

**CONTROL DE LAS SOLUCIONES Y VARIABLES AMBIENTALES DE UN CULTIVO
HIDROPONICO DE LECHUGA MEDIANTE UN SISTEMA EMBEBIDO CONECTADO
A INTERNET**

LUIS MIGUEL RODRIGUEZ MONCADA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ DC
2020**



**CONTROL DE LAS SOLUCIONES Y VARIABLES AMBIENTALES DE UN CULTIVO
HIDROPONICO DE LECHUGA MEDIANTE UN SISTEMA EMBEBIDO CONECTADO
A INTERNET**

LUIS MIGUEL RODRIGUEZ MONCADA

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Este proyecto de grado ha sido dirigido
por el Ingeniero Jhon Erik Navarrete Gómez**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ
ABRIL DE 2020**

Nota de aceptación:

Firma del director

Firma de jurado

Firma de jurado

DEDICATORIA

A Dios por darme la bendición y oportunidad de estudiar y formarme como Ingeniero Electrónico.

A mis padres por su apoyo y amor incondicional.

Al amor de mi vida Daniela por siempre estar a mi lado y motivarme a alcanzar y culminar todos mis proyectos en el área personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero y profesor Jhon Navarrete por su colaboración y su compromiso para que este proyecto pudiera realizar.

Al Ingeniero Hugo Escobar Profesor y Asistente del centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, por su ayuda y colaboración en este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO.....	10
RESUMEN.....	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GENERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	15
3.2 JUSTIFICACIÓN	16
4. FACTIBILIDAD	17
5. ANTECEDENTES	18
6. MARCO TEÓRICO	19
6.1 HIDROPONÍA	20
6.1.1 Sistemas hidropónicos	20
6.1.1.1 Fertirrigación	20
6.1.1.2 Sistema NFT	21
6.1.1.3 Aeroponía	22
6.1.2 Componentes del sistema hidropónico	22
6.1.3 Solución Nutritiva	24
6.1.4 Electro conductividad y pH	26
6.1.5 Sintomatología	28
6.1.5.1 Sales para corregir las deficiencias	31
6.2 CULTIVO DE LECHUGA	32
6.2.1 Condiciones ambientales	32
6.2.2 Plagas	33
6.2.3 Obtención de las plántulas	33
6.3 SISTEMA DE CONTROL	34
6.3.1 Control PID	36
6.3.2 Sensores	37
6.3.2.1 Sensor de nivel	37
6.3.2.2 Sensor EC	38
6.3.2.3 Sensor de Humedad	39
6.3.2.4 Sensor de Temperatura	39

6.3.2.5 Sensor PH	40
6.3.3 Actuadores	41
6.3.3.1 Bomba DC	41
6.3.3.2 Calentador	41
6.3.3.3 Bomba AC	42
6.3.3.4 Humidificador	42
6.3.4 Internet of Things	43
7. DISEÑO METODOLOGICO	45
7.1 Introducción	45
7.2 Condiciones iniciales	46
7.3 Germinación e introducción de las lechugas	47
7.4 Sistema de tanques y tuberías	48
7.5 Sensores y actuadores	49
7.5.1 Sensor de temperatura	49
7.5.2 Sensor de humedad relativa	49
7.5.3 Sensor de pH	50
7.5.4 Sensor de EC	53
7.5.5 Calentador	56
7.5.6 Motobomba 12V	58
7.5.7 Humidificador	59
7.6 Control PID	60
7.6.1 Sintonización de los bloques PID de la temperatura, humedad y pH apartir del método de sintonización de Ziegler-Nichols.	60
7.6.1.1 Sintonización del bloque PID del control de la temperatura	62
7.6.1.2 Sintonización del bloque PID del control de la humedad	63
7.6.1.3 Sintonización del bloque PID del control del pH (-)	64
7.6.1.4 Sintonización del bloque PID del control del pH (+)	65
7.6.2 Sintonización del bloque PID del control de la solución nutritiva, apartir del método heurístico	66
7.7 Servidor Web	68
7.7.1 Interfaz gráfica	68
8. CONCLUSIONES	73
9. TRABAJOS FUTUROS	75
10. IMPACTO SOCIAL	77
11. BIBLIOGRAFÍA	78

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Solución hidropónica A	24
Solución hidropónica B	25
Solución hidropónica C	25
Conductividad en el agua de la solución para varias especies y su tolerancia relativa	27
Escala aproximada de apreciación de la acidez o alcalinidad de una solución	27
Sales para corregir deficiencias en la solución nutritiva	31
Condiciones determinadas para el cultivo hidropónico de lechuga	46
Características de la sonda del sensor de PH.	50
Valores de las soluciones calibradoras de pH; 4.00, 6.86 y 9.18.	51
Características del sensor de EC DJS V1.0.	53
Regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta	61
Función de cada botón y significado de las abreviaciones presentadas en la página web y el modulo LCD.	71

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Ilustración del prototipo con tuberías, tanques, dispositivos eléctricos y electrónicos.	19
Ejemplo práctico de un sistema hidropónico, utilizando cajones de madera y una Bomba eléctrica.	23
Ejemplo de síntomas en una hoja asociados a la falta de elementos como; Nitrógeno, Potasio, Hierro y Manganeseo.	28
Diagrama P&D del sistema.	35
Diagrama de bloques de un control PID para una planta	36
Sensor de nivel	37
Forma y conexión del sensor de conductividad Dfrobot DFR0300	38
Sensor de Temperatura y Humedad DHT11 con pines	39
Sensor de Ph PH0-14.	40
Bomba de 12V	41
Humidificador ultrasónico.	42
ESP8266 Node MCU V3 con sus respectivos Pines	44
Arquitectura del sistema electrónico	45
A la izquierda, lechuga de una semana en semillero, a la derecha lechuga de un mes en sistema hidropónico.	47
Esquema del sistema de tuberías y tanque principal.	48
Curva de error típica del DS18B20	49
Ecuación de la recta y gráfica de la función de la salida del sensor de pH.	51
Señal analógica con y sin filtro pasa bajo media móvil exponencial.	52
Comparación de las funciones de salida al variar la constante de calibración K.	54
Recta característica de la salida del sensor de EC	55
Circuito del detector de cruce por cero.	56
Señal de la red AC, Señal del detector de cruce.	56
Circuito de control del SCR.	57
Señal del microcontrolador, Señal de la carga del circuito de control del SCR.	57
Driver de motor DC 12V usando un amplificador en la configuración de Darlington.	58
Señal de PWM al 10% 60Hz, Señal de PWM al 90% a 60Hz.	59
Curva de respuesta en forma de S	61
Curva de la respuesta de la planta de control de temperatura en lazo abierto.	62
Respuesta de la planta de control de temperatura apartir de la excitación de una entrada en forma de escalón.	62
Curva de la respuesta de la planta de control de la humedad en lazo abierto.	63
Respuesta de la planta de control de la humedad apartir de la excitación de una entrada en forma de escalón.	63
Curva de la respuesta de la planta de control del control del pH negativo en lazo abierto.	64
Respuesta de la planta del control del pH negativo apartir de la excitación de una entrada en forma de escalón.	64
Curva de la respuesta de la planta del control del pH positivo en lazo abierto.	65
Respuesta de la planta del control del pH positivo apartir de la excitación de una entrada en forma de escalón.	65
Respuesta de la planta del control de la solución nutritiva ante una entrada en forma de escalón para distintos valores de Kp.	66
Respuesta de la planta del control de la solución nutritiva apartir de la excitación de una entrada en forma de escalón.	67
Información inicial presentada en la pantalla LCD con la dirección IP del servidor y la hora.	68
Interfaz de la página Web desplegada por el servidor Web.	69
Presentación de la información en el módulo LCD y su número indicador.	70
Advertencia del servidor cuando la temperatura está por debajo del nivel determinado.	72
Uso de la luz artificial en un cultivo hidropónico implementado por la compañía japonesa Spread.	75
Ilustración del diseño de un prototipo de un edificio que produce cultivos hidropónicos	76

GLOSARIO

ACIDEZ. Es la cualidad de un elemento o compuesto que presenta la propiedad de ser ácido. En una solución líquida la acidez corresponde a la escala entre el 0 y 7 del índice PH. Las sustancias ácidas pueden ser altamente corrosivas.

ACTUADOR. Un actuador en electrónica, es un dispositivo que convierte las señales eléctricas en señales mecánicas, con el fin de generar alguna acción sobre un proceso o una línea de producción.

ALCALINIDAD. Es la cualidad de una sustancia que presenta la propiedad de ser alcalina. Una sustancia alcalina tiene un alto grado de conductividad y pueden disolver materiales orgánicos.

ALGORITMO. Un algoritmo es un mecanismo lógico que permite controlar un sistema mediante instrucciones previamente programadas. El algoritmo puede ser representado de diversas maneras en diferentes lenguajes de programación

AUTOMATIZACIÓN. La automatización es la implementación de técnicas y tecnologías para que un proceso de producción se controle de manera automática.

CONTROL PID. El control PID es un tipo de control que controla una o más variables mediante tres tipos de control; el control proporcional, el control integral y el control derivativo. Mediante un lazo de realimentación corrige el error y se ajusta a los parámetros del sistema.

ELECTRO CONDUCTIVIDAD. La electro conductividad es la propiedad que indica que tanto una solución puede conducir electricidad, también se relaciona con la concentración de sales de una solución.

INTERFAZ. La interfaz es la forma en que una máquina o un sistema presenta la información de tal manera que otro dispositivo o un humano sea capaz de entender la información presentada.

PH. Es el índice que indica la acidez o alcalinidad de una solución, varía del 0 al 14 donde 7 es el valor neutro. Si el valor es menor de 7 la solución es ácida, si es mayor de 7 la solución es alcalina.

SISTEMA EMBEBIDO. Los sistemas embebidos son dispositivos electrónicos capaces de controlar una cierta cantidad de procesos de manera simultánea y en tiempo real. Se caracterizan por su pequeño tamaño y por ser parte de sistemas mucho más complejos.

RESUMEN

Este documento presenta la descripción de un proyecto que tiene como objetivo implementar un sistema de control electrónico el cual controla las variables ambientales y las soluciones nutritivas de un cultivo hidropónico a una escala pequeña. El tipo de control a usar es un control PID clásico el cual será implementado de manera digital mediante un sistema embebido, en este caso un micro controlador que estará conectado a la red de internet.

Como es tendencia en la actualidad el conectar los objetos cotidianos a la red de internet, es posible monitorear casi cualquier objeto que se desee, en este caso un cultivo hidropónico. El operador del sistema tendrá la posibilidad de observar las variables del sistema mediante un servidor Web conectado a una red local.

El sistema propuesto en este documento se implementara mediante un prototipo de un área no mayor a 6 m^2 , por lo que es de escala pequeña, sin embargo al ser un proyecto de desarrollo tiene una proyección mayor a medida que el proyecto evolucione. El objetivo final es demostrar que se pueden controlar y monitorear múltiples variables de un cultivo hidropónico, generando una grande ventaja al agricultor o a cualquier persona que desee emprender en el campo de la agronomía.

