertas con plástico para disminuir las bajas temperatura en el interior, además, de usar calefacción para proteger al cultivo.

El calefactor se usa principalmente en invierno. La temperatura programada para que inicie su funcionamiento es a partir de los 13 °C y el apagado a los 18 °C, debido a que temperaturas por abajo de los 12 °C pueden dañar al cultivo, principalmente al tomate.

El encendido y apagado del calefactor también se puede realizar por horarios fijos, como en el caso del riego, debido a que se cuenta con un registro de temperaturas que se pueden usar para determinar en que periodos de tiempo la temperatura disminuye o aumenta. Aun teniendo esta opción de control se optó por usar la retroalimentación dada por el sensor de temperatura al sistema.

5.4. Tomate rojo

Entre los factores más importantes que intervienen en el cuidado de un cultivo están: el número de riegos, la cantidad de solución nutritiva, la temperatura y la humedad relativa. Estas variables extrínsecas influyen en gran medida sobre la cantidad y calidad del producto, por esta razón el interés en adquirir los valores durante un día completo. Además, por la ubicación de los sensores, en tres alturas diferentes, Figura 4.3 se puede tener los valores de temperatura y humedad relativa que reflejan el comportamiento climático en el que está la planta.

El cultivo inició en la primer semana del mes de marzo con la germinación de la semilla en peat moss. Para el 29 de marzo se realiza el transplante a las macetas con sustrato (agrolita, fibra de coco y peat moss), y se inicia la adquisición de las variables de interés.

El registro de las variables se realiza cada 10 minutos y los datos adquiridos se almacenan en una tarjeta de memoria SD para su posterior análisis. Estos datos se almacenan en forma de tabla, pero para un mejor análisis e interpretación se presentan en una gráfica de tiempo.

Humedad relativa (HR)

En la Figura 5.3, se muestran los valores de HR adquiridos por los sensores A, B y C en el transcurso de un día. La adquisición de datos inicia a las 18:26 horas y concluye a las 18:26 horas del día siguiente.

Los valores registrados por cada sensor son diferentes, denotando, que en la posición donde se encuentra colocado el sensor B el valor de humedad relativa es mayor que en las posiciones de los sensores A y C. Con los datos adquiridos por los sensores, se puede decir, que se tienen una mayor concentración de humedad relativa dentro del invernadero a una altura de 1,15 metros, Figura 4.3.

En la Figura 5.3, se observa que en el intervalo de 14:26 a 16:26 horas la humedad relativa disminuyó a un porcentaje de 10 %, en este intervalo es probable que la planta haya sufrido estrés hídrico.

Temperatura

En la Figura 5.4, se muestra el comportamiento de la temperatura en un día de medición. Al igual que la adquisición de humedad relativa, se inició a las 18:26 horas y

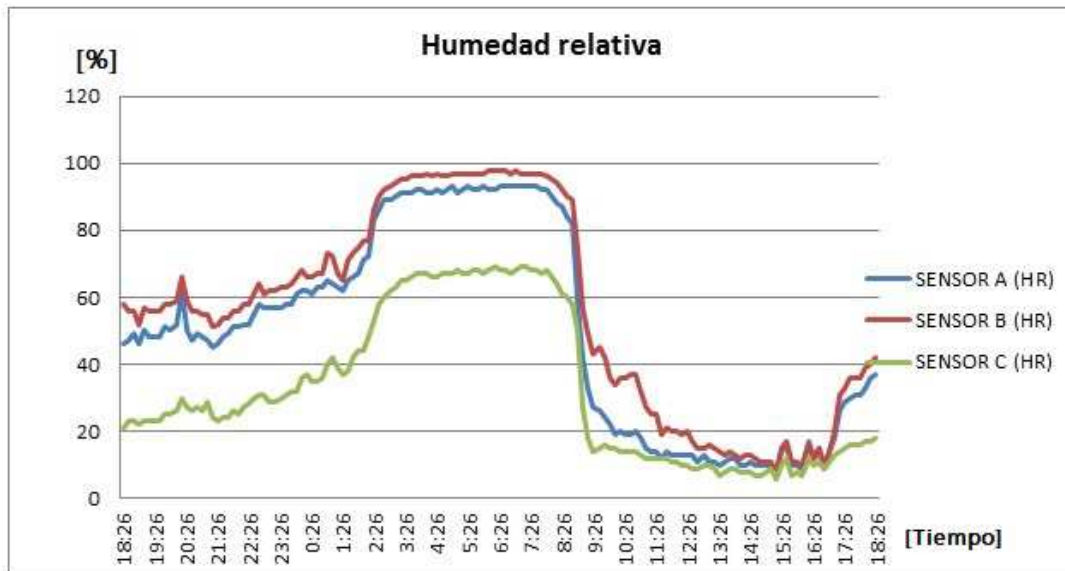


Figura 5.3: Evolución de humedad relativa en el interior del invernadero, 16 agosto 2015.

terminó a las 18:26 horas del día siguiente. La máxima temperatura registrada fue 40 °C y la mínima de 5 °C.

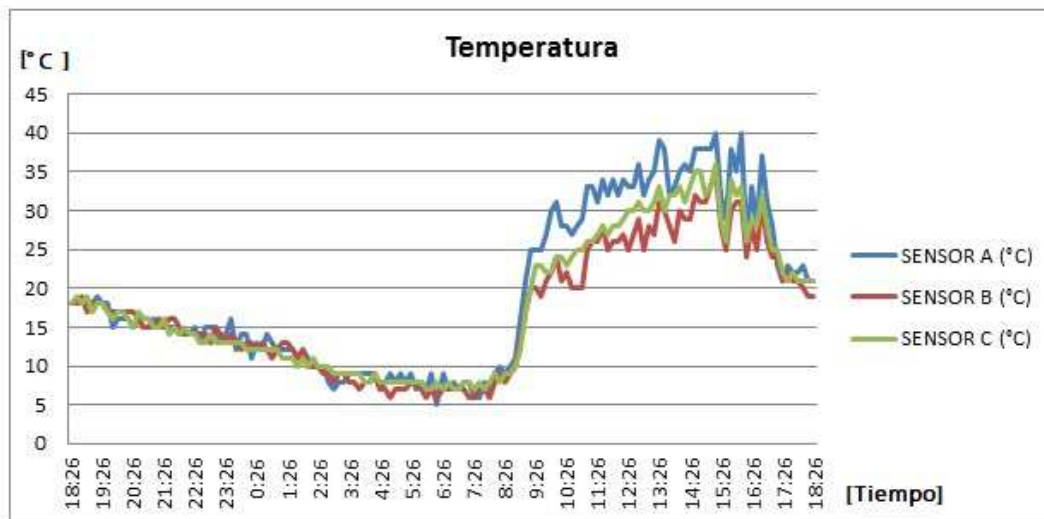


Figura 5.4: Evolución de temperatura ambiente en el interior del invernadero, 16 agosto 2015.