En la actualidad la mayoría de agricultores del mundo no cuentan con la facilidad de acceder a tecnologías que simplifican cultivar de manera masiva y conseguir productos de alta calidad debido a que muchos de los sistemas comerciales suelen ser muy costosos o complicados de implementar. Mediante este proyecto se demuestra que es posible conseguir una herramienta que es fácil de adquirir y a un bajo costo que puede ayudar en el área de la agricultura, en especial a aquellas personas que no poseen experiencia en esta área.

1. INTRODUCCIÓN

La técnica de la hidroponía o agronomía hidropónica consiste en cultivar plantas mediante un circuito de agua abierto o cerrado al cual se le agregan soluciones nutritivas para alimentar las plantas. El crecimiento y desarrollo de las plantas y su capacidad para obtener frutos y flores dependerá de varios factores como la composición de la solución nutritiva, el pH, la electro conductividad y la oxigenación. Las soluciones nutritivas deben ser preparadas e introducidas al circuito de agua de manera exacta y controlada, si hay falta o exceso de algún mineral se puede tener repercusiones en la salud de las plantas. Es por esto que solo haciendo un buen control de las soluciones, un control de las variables ambientales y un manejo de las plagas, es posible obtener plantas sanas, de alta calidad y aptas para el consumo. [1]

Desde mitad del siglo pasado se han visto muchos avances e interés en el cultivo de plantas usando soluciones, desde entonces hasta hoy se han implementado muchos sistemas que usan este principio como; la aeroponía, la fertirrigación y la técnica de película nutritiva o NFT entre los más importantes.

El cultivo aeróponico es un tipo de cultivo hidropónico, se diferencia de los demás porque las raíces de las plantas se encuentran a una altura determinada para que una parte de estas interactúe con el aire, esto con el fin de tener una mayor oxigenación y una mayor absorción de los nutrientes.[1] La Fertirrigación por otro lado, es la técnica en la cual los fertilizantes son aplicados junto con el agua de riego con el fin de infiltrarlo en el suelo. El manejo de las soluciones nutritivas es muy similar al cultivo hidropónico pero difiere en que no se reutiliza el agua y las plantas crecen en el suelo.[2]

El sistema de recirculación de solución nutritiva o “NFT” consiste en la circulación constante de una lámina fina de solución nutritiva que pasa a través de las raíces del cultivo, el circuito es cerrado por lo que la solución es reutilizada. Las plantas se cultivan sin un sustrato, por lo cual las plantas se encuentran suspendidas en canales de cultivo. Actualmente el sistema NFT está siendo implementado, en sus distintas formas, especialmente en zonas áridas de América Latina.[3]

La electrónica brinda diversas herramientas para adquirir información de las variables físicas como también para controlarlas. En el mercado se encuentran muchos sensores que sirven para medir magnitudes como humedad, temperatura, volumen, flujo, pH, electro conductividad y luminosidad, variables e información muy útiles para un agricultor u operador que desee monitorearlas. Aprovechando los sistemas electrónicos de control es posible controlar de manera muy precisa, variables físicas de manera automática, lo cual resulta en una apoyo al agricultor o a cualquier persona que necesite manejar un cultivo hidropónico, y su interés sea obtener plantas sanas y de manera masiva. [4][5]

Por otro lado, los avances en el campo de la electrónica y las telecomunicaciones han permitido conectar equipamiento a la red de internet, facilitando el acceso a la información de cualquier objeto que se desee observar. Actualmente se evidencia una tendencia a conectar diversos objetos a internet como equipamiento herramientas e infraestructura en general, es por esto que ahora es posible monitorear las variables ambientales de un invernadero y controlarlas de manera remota por medio de internet, lo que resulta ser una herramienta muy útil para un agricultor u organización dedicada a la producción de cultivos. [5][6][7]

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de control, a partir de un sistema embebido conectado a internet, que permita controlar los niveles humedad relativa, temperatura, pH y concentración de la solución nutritiva de un cultivo hidropónico de lechuga.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Controlar los niveles de humedad, temperatura, pH y concentración de la solución nutritiva del cultivo mediante un controlador PID.

Desarrollar un servidor Web el cual presente una página Web, la cual mediante una interfaz gráfica permita monitorear y modificar los estados del sistema.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La hidroponía es una técnica que permite generar cultivos con un rendimiento mayor en comparación a la forma tradicional de cultivo, permite además ahorrar grandes volúmenes de agua, sin embargo los desafíos técnicos y económicos que representa implementar un cultivo hidropónico puede desanimar a los emprendedores o empresarios que quieran incursionar en el campo de la hidroponía. [1]

En Latinoamérica el desarrollo de los cultivos hidropónicos es menor que en los países industrializados donde las herramientas son más asequibles para la industria agrónoma. En el mercado se pueden encontrar dispositivos y sistemas automatizados que tienen la capacidad de controlar variables como la temperatura, la humedad relativa y el riego, sin embargo son pocos los sistemas que se especializan en el control de las condiciones ambientales y el manejo de las soluciones de los cultivos hidropónicos. [1][4]

Muchas de las especies vegetales producidas nacionalmente difícilmente logran competir frente al rendimiento y la calidad de los productos agrícolas traídos del extranjero, sin embargo en contra parte los dispositivos electrónicos cada vez son más económicos y asequibles. En la actualidad es posible la implementación de sistemas y dispositivos electrónicos que anteriormente solían ser costosos y complejos, muchos de ellos pueden servir en el área agrícola en especial en Latinoamérica. [1][8]

3.2 JUSTIFICACIÓN

La hidropónica es una técnica que tiene enormes beneficios, en especial los de impacto ambiental ya que por lo general el agua es reutilizada y se aprovecha al máximo, no hay residuos y no hay necesidad de intervenir los terrenos. También se pueden evitar otros problemas asociados a los cultivos masivos como las plagas y las plantas no deseadas. [1][9]

Mejorar el desarrollo de la hidroponía a través del apoyo científico puede significar mayores oportunidades para plantear soluciones de alimentación a una población mundial que crece exponencialmente y que se enfrenta al consumo indiscriminado de recursos naturales. Poder prevenir problemas tales como la floración prematura, bordes quemados de las hojas por enfermedades y plagas causados por variables que pudieran controlarse, podrían acarrear mejores resultados en términos de producción de alimentos.[9]

Se pretende a través de la hidroponía y la electrónica digital, mejorar los procesos para la sistematización de la información y el control de las tareas mediante la combinación de elementos electrónicos y de telecomunicaciones. Los sistemas embebidos pueden realizar numerosas tareas para el control, la comunicación y el manejo de la información. Se puede integrar en un sistema conectado a internet, una red de sensores y actuadores, para controlar de manera inteligente variables como la humedad del ambiente y la temperatura, además también es posible aplicar de manera controlada y exacta las soluciones al circuito de agua, facilitando así la tarea del agricultor. [1][4][5][6][7][9]

4. FACTIBILIDAD

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un prototipo el cual permita hacer pruebas para luego ser implementado a una escala mayor. Para empezar se probara con un cultivo de un área no mayor a 6 m^2 , por lo que no es necesario disponer de una gran cantidad de recursos. Por un lado la inversión es pequeña comparada con otros proyectos de desarrollo. Por otro lado al ser un prototipo de escala reducida, no es necesario recurrir a un grande número de personas para poner en marcha el proyecto. Este proyecto tiene una gran posibilidad de lograrse en un periodo no mayor a seis meses.

Debido a que se pretende construir y ubicar este prototipo en una zona urbana, hay una grande posibilidad de disponer de los recursos como el agua, las sales minerales, los materiales, los dispositivos y sistemas eléctricos. Al controlar las variables ambientales dentro de una estructura cerrada como la de un invernadero es posible cultivar virtualmente en cualquier ubicación siempre y cuando haya un suministro de agua y electricidad.

La lechuga es una planta que aporta un buen porcentaje de agua y tiene una gran demanda para su uso en ensaladas. Requiere muchos cuidados en especial los relacionados al control de los niveles de humedad, temperatura y sales minerales, por lo cual es una buena candidata para ser cultivada en un sistema como el que se pretende diseñar y construir. [9]

Para la ejecución de este proyecto se requieren conocimientos en el área de la electrónica y la agricultura, sin embargo no es necesario ser un experto en los temas que involucran estas disciplinas. Es posible que cualquier persona aprenda y se instruya para operar este tipo sistema. Existen muchos trabajos relacionados con el tema de los cultivos hidropónicos y las técnicas de control, se pueden encontrar tanto en las bibliotecas como en la red de internet. Hay una amplia disponibilidad de recursos y herramientas como software libre y equipos en el mercado para diseñar e implementar este proyecto. Los dispositivos electrónicos y los materiales con los que se pretende construir este proyecto se encuentran en el mercado y son de fáciles de adquirir. [2][4][9][10]

5. ANTECEDENTES

A principios del siglo XVIII se realizaron las primeras investigaciones y experimentos relacionados con la alimentación de las plantas en diferentes medios. Los primeros experimentos consistían en observar el crecimiento de las plantas en soluciones de agua con y sin tierra común. Luego gracias a los aportes realizados por los bioquímicos del siglo XIX se logró un gran avance en la práctica de la producción agrícola. Se encontró que las plantas pueden absorber nutrientes a través de soluciones empleadas en la química orgánica. Solo hasta hace un siglo realmente se avanzó en la hidroponía, recientemente se descubrió cuáles son los elementos y compuestos que son indispensables en el crecimiento de las plantas, entre los cuales están: nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio, magnesio, hierro, boro, manganeso, cobre, zinc, molibdeno. También se descubrió la importancia de la oxigenación en las soluciones y la variación de la composición de la solución dependiendo del tipo de planta. [1]

Desde los años 50 ha aumentado el interés en los cultivos hidropónicos, se han implementado varias técnicas similares como; la aeroponía, la fertirrigación y la técnica de película nutritiva o NFT. En la actualidad podemos encontrar en la red de internet y en las bibliotecas muchos proyectos y publicaciones, relacionados con el uso de sistemas electrónicos usados para el control de variables ambientales como; la humedad relativa, la temperatura, la concentración de nutrientes y sales para la producción de plantas en invernadero. [4][5][6][7][9][10]

Un ejemplo de la unión de los cultivos con la electrónica se demostró en un trabajo realizado por un estudiante de ingeniería electrónica el cual diseñó y construyó un sistema electrónico el cual era capaz de controlar los niveles de alcalinidad y salinidad. Mediante el uso de soluciones que se introducían en la solución hidropónica, se logró mantener estables los niveles de pH y nutrientes. Otro ejemplo del uso de dispositivos electrónicos en cultivos se expuso en un proyecto en el cual se diseñó un silo electrónico, con el fin de producir papa de alta calidad mediante el manejo y control de las variables como la humedad y la temperatura. Mediante la instrumentación necesaria, se senso las variables y se ajustó el sistema con un microcontrolador para que los valores fueran óptimos, accionando humidificadores y calentadores. [4][10]

Actualmente, con el surgimiento de nuevas tecnologías y la disponibilidad de herramientas que antes eran inasequibles como el acceso a bases de datos a través de la red de internet, han surgido tendencias como el "IoT" o *Internet of things*, donde podemos encontrar múltiples objetos conectados a la red de internet, entre las muchas aplicaciones podemos encontrar infraestructura de granjas y los invernaderos fusionada con la red de internet, para monitorear y controlar de manera remota las variables ambientales como la luz, la humedad y la temperatura de los cultivos. [5][6][7][11]

6. MARCO TEÓRICO

Este proyecto está compuesto de varios sistemas los cuales deberán funcionar en conjunto para cumplir con los objetivos planteados. Primero está el sistema de tuberías y tanques el cual se encarga de distribuir la solución nutritiva a las plantas y oxigenar la solución. Luego está la red de sensores que envían información de las variables de interés para el sistema. Por otro lado los actuadores se encargan de realizar funciones como el encendido o apagado de los dispositivos y por último se encuentra el sistema electrónico de control, el cual deberá tomar las decisiones de acuerdo a los valores entregados por la red de sensores. Dependiendo de cuales sean las variables de entrada, el sistema de control accionara o no el calentador, el humidificador, las válvulas y las bombas conectadas a las soluciones concentradas. La figura 1 ilustra el prototipo del sistema propuesto y la fusión de los sistemas descritos.

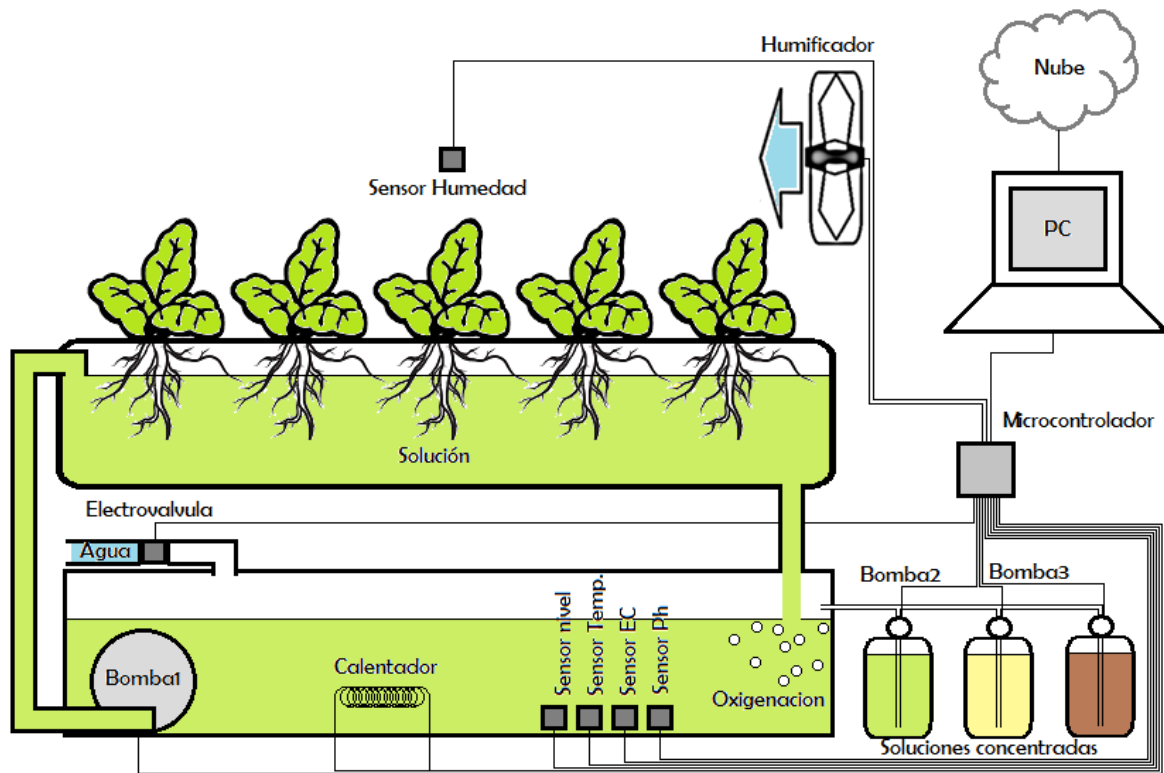


Figura 1. Ilustración del prototipo con tuberías, tanques, dispositivos eléctricos y electrónicos. [Imagen autoría propia]

6.1 HIDROPONÍA

La hidroponía es la técnica que se utiliza para cultivar plantas sin necesidad de tierra, donde las plantas son alimentadas mediante una solución sintética de agua y sales minerales diversas. Mediante esta técnica es posible establecer la composición de una solución hidropónica, y determinar la acidez y alcalinidad exacta requerida.

Las plantas son sumergidas en recipientes de poca profundidad, que contienen la solución nutritiva. Por otro lado para mantener las raíces en la oscuridad, se coloca sobre el soporte que sostiene la planta, un material poroso e inerte. Es necesario y recomendable oxigenar la solución, antes de hacerla circular por el sistema para subsanar algunos inconvenientes

La permanencia de la solución en los recipientes del cultivo puede ser variable, en algunos casos se efectúan drenajes diarios. En cuanto a la solución nutritiva empleada, su fórmula química varía ligeramente según la especie cultivada, sin embargo se ha demostrado que muchas especies se desarrollan bien con la misma fórmula. Una gran ventaja en los cultivos hidropónicos, es que la ración alimenticia de las plantas es exactamente calculada y llega a las raíces sin desperdicio posible.

Hay varias investigaciones que se basan en el estudio de sistemas para el desarrollo de plantas medicinales cultivadas con esta técnica, donde se ha constatado que el rendimiento de la producción de los alcaloides es mayor que el de plantas cultivadas en tierra.[1]

6.1.1. SISTEMAS HIDROPÓNICOS

Hay varios tipos de sistemas hidropónicos entre los cuales resaltan; la aeroponía, la fertirrigación y la técnica de película nutritiva o NFT. Los sistemas hidropónicos se diferencian por el modo en que se distribuye la solución hidropónica. En los sistemas hidropónicos abiertos, la solución es irrigada directamente en el sustrato y esta no es reutilizada, mientras en los sistemas hidropónicos cerrados, la solución es reutilizada y las raíces de las plantas flotan en la solución o en el aire.[1][2]

6.1.1.1 FERTIRRIGACIÓN

La Fertirrigación es la técnica en la cual los fertilizantes son aplicados junto con el agua de riego. Es una técnica muy usada en países desarrollados y es un componente de los modernos sistemas de riego a presión como; aspersión, micro aspersión, pivote central, goteo, exudación, etc. Con esta técnica, se puede controlar la dosis, la concentración y la relación de fertilizantes. En la fertirrigación, los nutrientes son aplicados diluidos en el agua de riego con el fin de infiltrarlo en el suelo, predominando la absorción radicular y no la foliar, es decir predomina la absorción por las raíces. El conocimiento del comportamiento de los nutrientes en el suelo con relación a su movilidad y la exigencia del cultivo durante su ciclo, son factores importantes a considerar en el manejo de los fertilizantes. [2]

6.1.1.2 SISTEMA NFT

El sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique) en español Técnica de capa nutritiva, consiste en la circulación constante de una lámina fina de solución nutritiva que pasa a través de las raíces del cultivo, no existiendo pérdida o salida al exterior de la solución nutritiva, por lo que es un sistema de tipo cerrado. A diferencia del sistema propuesto para las huertas hidropónicas populares, las plantas se cultivan en ausencia de sustrato, por lo cual las plantas se encuentran suspendidas en canales de cultivo con o sin un contenedor de soporte. Otra característica del sistema, es la necesidad de contar con una pendiente o desnivel de la superficie de cultivo, ya que por medio de ésta, se posibilita la recirculación de la solución nutritiva.

Una de las ventajas que ofrece el sistema NFT es su mayor eficiencia en cuanto a la utilización de los elementos minerales esenciales para el crecimiento de las plantas, de agua y oxígeno. En contraste a los sistemas hidropónicos populares de sustrato sólido o raíz flotante, el NFT maximiza el contacto directo de las raíces con solución nutritiva que es constantemente renovada y por ende el crecimiento es acelerado siendo posible obtener en el año más ciclos de cultivo. Con la ausencia de sustrato se evitan las labores de desinfección de éste, así como se favorece el establecimiento de una alta densidad de plantación. [3]

6.1.1.3 AEROPONÍA

La aeroponía es un tipo de cultivo hidropónico, el cual se diferencia de los demás porque las raíces de las plantas, se encuentran suspendidas en el aire. El agua es esparcida por las raíces en intervalos de tiempo para que las raíces interactúen con el aire y absorban mejor los nutrientes. Hay varios aspectos que resaltan en los cultivos aeróponicos; las cosechas son múltiples y secuenciales, la semilla proveniente de aeroponía produce igual que la semilla convencional. El cultivo aeróponico depende mucho de la disponibilidad de energía eléctrica, cortes de energía por periodos prolongados pueden conllevar a la pérdida total del ciclo de producción. La producción es particularmente sensible al clima, la aeroponía no funciona bien en ambientes calientes, a no ser que se condicionen costosos equipos de refrigeración, lo que aumentaría los costos de producción. La aeroponía ofrece el potencial de mejorar la producción y reducir los costos en comparación con los métodos convencionales. La aeroponía explota eficientemente el espacio vertical del invernadero y el balance humedad-aire para optimizar el desarrollo de raíces, tubérculos y follaje. [11]

6.1.2. COMPONENTES DEL SISTEMA HIDROPÓNICO

Los sistemas hidropónicos en general se componen de varios elementos que funcionan en conjunto, estos elementos son; el tanque, las tuberías o cajones, la bomba y la solución. El tanque se encarga de contener la solución nutritiva mientras las tuberías distribuyen la solución hacia las plantas, por otro lado la bomba recircula la solución en el tanque mientras la solución alimenta las plantas. Las tuberías se ubican arriba del tanque para que la solución caiga y se oxigene. En la figura 2 se ilustra un ejemplo práctico de un sistema hidropónico en el cual se emplea cajones por donde pasa la solución hidropónica. [1]