El sensor A se registró la mayor temperatura durante el día, debido a que se encuentra a una altura de 2.20 metros, y se encuentra mas alejado del ventilador. El sensor B registró temperaturas mas cercanas a las indicadas para el tomate rojo, sin exceder los 30 °C.

Si se hace un comparativo entre la humedad relativa y la temperatura se observa

que cuando la temperatura desciende, la humedad relativa incrementa; y cuando la humedad relativa se mantiene constante, también lo hace la temperatura.

Analizando los registros de temperatura y humedad dados por los sensores, se tiene que en la posición del sensor A se tienen valores de temperatura y humedad relativa que pueden afectar el crecimiento de la planta, por ello es necesario colocar un ventilador a una altura de 2.20 metros para mejorar la ventilación del invernadero.

Potencial de hidrógeno (pH)

Para asegurar que las plantas asimilen los nutrientes, el valor de pH se debe mantener en el rango de valores de 5,5 a 6,5. Así, el valor de alcalinidad para la solución nutritiva, como para el agua de riego debe cumplir con esta especificación (el agua tiene un valor de pH, aproximado, de 7,0).

También es importante considerar que el nivel de pH en el lixiviado cambia dependiendo de la etapa fenológica en la que se encuentra la planta. Para la medición de pH en el lixiviado se tomó la muestra de una planta piloto durante las etapas fenológicas, los resultados se muestran en la Figura 5.5.

El valor de pH en el lixiviado, durante el cultivo del tomate rojo se mantuvo entre 6,0 y 7,8. Los valores se encontraron por arriba del pH fijado en el agua de riego (5,5), esta variación se presenta por el tipo de sustrato utilizado y la solución nutritiva aplicada al cultivo. Los valores pH registrados durante las etapas fenológicas se encuentran en un intervalo permisible que no afecta el desarrollo del cultivo.

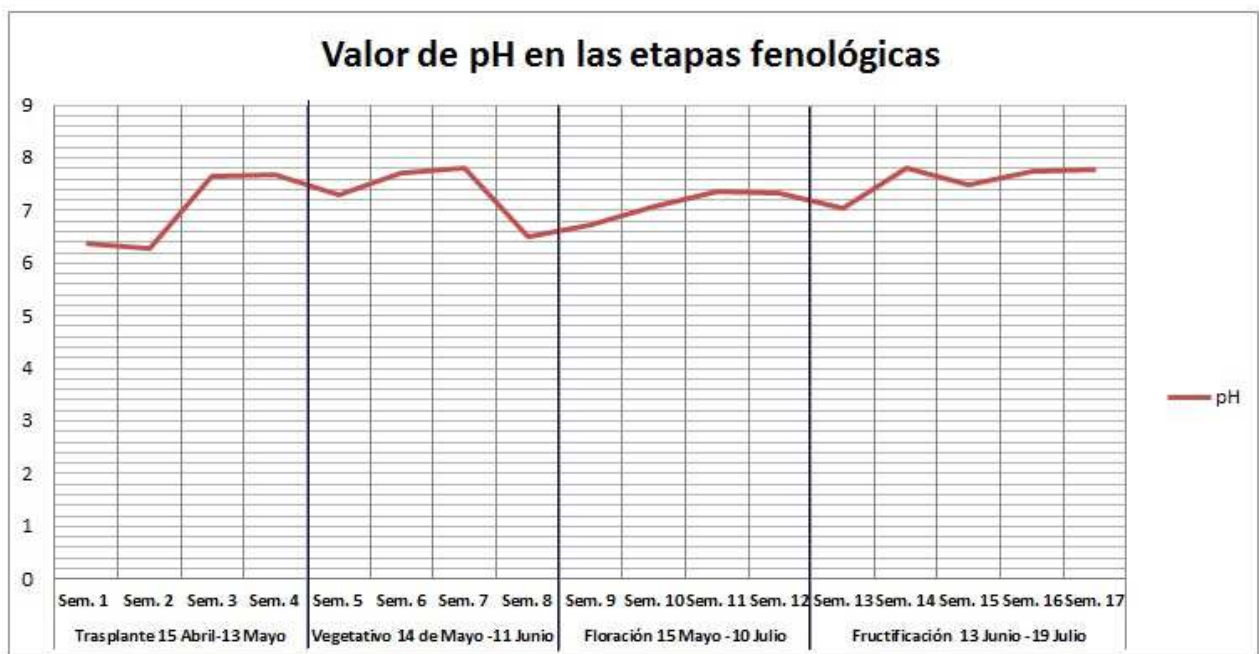


Figura 5.5: Gráfica de pH en las etapas fenológicas del tomate rojo, abril a julio 2015.

Conductividad eléctrica (CE)

El nivel de conductividad eléctrica en la solución nutritiva se fija con base a la cantidad de nutrientes aplicados en las etapas fenológicas, de acuerdo con el Cuadro 2.7.

Para conocer el comportamiento de la conductividad eléctrica en el lixiviado de la planta, se toma la muestra de una planta piloto durante las etapas fenológicas. En la Figura 5.6, se observa el comportamiento de la CE en cada etapa fenológica en el cultivo de tomate rojo.

Los niveles de CE más altos se encuentran al inicio de la etapa vegetativa y al término de la etapa de fructificación, que coincide con la disminución en la cantidad de nutrientes aplicados a la solución nutritiva.



Figura 5.6: Gráfica de CE en las etapas fenológicas del tomate rojo, de abril a julio 2015.

Características de los tomates rojos cosechados

El rendimiento de una planta de tomate se puede analizar por el estudio de sus componentes: el número de frutos por planta, el tamaño y el peso del fruto.