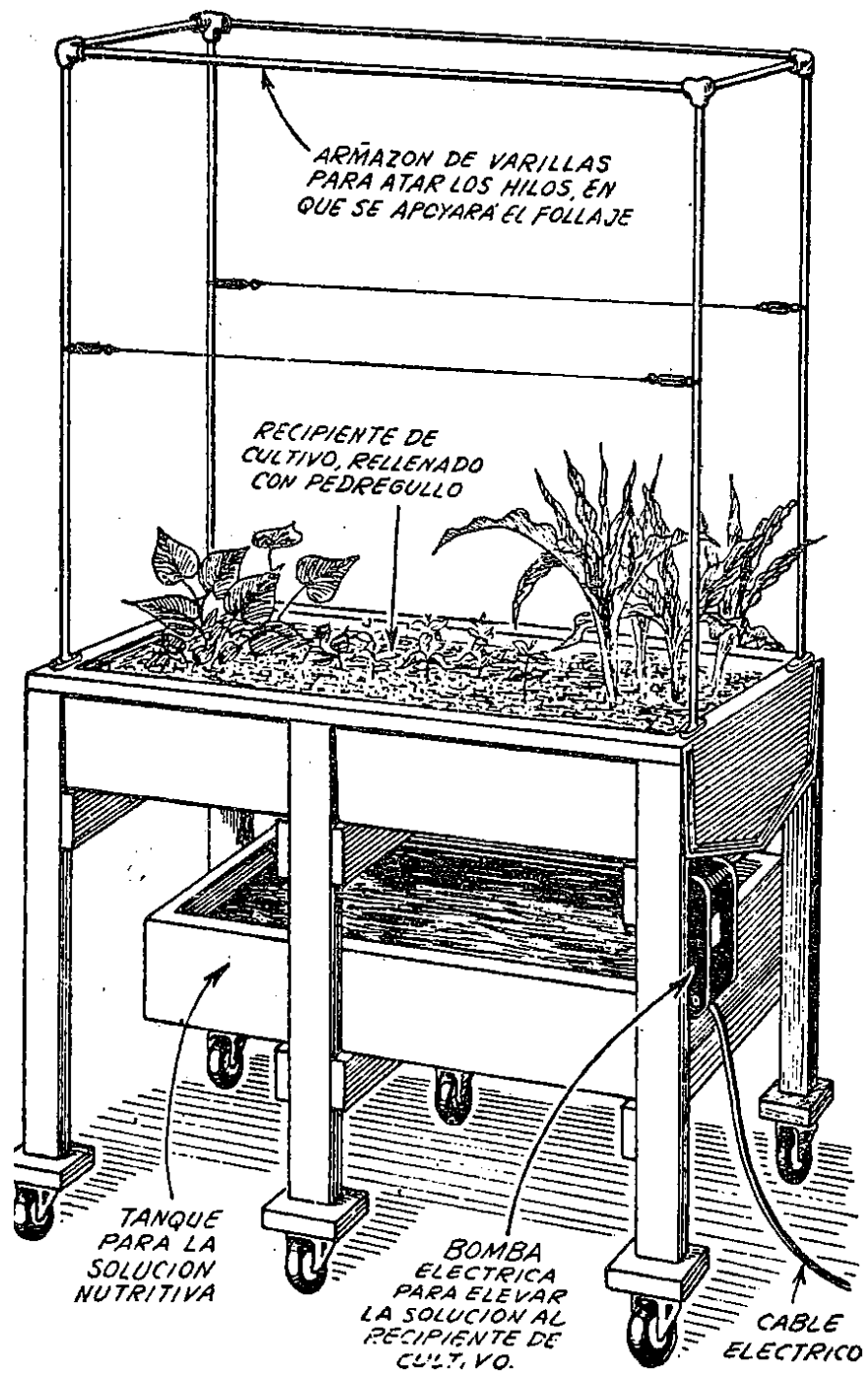


Figura 2. Ejemplo práctico de un sistema hidropónico, utilizando cajones de madera y una bomba eléctrica. Fuente: Huterwal (1989) [1]

6.1.3 SOLUCIÓN NUTRITIVA

La composición de la solución nutritiva depende de varios factores en especial el tipo de planta que se pretende cultivar. La solución nutritiva está hecha de varios elementos y compuestos los cuales alimentan a las plantas. Existen varias fórmulas comerciales que sirven para muchas especies, asimismo hay fórmulas más especializadas para especies más delicadas. Entre las fórmulas más conocidas y usadas en el mercado se encuentra un conjunto de tres fórmulas.

Las tres fórmulas se titulan A, B y C. Están destinadas para ser usadas en cultivos en los que se controla rigurosamente el estado de la solución, con el objeto de que las plantas dispongan estrictamente de los elementos necesarios y puedan apreciarse en su desarrollo los efectos de las variantes que el hidrocultor realiza, para poder obtener cualidades novedosas en los colores de las flores, la consistencia, calidad de frutos, etc. El empleo de la fórmula requiere que se utilicen sustancias químicas puras, desechándose por lo tanto las de uso industrial. La concentración de los compuestos de la solución normalmente se calcula en partes por millón.

En la tabla 1 2 y 3, se muestra la concentración de los compuestos que son disueltos en 100 litros de agua para conformar cada solución.

Solución A	
Compuesto	Peso
Nitrato de Potasio, KNO_3	68,04 gramos
Nitrato de Calcio, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	45,04 gramos
Sulfato de Magnesio, MgSO_4	22,68 gramos
Fosfato ácido de Potasio, KH_2PO_4	22,68 gramos

Tabla 1. Solución hidropónica A. Fuente: Huterwal (1989) [1]

Si los recipientes de cultivo son de menor capacidad, puede conservarse lo que no se emplea de inmediato, pero para esto se aconseja disolver por separado cada ingrediente en botellas de medio litro de agua, utilizándose la medida que se necesite reponer en la solución.

Solución B	
Compuesto	Peso
Nitrato de manganeso, $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$	5,4 gramos
Sulfato de Zinc, ZnSO_4	0,44 gramos
Sulfato de cobre, $\text{CuSO}_4\text{H}_2\text{O}$	0.005 gramos
Potasio iodado, KI	0,04 gramos
Ácido Bórico, H_3BO_3	0,2 gramos

Tabla 2. Solución hidropónica B. Fuente: Huterwal (1989) [1]

Es necesario disolver cada ingrediente en un litro de agua, con excepción del ácido bórico. De esta solución se utilizan 50 centímetros cúbicos por cada 94 litros de la solución A, a la que serán agregados semanalmente comenzando desde la tercera semana de iniciado el cultivo. Igual cantidad se agrega de la solución de ácido bórico, que deberá ser conservado en la botella aparte.

Solución C	
Compuesto	Peso
Nitrato Férrico, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$	8,00 gramos
Ácido Cítrico, C. P., $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	25,00 gramos
Hidróxido de calcio	22,68 gramos

Tabla 3. Solución hidropónica C. Fuente: Huterwal (1989) [1]

El nitrato férrico debe ser disuelto en 1 litro de agua. Cada semana, desde el principio, se agregara a la solución del cultivo 100 cc. O con más frecuencia para conservar las hojas verdes. El ácido cítrico se disuelve en 200 centímetros cúbicos de agua y deberá usarse de esta solución agregando gotas de la misma a la solución del cultivo para mantener el debido grado de acidez de la misma. El hidróxido de calcio se disuelve en 1 litro de agua. Se le empleara excepcionalmente, cuando se constata que la solución del cultivo está demasiado acida, lo que puede perjudicar a ciertas plantas. [1]

6.1.4. ELECTRO CONDUCTIVIDAD Y PH

La electro conductividad es el valor obtenido apartir de la medición de la conductividad eléctrica en una sustancia, esta medida permite saber cuál es la cantidad de sales o iones disueltos en una sustancia liquida. Una solución conduce más electricidad, cuando la concentración de sales es mayor, esta propiedad permite medir la salinidad de una solución en términos de conductividad eléctrica. La unidad para expresar la conductividad es Siemens por metro (S/m), sin embargo en la industria se usa la unidad micro Siemens por centímetro o (uS/cm). En la tabla 4 se muestran los valores de la electro conductividad de la solución nutritiva y la tolerancia relativa a la salinidad para varias especies de plantas.

El pH es el índice que permite indicar la concentración de iones hidrógeno contenidos en una solución, también el pH expresa el grado de acidez o alcalinidad de una solución. La escala de pH varía del 0 a 14, las soluciones con pH menor que 4 o mayor que 9, no deben emplearse para la producción vegetal. Si el pH de la solución nutritiva es menor a 4 la solución es demasiado acida, y si el pH de la solución nutritiva es mayor a 9 la solución es demasiado alcalina. Una solución con pH igual a 7 es neutra, si el pH es inferior a 7 corresponde acides, si es superior a 7 corresponde alcalinidad. En la tabla 5 se muestra una escala aproximada del nivel de acidez o alcalinidad de una solución.

Uno de los factores más importantes en la industria hidropónica es mantener la debida acides o alcalinidad de la solución nutritiva. A veces, el éxito o fracaso del cultivo es debido a este factor, sin embargo con un manejo y control preciso del pH es posible generar cultivos sanos y productivos. Si la solución nutritiva es demasiado acida puede corregirse añadiendo una solución alcalina, por el contrario si la solución nutritiva es alcalina puede corregirse añadiendo una solución acida. [1]

Especie	Conductividad (uS/cm)	Tolerancia a la salinidad
Brócoli	1900	Moderadamente sensible
Tomate	1700	Moderadamente sensible
Lechuga	900	Moderadamente sensible
Cebolla	800	Sensible
Zanahoria	700	Sensible
Apio	1200	Moderadamente sensible
Espinaca	1300	Moderadamente sensible
Maíz	1100	Moderadamente sensible
Arroz	2000	Moderadamente sensible
Trigo	4000	Tolerante
Cebada	5300	Tolerante

Tabla 4. Conductividad en el agua de la solución para varias especies y su tolerancia relativa. Fuente: Huterwal (1989) [1]

pH 4 o menos	Muy ácida
pH 5	Moderadamente ácida
pH 6	Ligeramente ácida
pH 7	Neutra
pH 8	Ligeramente alcalina
pH 9	Moderadamente alcalina
pH 10 o más	Muy alcalina

Tabla 5. Escala aproximada de apreciación de la acidez o alcalinidad de una solución. Fuente: Huterwal (1989) [1]

6.1.5. SINTOMATOLOGÍA

A partir de la observación del estado físico de las plantas, es posible determinar las deficiencias y excesos en la solución nutritiva. Dependiendo de cuál sea el elemento que falte o sobre, las plantas presentan varios síntomas, por ejemplo suelen presentar señales como la presencia de manchas, cambios de color en las hojas y crecimiento anormal. El conocimiento acerca de la sintomatología de los cultivos, ha sido adquirido con el tiempo de manera experimental y empírica. A partir de las observaciones hechas por científicos y agricultores se determinaron cuáles son los síntomas asociados a la falta o exceso de cada elemento. En la figura 3, se muestran cuatro ejemplos de síntomas asociados a la falta de elementos como; Nitrógeno, Potasio, Hierro y Manganeso.



Falta de Nitrógeno: Hojas pequeñas y pálidas con tallos débiles



Falta de Potasio: Márgenes color café (marrón) y quebradizos. Flores pequeñas



Falta de Hierro: Las hojas jóvenes son las más afectadas por grandes manchas de color amarillo



Falta de Manganeso: Coloración amarilla entre la nervadura de la hoja. Afecta principalmente a las hojas viejas

Figura 3. Ejemplo de síntomas en una hoja asociados a la falta de elementos como; Nitrógeno, Potasio, Hierro y Manganeso. Fuente: Huterwal (1989) [1]

Hay muchas claves descriptivas las cuales varían de acuerdo a las observaciones de los autores, la siguiente clave es de un científico de la universidad de Ohio llamado Arnold Wagner, en esta clave se describen los síntomas asociados a la deficiencia de cada elemento. [1] Las carencias de los diferentes elementos se evidencian de la siguiente forma:

Deficiencia de Nitrógeno:

- Mal desarrollo. Plantas de menor altura. Hojas pequeñas y raquíticas. Planta desmedrada. Entrenudos cortos.
- Las hojas se vuelven de color verde amarillento y más tarde completamente amarillas.
- Los nervios toman con frecuencia color purpúreo.
- Las flores son más pequeñas de lo normal.
- Las raíces toman con frecuencia mayor desarrollo que la parte aérea.
- La deficiencia se presenta en primer lugar en las hojas inferiores.

Deficiencia de Fósforo:

- Se distinguen dos fases; Primer período: las hojas amarillean en los márgenes. Período avanzado: muerte y caída gradual de las hojas de la parte inferior de la planta.
- Desarrollo imperfecto.
- Sistema radicular deficiente.

Deficiencia Potasio:

- Amarillez de los márgenes de las hojas en el primer período, seguida de color castaño, o la muerte de esas zonas amarillas. Esto da la apariencia de planta chamuscada.
- Más tarde aparecen manchas en los nervios.
- Las plantas son más susceptibles a los insectos y enfermedades.
- La deficiencia se presenta en las hojas inferiores

Deficiencia de Hierro:

- Clorosis, amarillez del follaje.
- Aparece primero en la parte superior de la planta.
- Retraso del crecimiento.
- En las últimas fases las hojas cloróticas se queman intensamente. Esto empieza en la punta y los márgenes y se extiende hacia el interior.

Deficiencia de Magnesio:

- Planta desmedrada.
- Clorosis. Los nervios permanecen verdes, en tanto que las áreas intermedias se vuelven amarillas.

- Las hojas se arrugan.
- Esta deficiencia se manifiesta primero en las hojas de la parte inferior de la planta.
- Hojas pequeñas. El pecíolo de las hojas es corto.
- En las últimas fases aparecen regiones muertas entre los nervios de las hojas. La aparición de estas regiones muertas es casi repentina.
- La floración se retrasa. Las flores tienen mal color.

Deficiencia de Calcio:

- Las raíces alimenticias mueren casi todas.
- La planta muy desmedrada.
- El extremo de la planta y los extremos de las hojas superiores mueren.

Deficiencia de Manganeso:

- Clorosis. Color verde amarillento entre los nervios y el resto verde oscuro. Esta deficiencia se distingue de la del magnesio en que la clorosis aparece primero en la parte superior de la planta, mientras que en la falta de magnesio aparece primero en las hojas inferiores.
- Plantas algo raquíticas.
- Las hojas tienden a abarquillarse en los márgenes, hacia el envés.

Deficiencia de Azufre:

- La deficiencia se manifiesta primero en la parte superior de la planta.
- Clorosis, que difiere de los otros tipos de clorosis en que los nervios toman color amarillo, mientras que el resto de las hojas permanece verde.
- La planta toma menor altura.
- En la base de las hojas aparecen manchas purpúreas de tejido muerto

6.1.5.1 SALES PARA CORREGIR LAS DEFICIENCIAS

La observación de las plantas indica al hidrocultor qué elementos químicos faltan en las plantas o cuáles están en exceso, logrando hacer las correcciones necesarias, agregando lo que falta o reduciendo lo que está en exceso. Para corregir las deficiencias no es necesario emplear gran número de sales. Son suficientes cuatro:

Nitrato de Calcio	$(\text{NO}_3)_2 \text{ Ca}$
Nitrato de Potasio	$\text{NO}_3 \text{ K}$
Fosfato Mono cálcico	$(\text{PO}_4)_2 \text{ H}_4 \text{ Ca}$
Sulfato de Magnesio	$\text{SO}_4 \text{ Mg}$

Tabla 6. Sales para corregir deficiencias en la solución nutritiva. Fuente: Huterwal (1989) [1]

Estas cuatro sales suministran el nitrógeno, el potasio, el fósforo y el magnesio, además el calcio y el azufre. Esto es así en la práctica corriente, cuando no se emplean sales químicamente puras. Empleando fertilizantes comunes o sales de uso industrial, las cuatro sales mencionadas contienen los restantes elementos de impurezas y generalmente en cantidades suficientes, con la posible excepción del hierro y el manganeso, que en este caso pueden ser compensados utilizando soluciones preparadas. [1]

6.2. CULTIVO DE LECHUGA

La lechuga es una hortaliza usada comúnmente en ensaladas, la mayoría de las variedades de lechuga que se cultivan comercialmente son producto de la hibridación. Su valor en el mercado se da por el alto contenido de vitaminas. En algunos países como China y Egipto, los tallos se consumen en vez de las hojas de lechuga, ya sea cocida o en crudo. Algunos usos menos comunes para las lechugas incluyen un cigarrillo sin nicotina a partir de hojas de lechuga, aceite comestible extraído de las semillas de lechugas silvestres, y un sedante de látex que se obtiene a partir de tallos y otros tejidos de lechuga que se utiliza para fabricar un medicamento inductor del sueño.[12]

6.2.1. CONDICIONES AMBIENTALES

La lechuga permite ser cultivada en regiones templadas y subtropicales. Se adapta mejor a las bajas temperaturas que a las altas. La temperatura óptima para el crecimiento oscila entre los 18 a los 23 °C durante el día y de 7 a 15 °C durante la noche. En casos extremos la lechuga tolera una temperatura máxima de 30 °C y una temperatura mínima de hasta -1 °C. [12]

La cantidad de radiación solar es muy importante para el cultivo de lechuga, no toda la radiación que se recibe es aprovechada, una parte del espectro es perdida. El requerimiento de horas luz en la lechuga llega ser de una intensidad de 8 Watt por metro cuadrado, con una duración de 14 a 15 horas luz. Es recomendable una intensidad de luz de 200 a 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$. [12]

El cultivo de lechuga requiere para su mejor desarrollo una humedad relativa del 60 al 80%, aunque puede tolerar humedades menores a 60 %. Por otro lado, el requerimiento nutricional para producir una tonelada de lechuga, suele ser de; 2 kg de nitrógeno, 0.5 kg de fósforo, 4.3 kg de potasio, 0.9 kg de calcio, 0.2 kg de magnesio. [12]

6.2.2. PLAGAS

Varias plagas suelen atacar al cultivo de lechuga, entre las más importantes se encuentran: el pulgón verde del duraznero (*Myzus persicae*) y el minador de las chacras (*Liriomyza huidobrensis*). El pulgón Verde puede ser combatido con su depredador natural; el coccinélidos el cual es un insecto coleóptero de la familia Cucujoidea. La limpieza y la inspección diaria de las plantas sirven para prevenir brotes de este tipo de plaga.[1]

En general para controlar las enfermedades y plagas, es mejor primero buscar una solución biológica antes de usar una medida química. Es posible buscar una solución natural como los depredadores de las plagas para contrarrestar los síntomas. Al evitar usar medidas como los pesticidas químicos, se evitan problemas asociados a la absorción de toxinas dañinas que perjudiquen al cultivo o afecten al consumidor final.

6.2.3. OBTENCION DE LAS PLANTULAS

Las plántulas se pueden obtener en invernaderos o almacenes dedicados a vender las plántulas de la especie que se necesite, sin embargo también es posible obtener las plántulas en semilleros hechos en casa siempre y cuando se cumplan las condiciones ambientales correctas. La temperatura óptima para sembrar es entre 15° y 21°C en un lugar sombreado. Las semillas se ubican en los semilleros con una capa de arena, tierra y abono orgánico. El trasplante se hace cuando las plantas en el almácigo hayan alcanzado el desarrollo de cinco hojas. Las plantas que pasan del semillero a las tuberías, se sumergen en un vaso con solución nutritiva y se sacuden suavemente de modo que desprenda la tierra adherida. Es importante evitar que a las raíces no les irradie el sol directamente.

6.3 SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control opera apartir de un sistema electrónico el cual se compone de varios dispositivos como microcontroladores, sensores, actuadores y periféricos. Para controlar las variables del cultivo hidropónico, el sistema electrónico realiza varias tareas simultáneamente. El sistema de control electrónico acciona los actuadores de acuerdo a la información obtenida en los sensores. El control de las variables del cultivo se realiza mediante la implementación de algoritmos de control como los controladores PID. Algunos dispositivos como sistemas embebidos y PLCs, permiten ser programados como servidores web para desplegar la información y los estados del sistema.

El control de las variables ambientales se realiza mediante la implementación de algoritmos de control en lazo cerrado, los cuales calculan el valor de las salidas de acuerdo a los valores entregados por los sensores de temperatura y humedad. Los actuadores implementados en el control de la temperatura y la humedad pueden ser resistores en el caso de la temperatura y humidificadores para la humedad.

El control de la concentración de las soluciones nutritivas se realiza mediante la implementación de algoritmos de control en lazo cerrado, al igual que en el ocurre en el caso del control de la temperatura y humedad. El sistema de control de la concentración de las soluciones nutritivas, acciona las salidas de acuerdo a la información entregada por los sensores de pH y EC. Los actuadores que operan en el sistema de control de la concentración de las soluciones nutritivas son motobombas conectadas a tanques con soluciones nutritivas concentradas.

Generalmente los sistemas de control electrónico permiten interactuar con ellos mediante una interfaz ya sea grafica o por medio de periféricos. Los servidores web despliegan información mediante páginas web en donde es posible mostrar el estado del sistema mediante una interfaz gráfica, también es posible interactuar con el sistema para realizar modificaciones en los estados como los setpoint de las variables.

En La figura 4 se muestra el diagrama P&ID del sistema, el cual indica e ilustra la conexión de los dispositivos del sistema y los procesos asociados a cada elemento.