En el Cuadro 5.4 se tienen las medidas del largo, ancho y peso de los frutos del primer racimo de la planta seleccionado como muestra para el análisis de rendimiento. Los frutos de este racimo tienen peso y medidas muy semejantes.

En las Figuras 5.7 y 5.8 se muestra como se tomaron las medidas de los datos registrados en el Cuadro 5.4. Estas medidas se repitieron para cada uno de los frutos del racimo.

En la Figura 5.9, se muestra el sistema radicular de la planta, se observa un buen desarrollo debido a que el área de la bolsa agrícola se cubrió en su totalidad. Una

Frutos	Peso (gr)	Largo (mm)	Ancho (mm)
Fruto 1	123	68,37	56,14
Fruto 2	106	68,17	52,94
Fruto 3	81	65,71	48,64
Fruto 4	88	62,71	53,42
Fruto 5	72	58,23	43,89

Cuadro 5.4: Valores del racimo 1.

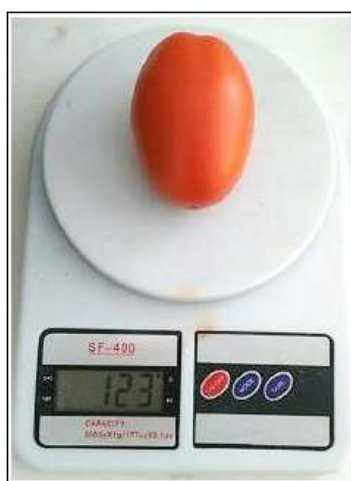


Figura 5.7: Peso del fruto del racimo uno.



Figura 5.8: Medida del diámetro y longitud del fruto del racimo uno.

temperatura adecuada también influyen en el desarrollo de las raíces.



Figura 5.9: Sistema Radicular de la planta uno.

5.5. Fresa

El cultivo de fresa se inició con el trasplante en el mes de octubre y durante la temporada de invierno se realizó la adquisición de los valores de humedad relativa y temperatura. La adquisición se realizó cada 10 minutos al igual que en el cultivo del tomate rojo, pero en diferente época del año; finales de otoño y durante el invierno. La ubicación de los sensores de temperatura y humedad relativa se muestra en la Figura 4.4.

Humedad relativa

En la Figura 5.10 se muestran los valores de humedad relativa adquiridos en el transcurso de un día. La medición inició a las 18:40 horas y concluyó a las 18:40 horas del día siguiente.

El sensor B es el que registra un valor de humedad relativa mayor, principalmente porque es el que se encuentra mas cerca del ventilador y cuando se activa este, el espacio donde esta colocado el sensor B tiene una mayor ventilación y los niveles de humedad relativa son mayores. En la posición del sensor A es donde se registran niveles por abajo del 30 % de humedad relativa que pueden causar éstres hídrico a la planta. Es importante considerar los datos adquiridos para colocar otro ventilador y mantener una humedad relativa uniforme en el invernadero.

Temperatura

En la Figura 5.11 se muestran los valores de humedad relativa adquiridos en el transcurso de un día. La medición de temperatura a las 18:40 horas y concluyó a las 18:40 horas del día siguiente.



Figura 5.10: Gráfica de humedad relativa, del día 08 febrero 2016.

Los valores de temperatura medidos por los sensores muestran que durante invierno se mantuvieron valores fuera del intervalo óptimo para la planta de fresa, pero sin llegar a valores extremos que causaran daños considerables a la planta. Durante la noche el calefactor se activaba ya que las temperaturas registradas eran menores a 12 °C. Con un calefactor no se logró mantener la temperatura por arriba de los 12 °C, es por ello que se considera necesario colocar un calefactor de mayor potencia o mas de dos calefactores que puedan cubrir el area del invernadero.

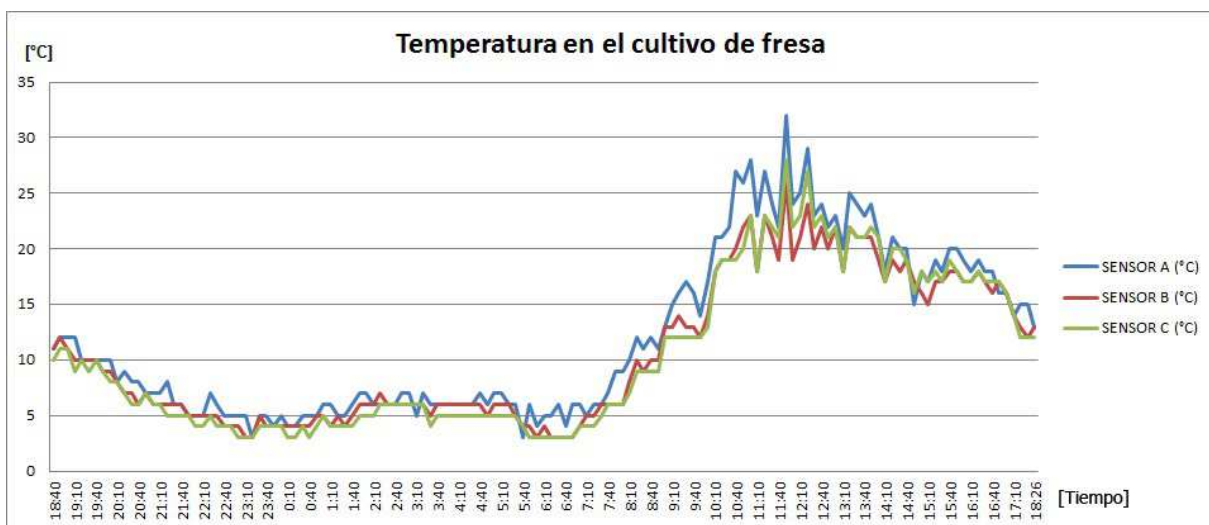


Figura 5.11: Gráfica de temperatura valores del día 08 febrero 2016.

5.5.1. Temperatura en la raíz de la planta

Debido a que en las raíces ocurre la síntesis de hormonas y otras sustancias, además, de la toma de agua y nutrientes, la temperatura de la zona radical tiene efectos marcados

sobre el crecimiento y desarrollo de la planta. En general, el crecimiento y desarrollo de la planta, aumenta al incrementar la temperatura edáfica hasta un nivel máximo entre 25 y 35 °C, dependiendo de la especie; de la misma manera existen temperaturas edáficas mínimas (entre 8 y 15 °C) para el desarrollo de la planta.

El objetivo del obtener los valores de temperatura en la raíz de la planta, es conocer cómo cambia ésta con respecto a la temperatura ambiente.

En la Figura 5.12 se observa que si la temperatura ambiente alcanza un valor mínimo de 8 °C la temperatura de la raíz se mantiene 3 °C por arriba de aquella y cuando la temperatura ambiente alcanza un nivel máximo de 27 °C la raíz se encuentra 6 °C abajo de la primera.

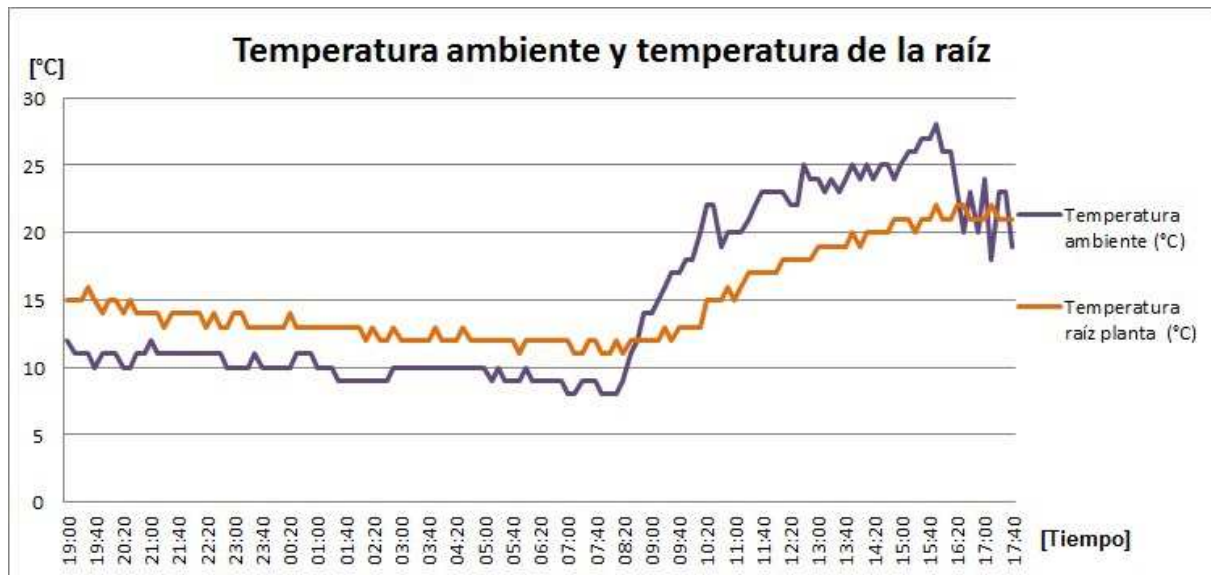


Figura 5.12: Gráfica de temperatura ambiente y temperatura en la raíz de la planta.

La colocación de la sonda de temperatura en la raíz es simple, esto debido a la composición del sustrato, comparado con un sustrato tradicional (tierra de cultivo). En la Figura 5.13, se muestra la posición y orientación de la sonda.

La composición del sustrato facilitó la colocación de la sonda de temperatura para estar en contacto con la raíz. Además, una selección adecuada del sustrato contribuye con el buen desarrollo de la planta.

De acuerdo a los estudios [López-Pérez et al., 2005] el sustrato con el cual se tiene el máximo crecimiento de la planta está compuesto por 75 % tezontle y 25 % fibra de coco.



Figura 5.13: Sonda de temperatura colocada en la raíz de la planta.

Características de las fresas cosechadas

Para el análisis del rendimiento del cultivo de fresa se tomaron los frutos de dos plantas diferentes, se pesaron y midieron como se muestra en las Figuras 5.14 y 5.15.



Figura 5.14: Pesaje de fresa.

En el Cuadro 5.5 se tienen las medidas del largo, ancho y peso de los frutos de la primera y segunda planta seleccionadas para el análisis de rendimiento. En promedio se están cosechando 500 gramos de fresa en una semana con características semejantes a las mostradas en el Cuadro 5.5.

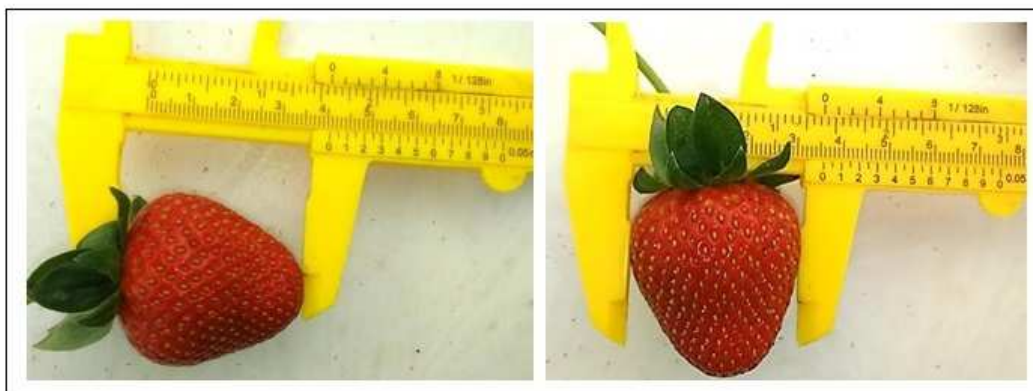


Figura 5.15: Pesaje de fresa.

Frutos de la planta uno			
Frutos	Peso (gr)	Largo (cm)	Ancho (cm)
Fruto 1	22	3,8	3,2
Fruto 2	15	3,8	2,9
Fruto 3	12	3,1	2,6
Fruto 4	10	2,8	2,4
Peso total	59		
Frutos de la planta dos			
Frutos	Peso (gr)	Largo (cm)	Ancho (cm)
Fruto 1	8	2,1	2,8
Fruto 2	7	2,1	2,4
Fruto 3	7	1,9	2,6
Fruto 4	7	2,2	2,0
Peso total	28		

Cuadro 5.5: Peso, largo y ancho de los frutos.