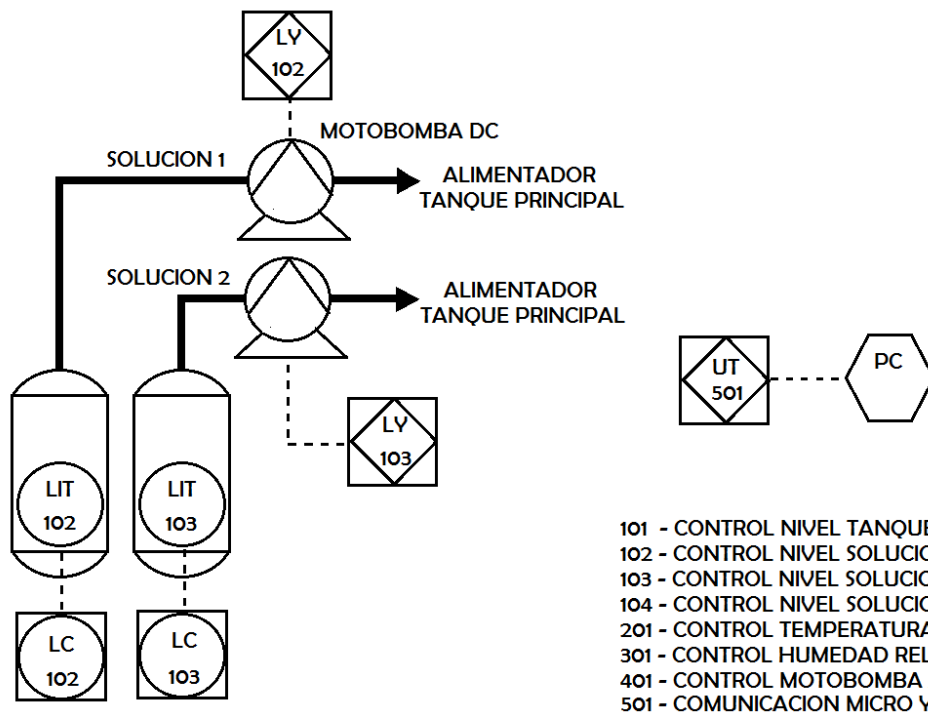
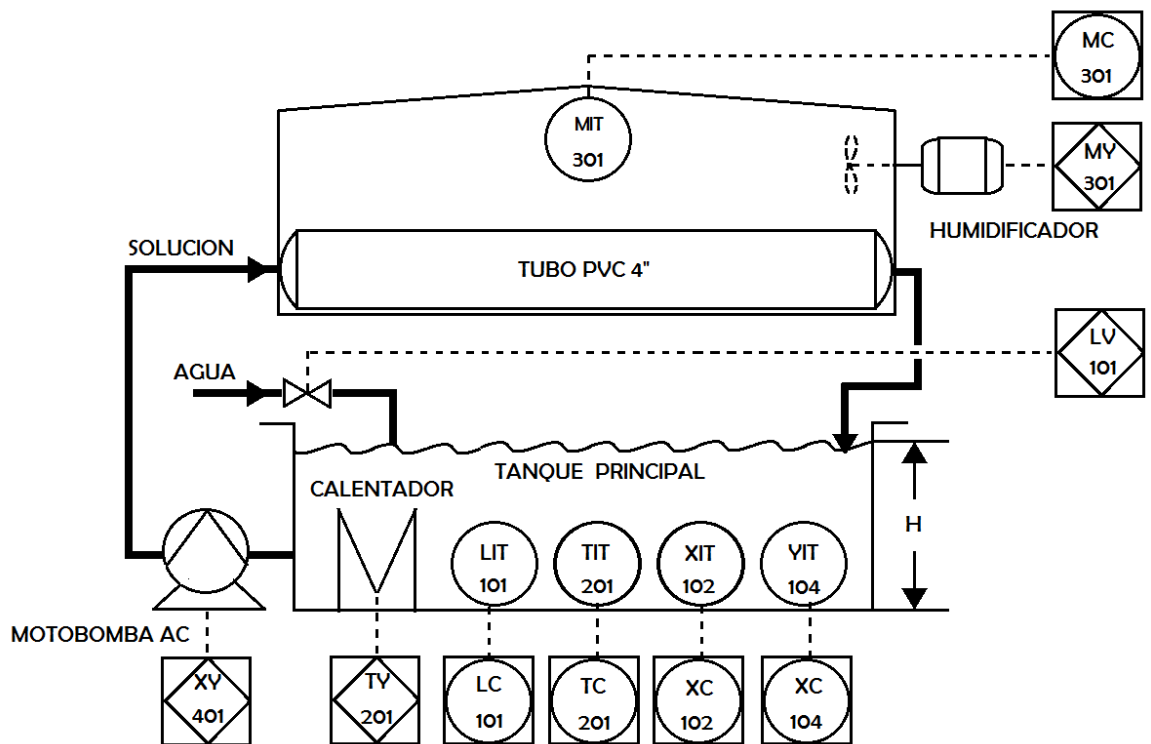


Figura 4. Diagrama P&ID del sistema. [Imagen autoría propia]

6.3.1 CONTROL PID

Más de la mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan sistemas de control PID. Los controladores PID pueden ser implementados de manera analógica o digital, sin embargo por lo general se implementan en forma de algoritmos mediante el uso de microcontroladores.

Los controladores PID suelen ser ajustados de acuerdo a la planta que se utilice y pueden ser sintonizados de varias maneras. El control PID se compone de tres bloques; el control proporcional, el control derivativo y el control integral, para sintonizar un controlador PID se calculan o se modifican las constantes de cada bloque. En la figura 5 se muestra el diagrama de bloques de un control PID para una planta o un proceso.

Algunos métodos de sintonización dependen del modelo matemático de la planta, sin embargo cuando no es posible obtener un modelo matemático de la planta, es posible sintonizar el control PID mediante métodos experimentales. Hay varias maneras de sintonizar un controlador PID, entre ellas encontramos: Ziegler y Nichols, el método convencional de respuesta en frecuencia y el método de optimización computacional, esto entre los métodos normalmente más utilizados. [13]

En el campo de los sistemas de control, los esquemas de control PID básicos y modificados han demostrado su utilidad para aportar un control satisfactorio, sin embargo en muchas situaciones específicas no aportan un control óptimo. [13]

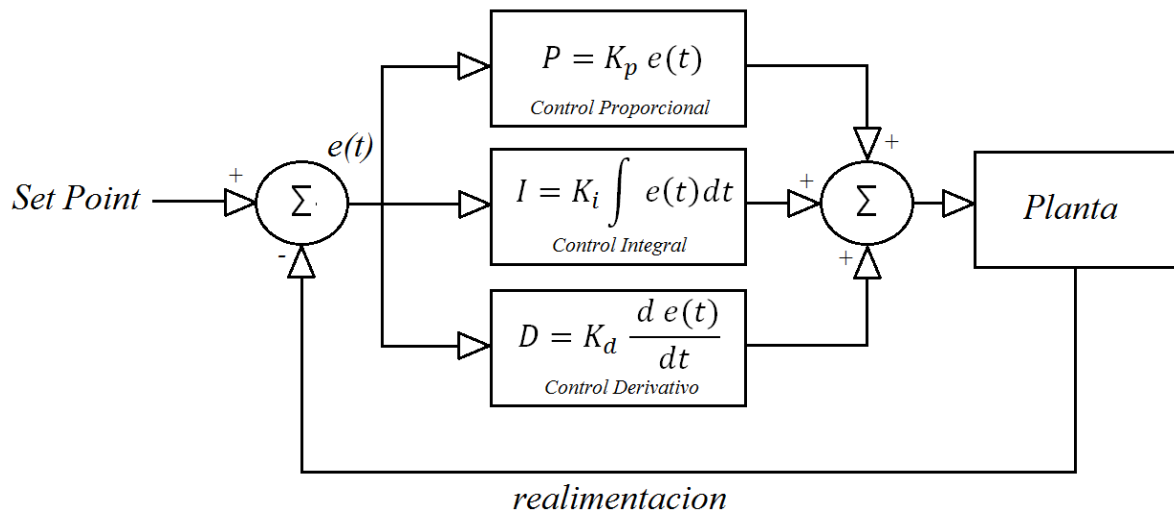


Figura 5. Diagrama de bloques de un control PID para una planta [13].

6.3.2 SENSORES

El sistema de control digital debe obtener los valores de las variables, para ejecutar las acciones necesarias. Estos valores son entregados por la red de sensores que proporcionan los datos, en este caso las variables ambientales y los niveles de la solución en los tanques. Para cada variable es necesario usar un sensor específico.

6.3.2.1 SENSOR DE NIVEL

El sensor de nivel indica la altura del contenido de un recipiente por lo general un tanque de alguna materia prima como un líquido. Hay sensores de nivel análogos y de tipo ON OFF, cuando el contenido de un tanque llega a cierto nivel predeterminado, el sensor se activa o desactiva, en este caso el sensor es del tipo ON OFF. Los sensores de nivel del tipo análogo son capaces de medir el nivel en un rango determinado por la capacidad y especificaciones del sensor, su salida puede ser un voltaje análogo. En el mercado se pueden encontrar sensores de nivel del tipo capacitivo, magnético, ultrasónico y de flotador. En la Figura 6 se muestra un sensor de nivel del tipo flotador como el que se usa en el tanque principal del cultivo hidropónico.



Figura 6. Sensor de nivel [14]

6.3.2.2 SENSOR EC

El sensor de conductividad eléctrica es ideal para conocer parámetros importantes que afectan el entorno de la zona de las raíces de las plantas como la salinidad del suelo, en los sistemas de agua de riego o las soluciones de fertilizantes, donde se genera un efecto significativo en el crecimiento y la calidad de las plantas, la presencia de altos niveles de sal es una señal de advertencia y los niveles bajos de sal pueden conducir a deficiencias de nutrientes. La conductividad del agua puede reflejar el nivel de electrolitos presentes en el agua. Dependiendo de la concentración del electrolito, la conductividad de la solución es diferente. Es utilizado en monitoreo de la calidad del agua, la acuicultura, hidropónico y acuapónico. En la figura 7 se ilustra la forma y conexión de un sensor de conductividad Dfrobot DFR0300, este sensor es alimentado por un voltaje de 5V y tiene un rango de operación de 1ms/cm--20ms/cm.

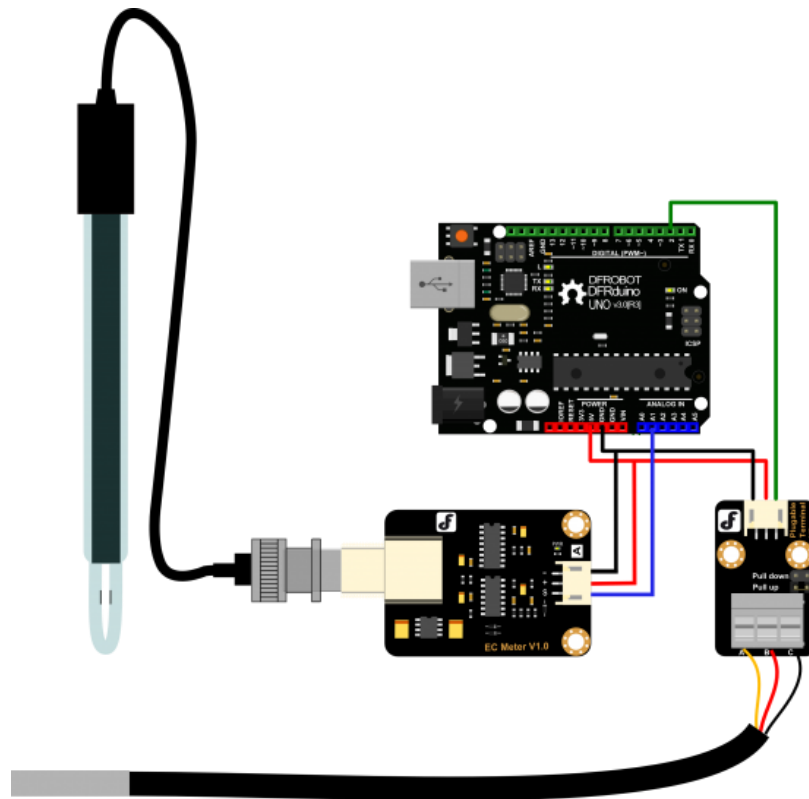


Figura 7. Forma y conexión del sensor de conductividad Dfrobot DFR0300. [15]

6.3.2.3 SENSOR HUMEDAD

El sensor Humedad es útil para que el sistema de control calcule cuando es conveniente usar el humidificador. El dispositivo DHT11 es un sensor que se compone de un sensor de temperatura y uno de humedad, cuenta con una salida de señal digital. Este sensor adquiere los valores de la temperatura y la humedad del ambiente y las convierte en señales digitales, también garantiza una alta fiabilidad y una excelente estabilidad. Este sensor realiza la medición de la humedad mediante un componente de tipo resistivo y un componente de medición de temperatura tipo NTC. La interfaz en serie mediante un solo cable hace que el acceso a los datos sea rápido y fácil. El rango de operación del sensor esta entre 20% a 90% de RH. Por otro lado su pequeño tamaño permite tener un bajo consumo de energía. La figura 8 se muestra el sensor de Temperatura y Humedad DHT11 y sus respectivos pines.