5.6. Plagas

Otro de los factores que puede disminuir o detener el rendimiento de un cultivo, además de las condiciones climatológicas, es el brote de plagas u hongos.

Una de las plagas más comunes en el cultivo del tomate rojo es la mosca blanca (*Hemiptera, Aleyrodidae*), Figura 5.16. Es la principal plaga que ataca al tomate rojo, su proliferación es muy rápida debido a que una hembra puede depositar hasta 200 huevos en su vida. Durante el cultivo del tomate rojo se presentaron indicios de mosca blanca, pero esta plaga se eliminó con plaguicida orgánico.



Figura 5.16: Mosca blanca.

La preparación del plaguicida orgánico se realiza en un litro de agua donde se agrega, 1 gr de levadura, 5 ml de miel y 5 ml de velosita. El tratamiento consistía en una aplicación diaria. Después de la tercera aplicación se notó una disminución de la plaga. Para la segunda semana, la mosca blanca estaba completamente erradicada.

En el cultivo de fresa la plaga que se desarrolló aproximadamente al sexto mes fue la araña roja (*Tetranychus urticae*), Figura 5.17.

Esta plaga tiene una alta incidencia y produce daños considerables a la planta. Para erradicar la araña roja se aplicó abacmetina: un insecticida empleado en el control de insectos y ácaros en los vegetales, con una aplicación quedó controlada, además, se hizo un refuerzo con aspersiones de agua simple directamente a las hojas de la planta; las aspersiones se realizaron por 5 días continuos .



Figura 5.17: Araña roja.

Capítulo 6

Conclusiones

Conociendo las características de los diferentes tipos de invernaderos, se diseñó uno, que cumpliera los requisitos para ser instalado dentro de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, con acceso a los servicios de energía eléctrica y agua; siendo estos dos factores indispensables para su funcionamiento.

La orientación del invernadero es otro factor que se consideró para la selección del lugar, ya que el cultivo debe percibir los rayos solares durante todo el día, por ello es recomendable una orientación de norte a sur (por lo que se explicó en el capítulo 3).

Las dimensiones del invernadero cumplen con el área necesaria para colocar 30 bolsas agrícolas para el cultivo de tomate rojo, fresa y hortalizas.

La selección de los materiales de recubrimiento como la malla antiáfidos en las paredes laterales y el plástico colocado en el techo, cumplieron con el objetivo de proteger al cultivo de insectos, además, de permitir la ventilación del sistema.

Con la implementación del sistema de riego por goteo se registró un ahorro en el consumo de agua, ya que el riego va directo a la raíz y se evitan desperdicios por derrames, la presión de la bomba está calibrada para que el suministro por minuto a cada piqueta sea el mismo.

El empleo de una tarjeta de adquisición de datos para automatizar los riegos permitió establecer el número de estos y su duración, de acuerdo a la etapa fenológica. Las bombas elegidas de 1 HP fueron suficientes para mantener la presión en el sistema de riego garantizando, un flujo homogéneo.

La implementación de dos tanques: uno para agua y otro para la solución nutritiva, facilitó los riegos independientes de acuerdo a las necesidades del cultivo y se generó un ahorro en la solución nutritiva, debido, a que ésta no se aplicaba en cada riego, sino que sólo en los indicados por el agrónomo.

El tanque colocado para la recolección del lixiviado evitó que éste se desechará al suelo y así optimizar el consumo del agua. El uso de la lámpara UV fue indispensable para reutilizar el lixiviado, ya que de no usarse se tiene el riesgo de que el agua esté contaminada con alguna bacteria dañina para el cultivo.

Respecto al intervalo óptimo de temperatura requerido para cada cultivo, no se logró mantener con el uso del calefactor o ventilador, sin embargo, el uso de estos dos actuadores ayudaron a que los niveles críticos de temperatura no dañaran al cultivo. El ventilador y calefactor son sistemas de potencia reducida comparada con el volumen del invernadero y las variables climáticas del lugar.

Para mejorar estas condiciones es necesario colocar 3 calefactores, dos ventiladores y de acuerdo al análisis de humedad relativa, se considera indispensable colocar aspersores para aumentar la humedad relativa, porque en los días donde se alcanzan temperaturas de 30 °C, esta variable disminuía a 20 %, causando estrés hídrico a la planta.

El registro de la temperatura y humedad relativa permitió generar una base de datos en la que se tiene los valores de estas variables por día con lecturas cada 10 minutos. Contar con estos registros permite analizar el comportamiento de las variables para predecir o sustentar el desarrollo del cultivo.

La medición de potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE), en el agua de riego, solución nutritiva y lixiviado, es indispensable para mantenerlos controlados para que la planta tenga un buen crecimiento.

En el agua de riego se midió el pH para garantizar que se mantuviera en un valor de 5,5, si al realizar la medición se observaba un incremento, se agregaba ácido sulfúrico para bajar el nivel de acidez.

El uso de instrumentos calibrados como patrones permitió hacer la comparación entre los valores dados por estos y los valores obtenidos por los sensores instalados en el invernadero.

Para la preparación de la solución nutritiva, se tiene una tabla con la cantidad de nutrientes requeridos por la planta en etapas fenológicas. Esta tabla fue proporcionada por el agrónomo que asesoró para la nutrición, cuidados y manejo del cultivo.

Bibliografía

- Ángel Beltrán Albán, Milton Ramos, and Mario Alvarez Nuñez. Estudio de la vida útil de fresas (*fragaria vesca*) mediante tratamiento con radiación ultravioleta de onda corta (uv-c). *Revista Tecnológica-ESPOL*, 23(2), 2010.
- Amedeo Alpi and Franco Tognoni. *Cultivo en invernadero*. Mundi-Prensa Libros, 1991.
- Laura Alpízar Antillón. Hidroponía: cultivo sin tierra. Technical report, Cartago, CR: Tecnológica de CR, 2004.
- Ramón Pallás Areny. *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo, 2004.
- Gina Margot Delgado Aristega. *Evaluacion de Extractos Vegetales y Aplicacion de Sili-lico para el Manejo Integrado de Enfermedades Foliares e Insectos-Plaga en Tomate*. INIAP Archivo Historico, 2010.
- Elisa Boix Aristu. *Operaciones básicas en viveros y centros de jardinería*. Editorial Paraninfo, 2012.
- Édgar Iván Estrada Cabrera, Franco Alirio Vallejo. *Producción de hortalizas de clima cálido*. Univ. Nacional de Colombia, 2004.
- Dr Héctor E Gaxiola Carrasco. Importancia de sinaloa y méxico en la agricultura protegida. (29), 2011.
- Nicolás Castilla and Nicolás Castilla Prados. *Invernaderos de plástico: tecnología y manejo*. Mundi-Prensa Libros, 2007.
- María del Carmen Jaren Ceballos, Silvia Arazuri Garín, and G Bergara. Introducción a la espectroscopia de infrarrojo cercano en la horticultura. *Horticultura internacional*, (52):58–63, 2006.
- Vicepresidencia de Fortalecimiento Empresarial. Fresa. 2015.
- Gerhard Fischer, Francisco Torres Carvajal, and Jaime Torres Bazurto. Efecto de la temperatura del suelo sobre la planta 1, crecimiento y desarrollo. 1997.
- María del Carmen García Aguilar. La acción institucional y sus impactos en los altos de chiapas. pages 198–199, 1991.
- Miguel Urrestarazu Gavilán. *Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía*. Ediciones Paraninfo, SA, 2015.

- Luis López-Pérez, Raúl Cárdenas-Navarro, Philippe Lobit, Omar Martínez-Castro, and Omar Escalante-Linares. Selección de un sustrato para el crecimiento de fresa en hidroponía. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(2):171–174, 2005.
- Raymundo Sergio Noriega Loredó. Incubadora de hortalizas automatizada a escala (ihae). *Revista Electrónica sobre Tecnología, Educación y Sociedad*, 1(2), 2014.
- Katsuhiko Ogata. Ingeniería de control moderno. Technical report, 1998.
- Katsuhiko Ogata. *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, 2003.
- Karen M Poulsen. Análisis de semillas &. 2000.
- María Fernanda Quintero, Carlos Alberto González, and José Miguel Guzmán. Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Universidad Nacional de Colombia, Bogota, pages 79–108, 2011.
- Favela Chávez Esteban Preciado Rangel et al. Manual para la preparación de soluciones nutritivas, esteban fabela Chávez, pablo preciado Rangel y adalberto benavides mendoza. Technical report, 2006.
- E Manrique Reol. Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Revista Ecosistemas*, 12(1), 2003.
- Antonio Creus Solé. *Instrumentación industrial*. Marcombo, 2012.
- M Urrestarazu, PC Mazuela, AL Alarcón, and AL Alarcón. Cultivo en sustratos alternativos. *Cultivos sin suelo. Compendios de Horticultura*, 17:147–173, 2006.

Apéndice A

Especificaciones de sensores y equipos utilizados en la implementación y automatización del invernadero

A.1. Sonda de pH Vernier

El sensor de pH producirá un voltaje de 1,75 volts con un PH de 7,0. El voltaje aumentará en 0,25 volts para cada unidad de pH que descienda, y por cada unidad de pH que aumente, desciende unos 0,25 volts.

Especificaciones del electrodo de pH:

- Tipo: Sellado, relleno de gel, cuerpo de epoxy, Ag/AgCl
- Tiempo de respuesta: 90 % de la lectura final en 1 seg
- Rango de temperatura: 5 a 80 °C
- Rango: pH de 0 a 14.

La sonda de conductividad mide, en realidad, la conductancia, definida como el recíproco de resistencia. Cuando las unidades de resistencia son ohmios, las unidades de conductancia son siemens. La conductividad se calcula con las siguientes ecuaciones.

$$C = C * kc, \tag{A.1}$$

$$kc = d/A. \tag{A.2}$$

- Rango bajo: 0 a 200 S/cm (0 a 100 mg/L TDS)

- Rango medio: 0 a 2000 S/cm (0 a 1000 mg/L TDS)
- Rango alto: 0 a 20,000 s/cm (0 a 10,000 mg/L TDS)

A.2. Medidor de pH, CE, TDS, (HI 98129)

El medidor de pH, CE, TDS, °C (HI 98129) de bolsillo presenta un rango en CE de 0 a 3999 S/cm y de 0 a 2000 ppm en TDS.

- Rango pH: 0 a 14,00
- Rango CE: 0 a 3999 uS/cm
- Rango TDS: 0 a 2000 ppm

A.3. Sensor de temperatura y humedad relativa HMZ-433A1

De acuerdo a la hoja de especificaciones del sensor HMZ-433A1, se tiene el Cuadro A.2, donde se encuentran registradas las temperaturas y resistencias eléctricas correspondientes. Estos datos son utilizados para realizar el cálculo de las constantes A, B y C de la Ec. (4.2).

Temperatura [°C]	0	10	20	30	40	50	60
Resistencia [Ω]	160,56	98,714	62,328	40,356	26,756	18,138	12,554

Cuadro A.1: Temperatura y resistencia.

Humedad [%]	20	30	40	50	60	70	80
Voltaje [V]	0,66	0,99	1,32	1,65	1,98	2,31	2,64

Cuadro A.2: Humedad y voltaje.

A.4. Circuito de mando

Se muestra el diagrama de conexión del circuito de mando, utilizado para activar y desactivar los actuadores del sistema: bombas, calefactor, ventilador y lampara UV.

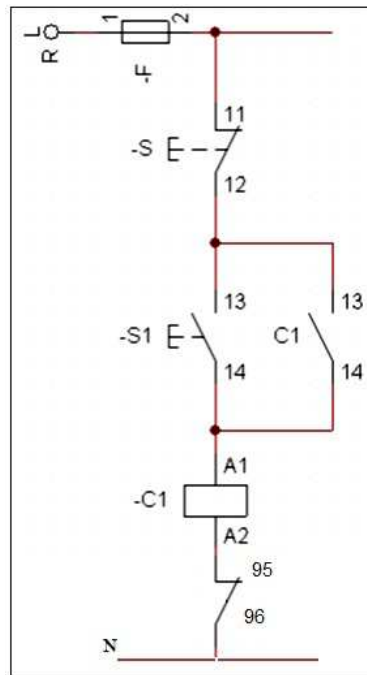


Figura A.1: Diagrama de mando.

El diagrama se replicó para cada uno de los actuadores, y su accionamiento depende de la señal de salida de la tarjeta de adquisición MyRio, que activa un relevador RAS-0510 y éste a su vez activa la bobina del contactor.