Figura 8. Sensor de Temperatura y Humedad DHT11 con pines. [16]

6.3.2.4 SENSOR TEMPERATURA

Para sensar la temperatura hay varias opciones que dependen del medio en el que se pretende obtener la medición, si el medio es el aire puede ser conveniente usar un DHT11 o DHT22, sin embargo si el medio es un líquido es posible obtener el valor de la medición con un DS18B20, este sensor esta empaquetado en un To-92 el cual se encuentra en forma de sonda sumergible y cuenta con tres terminales, dos de alimentación y uno de comunicación. El pin de comunicación permite ingresar y leer datos por un solo cable, el rango de operación es de -55°C hasta +125°C y la resolución puede ser de 9 a 12 bits programables.

6.3.2.5 SENSOR PH

Es importante conocer el índice de PH de la solución que alimenta las plantas y que se encuentra dentro del tanque principal, ya que las plantas precisan un equilibrio entre la acidez y la alcalinidad. Es por esto que el sensor de PH es de suma importancia para que el sistema logre el equilibrio requerido. El PH0-14 es un sensor de PH que opera en un rango de temperatura de 0 a 80 grados centígrados y puede indicar el PH de 0-14. En la figura 9 se ilustra el PH0-14.

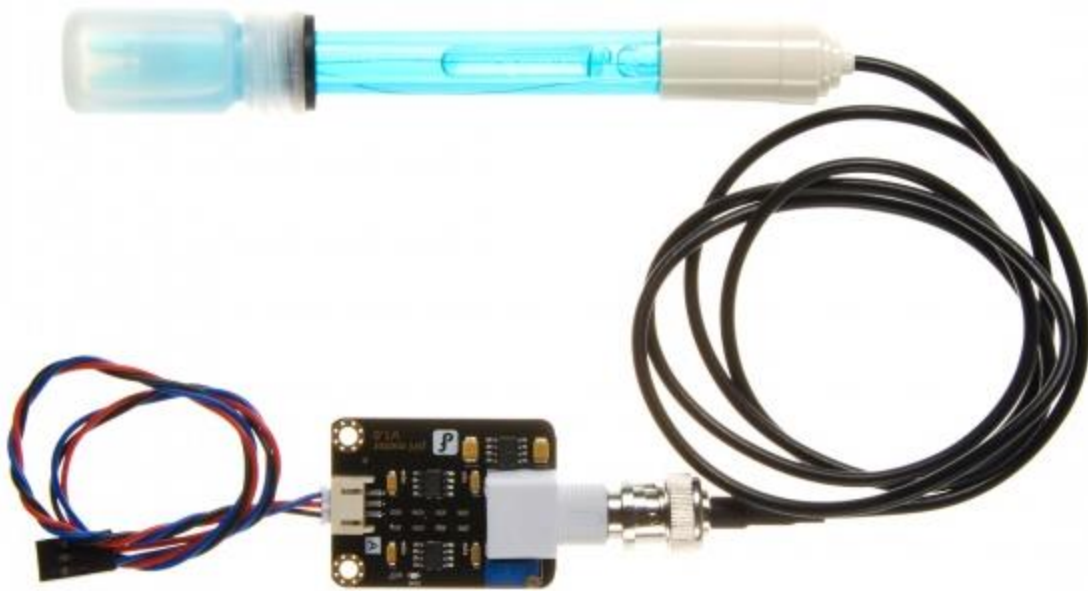


Figura 9. Sensor de Ph PH0-14. [15]

6.3.3 ACTUADORES

Una vez procesada la información enviada por los sensores, el sistema de control digital toma las decisiones más adecuadas para accionar los actuadores y así realizar las tareas programadas. El sistema electrónico cuenta con varios actuadores; Bomba DC, Calentador, Humidificador, Bomba AC y electroválvula.

6.3.3.1 BOMBAS DC

Las Bombas DC son las encargadas de bombear las soluciones concentradas al tanque principal. Debido a su reducido tamaño son ideales para manejar pequeñas cantidades de la solución concentrada, el caudal es aproximadamente de 800 ml/Min y el control se realiza mediante transistores accionados con PWM.

En la figura 10 se muestra una típica bomba de 12V.



Figura 10. Bomba de 12V. [17]

6.3.3.2 CALENTADOR

El calentador es esencial para mantener la temperatura requerida por la especie de planta a cultivar, en este caso lechuga. Para este proyecto se puede usar un calentador para acuarios debido al reducido tamaño del prototipo, sin embargo para un cultivo de mayor escala es necesario recurrir a algún otro dispositivo que sea capaz de calentar un volumen mayor de agua, como una resistencia de mayor potencia.

6.3.3.3 BOMBA AC

La bomba AC es la encargada de bombear la solución nutritiva del tanque principal al sistema de tuberías que alimentan las raíces de las plantas. Es necesario que el sistema de tuberías se ubique a una altura mayor a la del tanque principal para que la solución caiga a determinada altura y oxigene la solución en el tanque principal. En el mercado se pueden encontrar bombas AC a bajos costos que son capaces de bombear un caudal de 2000 litros por hora a alturas de 2 metros.

6.3.3.4 HUMIDIFICADOR

El humidificador es el componente eléctrico encargado de mantener la humedad en el nivel determinado. El sistema de control electrónico acciona el humidificador cada vez que el nivel está por debajo del punto establecido. El humidificador es un mecanismo que se puede construir de varias formas y configuraciones aunque el objetivo final es humedecer el ambiente generando vapor de agua para esparcirlo en el entorno cercano. Se puede generar vapor de agua con alguna fuente de calor como una resistencia y propagar el vapor mediante un ventilador. También hay humidificadores de ultrasonido los cuales mediante la vibración a altas frecuencias generan una capa de vapor en la superficie del líquido. En la figura 11 se muestra un humidificador ultrasónico que genera vapor mediante vibraciones ultrasónicas.



Figura 11. Humidificador ultrasónico.[18]

6.3.4 INTERNET OF THINGS (IoT)

La invención del internet abrió un mundo de múltiples posibilidades conectando a las personas de todo el mundo. Al principio el internet se creó para poder acceder a sitios virtuales tanto académicos como gubernamentales, sin embargo fue evolucionando y se volvió más accesible a más personas dando la oportunidad de encontrar sitios dedicados al entretenimiento y el uso personal del público en general. Gracias al progreso de la tecnología ha sido posible acceder a dispositivos más baratos e inteligentes lo que ha permitido conectar objetos cotidianos con la red de internet haciendo posible el monitoreo o el control de manera remota.

Aun cuando en la actualidad se carece de una definición estándar para IoT (Internet of Things) o en español Internet de las Cosas (IdC) se conoce como una red de objetos “inteligentes” que utilizan tecnologías para comunicarse entre ellos y con el entorno que les rodea; es decir todo aquello que, utilizando algún tipo de tecnología, es capaz de conectarse a Internet o con otros objetos. [19]

Como resultado de la revolución del internet y su respectivo impacto sobre las relaciones sociales, el Internet de las cosas se presenta como una nueva forma de vivir e interactuar el mundo no solo real sino digital, permitiendo generar más conocimiento a partir de la recolección de datos obtenidos por estos dispositivos y asimismo evaluar la posibilidad de controlar el entorno.[19]

En el mercado actual se pueden encontrar diferentes opciones en cuanto a los dispositivos que se pueden usar para los proyectos relacionados con IoT. Entre los más comunes se encuentran; la Raspberry en sus diferentes configuraciones y modelos la cual presenta la posibilidad de funcionar en varios sistemas operativos como Raspbian y Windows, la Raspberry posee 40 pines que pueden ser usados para múltiples propósitos. Otro dispositivo usado en aplicaciones de IoT es la ESP, la cual es un microcontrolador de bajo coste que se presenta en forma de un pequeño chip y se programa generalmente mediante el software Arduino, la ESP permite programar 16 pines de propósitos generales, también permite acceder a internet mediante Wifi. En la figura 12 se muestra una ESP8266 NodeMCU V3 con sus respectivos Pines.

La tarjeta ESP8266 NodeMCU es un dispositivo basado en el chip ESP 12, el cual permite implementar proyectos en el área del Internet de las cosas, puede ser programado en varias plataformas Open Source como Arduino y MicroPython. El ESP8266 NodeMCU posee un procesador de 32 bits que trabaja a una frecuencia de 80MHz, tiene una memoria RAM de instrucción de 64KB y 96KB de datos. La capacidad de la memoria flash es de 4MB con posibilidad de aumentar a 16MB. [20]

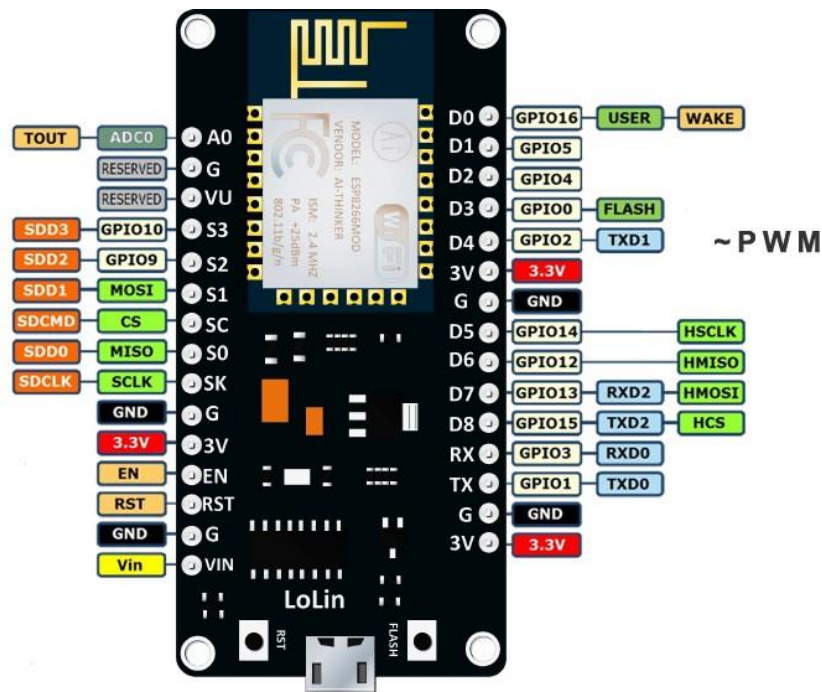


Figura 12. ESP8266 NodeMCU V3 con sus respectivos Pines. [21]

La conexión a internet se realiza mediante Wifi basado en el estándar 802.11. El dispositivo se conecta al punto de acceso que contenga el nombre de la red y la clave que se programe con anticipación, una vez el dispositivo esté conectado es posible acceder a la red local y a internet. La ESP8266 NodeMCU posee integrados circuitos que permiten filtrar el ruido y amplificar la potencia de las Radio Frecuencias, además permite autenticar mediante WEP y WPAWPA2. [20]

El ESP8266 NodeMCU V3 tiene 16 pines o GPIOs, es decir entradas y salidas de propósito general, el voltaje de funcionamiento de los pines es de 0 a 3.3V . Tiene un convertor ADC de 10 bit que permite tomar muestras a una frecuencia programable de 100Hz a 40kHz. Las salidas de PWM se implementan de manera digital y en general operan a una frecuencia de 1KHz. Adicionalmente permite comunicarse con otros dispositivos mediante estándares como I2C, I2S, SPI y UART. [20]

7. DISEÑO METODOLOGICO

7.1 INTRODUCCION

En este capítulo se describe los métodos usados para implementar el proyecto y lograr cumplir los objetivos planteados al inicio. Son varios los criterios de elección de cada uno de los componentes y dispositivos de este proyecto, en esta sección se especifican parámetros, mediciones, técnicas y los métodos usados para implementar los sistemas usados. Este proyecto se compone de varios elementos y sistemas: El sistema de tanque y tuberías el cual almacena y conduce la solución nutritiva, el sistema electrónico que almacena y controla las variables temperatura, humedad, electro conductividad y pH, el servidor web el cual permite monitorear y cambiar los parámetros del sistema de control.