A.5. Especificaciones MyRio

El MyRio es un dispositivo que provee al usuario con múltiples entradas y salidas analógicas, digitales, e incluso de audio. Además, posee conectividad por medio de USB y WiFi bajo el estándar 802,11b,g,n.

Dispone de un procesador programable ARM Cortex-A9 dual-core de 667 MHz y E/S personalizadas de FPGA Xilinx, las cuales pueden ser usadas por estudiantes para el desarrollo de sistemas y resolver problemas de diseño más rápido.

El dispositivo NI MyRio permite interactuar con el Zynq-7010, sistema en un Chip completamente programable para liberar el poder del software de diseño de sistemas NI LabVIEW en aplicaciones de tiempo-real y en nivel FPGA. Además, dentro de su propio encapsulado cuenta con 4 LEDs, un acelerómetro, giroscopio y un botón programable.

Características entradas analógicas:

- Velocidad de muestreo: 500 k muestras/s
- Resolución: 12 bits

- Protección sobretensión: ± 16 V.

Características salidas analógicas:

- Velocidad de actualización: 354 k muestras/s
- Resolución: 12 bits
- Protección sobretensión: 16 V

Junto a esto, en los puertos de conexión MXP se cuenta con entradas UART para comunicación entre dispositivos. La Figura A.2, muestra el diagrama de bloques del NI MyRio.

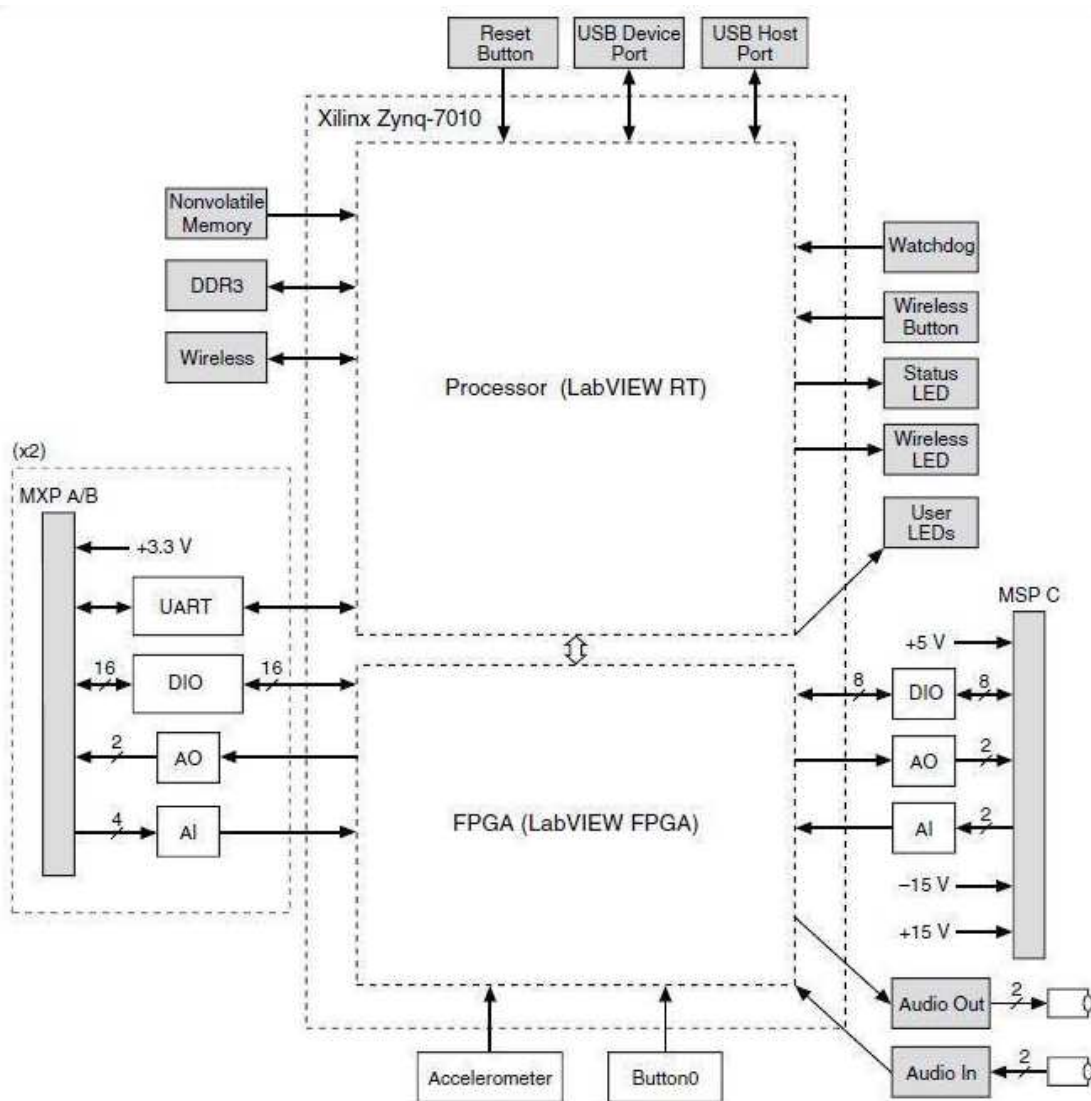


Figura A.2: Diagrama de bloques del NI myRIO.

Cuenta con conectores MXP A y B, los cuales son idénticos entre sí y las señales que llegan a ambos se diferencian a nivel de software, gracias a los nombres de los conectores, los cuales se muestran en la Figura A.3.

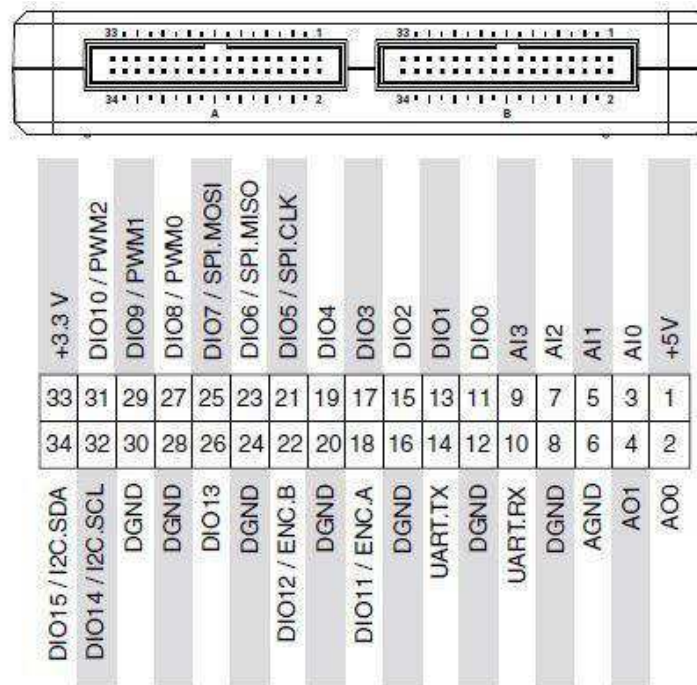


Figura A.3: Pines del puerto MXP.

La tarjeta de adquisición NI MyRio posee entradas y salidas extras, tanto analógicas como digitales por medio de su puerto MSP.

- Conectores MXP: 2 puertos de 16 E/S digitales.
- Conector MSP: 1 puerto de 8 E/S digitales.
- Niveles lógicos: entrada compatible con LVTTL 5V, salida LVTTL 3,3 V.

A.6. Especificaciones lámpara UV

Marca Hidrotec, modelo UV-11 W. Kit desinfectante de luz ultravioleta de acero inoxidable acabado espejo de 12 Watts para un flujo de 0,8 galones por minuto. La unidad consiste en una carcasa tubular construida en acero inoxidable 304 de alta densidad, pulido interior y exterior de la carcasa. Dentro del cuerpo de la válvula existe una lámpara generadora de luz ultravioleta germicida de 12 Watts de potencia, dentro de un tubo de cuarzo protector.

Características técnicas:

- Presión máxima de operación: 5 kg/cm²
- Consumo total de corriente: 50 mA
- Material del tubo protector: cuarzo
- Material lámparas germicidas: 99 % SiO₂ (óxido de silicio)
- Dosis germicida nominal: >30.000 U.G. uW/cm²
- Medidas de conexión entrada y salida: 1/4 plg
- Vida útil: 8000 horas.

A.7. Especificaciones de la bomba

Bomba periférica para agua 0,5 HP, modelo BPHP.50, con las siguientes características:

- Voltaje: 127 V - 60 Hz
- Corriente: 4,8 Amp
- Flujo máximo: 33 l/min
- Altura: 16 m
- Protección contra salpicaduras de agua: IP44.

A.8. Especificaciones del ventilador

Ventilador Man mod. Freal 2020.

Características:

- Ventilador de piso
- Aspas de 50 cm (20") - 1500 RPM
- Desplazamiento de aire 99 m³/min
- Dirección vertical ajustable en 120 grados
- Interruptor rotativo de tres velocidades
- Potencia: 125 Watts
- Voltaje: 110-120 Volts
- Frecuencia: 50/60 Hz.

A.9. Especificaciones de los paneles solares

Los paneles fotovoltaicos colocados en el invernadero tienen las siguientes características:

- Máximo voltaje: 17,5 V
- Óptima corriente de operación: 0,58 A
- Voltaje de salida: 21,5 V.

A.10. Especificaciones de controlador de sistema fotovoltaico y batería

El controlador para el sistema fotovoltaico es de la marca SUNSAVER, modelo SS-10 / SS-10L con las siguientes características:

- Tensión del sistema: 12 Volts
- Tensión máxima: 25 Volts
- Máxima corriente de cortocircuito: 12,5 A
- Temperatura ambiente: -40 a 60 °C
- Compensación de temperatura: -28 mV/°C.

La Figura A.4 muestra cómo se realizan las conexiones de la celda solar, batería y lámpara al controlador.

La batería que se puede usar con este controlador debe tener las siguientes especificaciones:

- Batería sellada: ± 35 mV
- Batería con líquido: ± 60 mV
- Máxima tensión entregada 25 a 44 Volts
- Voltaje mínimo para operar 6 Volts
- Tierra negativa
- Capacidad de conexión paralela

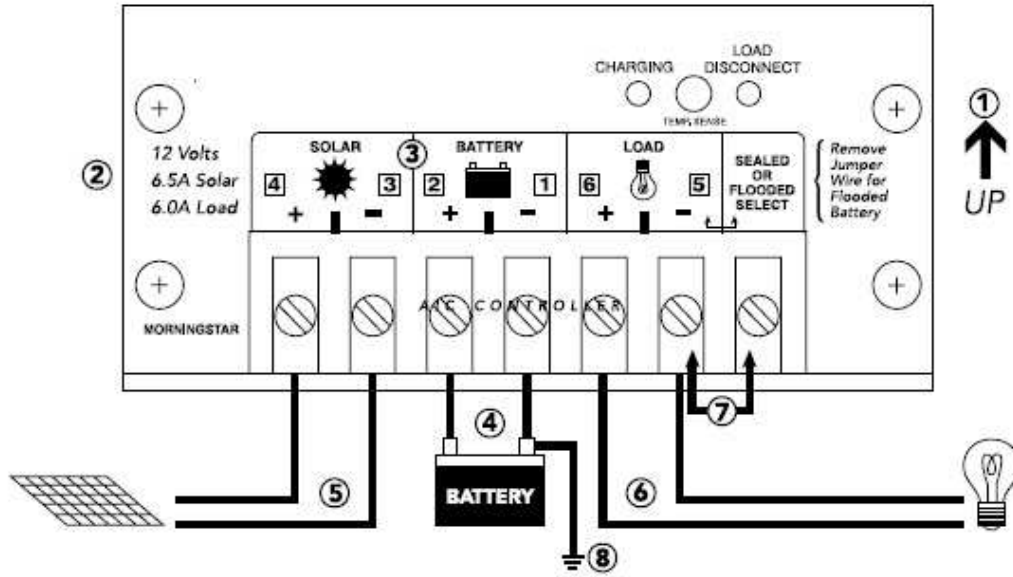


Figura A.4: Controlador fotovoltaico

- Autoconsumo: 8 a 10 mA
- Rango de potencia de pulso 1500 Watts
- Capacidad con una sobrecarga de: 25% de corriente en 5 minutos.