De acuerdo a unas condiciones iniciales, determinadas por el tipo de especie que se pretende cultivar, se ajustan los parámetros del sistema para que los lazos de control funcionen de manera precisa. En la figura 13 se muestra la arquitectura del sistema electrónico.

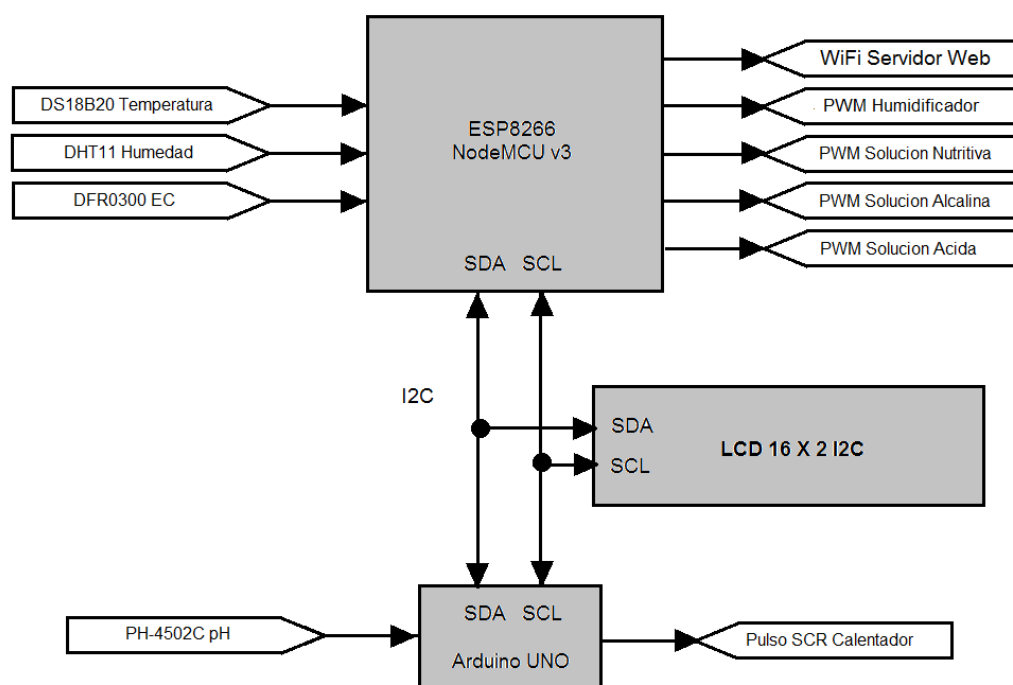


Figura 13. Arquitectura del sistema electrónico. [Imagen autoría propia]

7.2 CONDICIONES INICIALES

El tipo de hortaliza que se cultiva en este proyecto es Lechuga Batavia o *Lactuca sativa*. La lechuga requiere unas condiciones ambientales específicas. La lechuga se siente más cómoda en climas fríos donde la temperatura varía de acuerdo a la hora del día, en el día a temperatura debe ser de entre 18 y 24 grados Centígrados y en la noche cambia a valores de entre 8 a 14 grados centígrados. Los cambios de temperatura no deben ser bruscos ya que las raíces son susceptibles a este tipo de condiciones. El cultivo de lechuga requiere una humedad entre 60% a 80%, sin embargo la lechuga puede tolerar niveles bajos de humedad. En cuanto a las condiciones de la solución nutritiva, la lechuga es muy sensible a los altos niveles de salinidad por lo cual se recomienda mantener los niveles de la EC en valores menores a 1000 uS/cm. La lechuga cultivada en suelo requiere unos niveles de pH entre 6.7 y 7.4, sin embargo en los cultivos hidropónicos, el nivel óptimo para que las plantas absorban todo el rango de nutrientes está cerca de 6.0, por lo tanto se determina que el nivel de pH de la solución nutritiva para el cultivo de lechuga es de 6.5. En la tabla 7 se muestran las condiciones determinadas para el cultivo hidropónico de lechuga. [1]

Variable	Valor
Temperatura	21 °C en el día 11 °C en la noche
Humedad	60 %
Electro conductividad	1000 uS / cm
pH	6.5

Tabla 7. Condiciones determinadas para el cultivo hidropónico de lechuga.

7. 3. GERMINACION E INTRODUCCION DE LAS LECHUGAS

Las plantas de lechuga recién germinadas, pueden ser adquiridas mediante un distribuidor o germinándolas en semilleros. La lechuga requiere unas condiciones específicas para germinar, los ambientes deben ser húmedos con bastante sombra y con temperaturas entre 15 y 23 grados Centígrados. Las semillas tardan aproximadamente un mes en germinar y tomar el tamaño adecuado para ser colocadas en los tanques con la solución hidropónica. Cuando la planta posee 5 hojas o una altura de 8cm está lista para el trasplante.



Figura 14. A la izquierda, lechuga de una semana en semillero, a la derecha lechuga de un mes en sistema hidropónico. [Fotografías autoría propia]

La lechuga es trasplantada con una espuma que envuelve el tallo y con sustrato en la parte superior de la espuma para que no llegue luz a las raíces. El tiempo de desarrollo de la lechuga para ser cosechada puede ser entre 75 a 85 días antes de que el producto florezca y sea imposible su cosecha. En la figura 14 a la izquierda, se muestra una lechuga de 1 semana de edad sembrada en un semillero con una mezcla de humus orgánico y tierra común. A la derecha se muestra una planta de lechuga de aproximadamente 1 mes con una altura de 8cm.

7.4 SISTEMA DE TANQUES Y TUBERÍAS.

El sistema de tanque y tuberías se encarga de contener la solución nutritiva y distribuirla a todas las plantas. Este sistema está compuesto por una estructura hecha de tubos de PVC de 4" los cuales distribuyen la solución a las plantas. El tanque principal es donde se encuentra inicialmente el volumen total de la solución nutritiva. La solución nutritiva recircula por este sistema gracias a la acción de una bomba la cual bombea la solución que se encuentra en el tanque al sistema de tuberías de PVC donde luego es descargada nuevamente en el tanque principal. La bomba usada para bombear la solución nutritiva es una bomba sumergible P 1500 marca RESUNAC la cual funciona a un voltaje de 110V AC, su potencia es de 25W y tiene un caudal de 1500 litros por hora a una altura máxima de 1.7 metros. En la figura 15 se muestra el esquema del sistema de tuberías y el tanque principal.

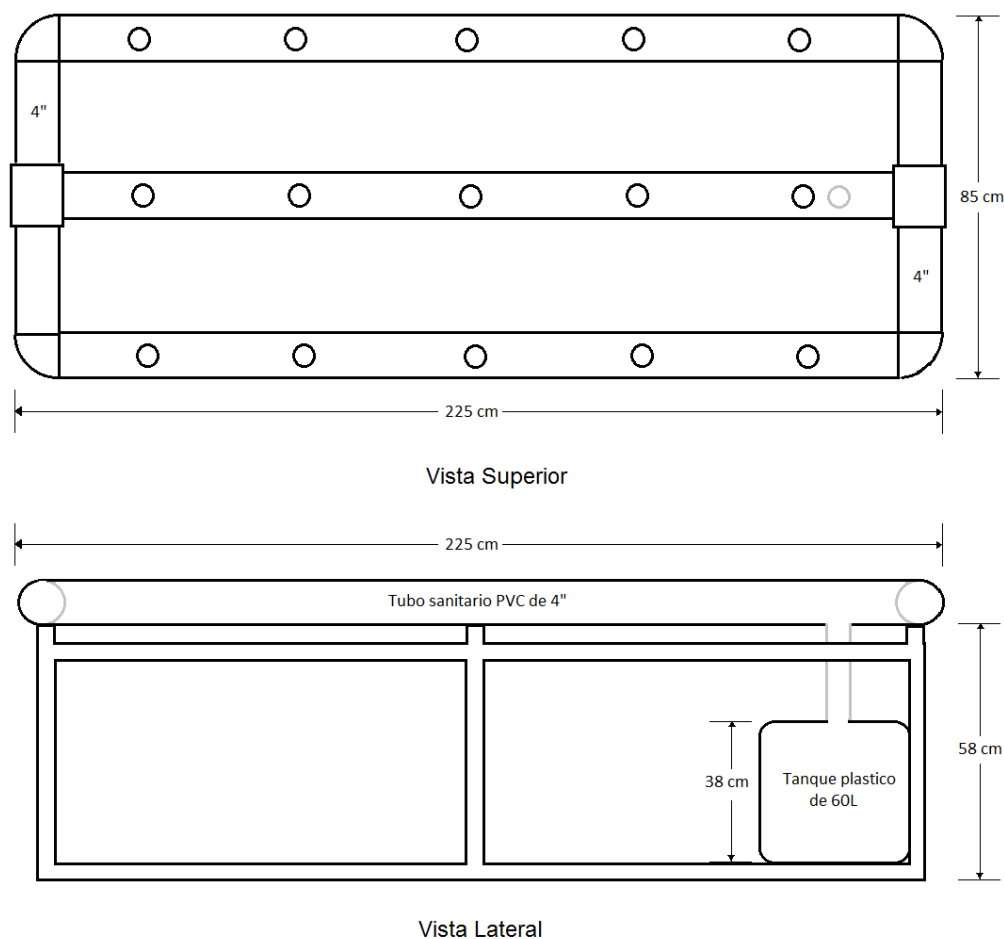


Figura 15. Esquema del sistema de tuberías y tanque principal. [Imagen autoría propia]

7.5 SENSORES Y ACTUADORES

7.5.1 SENSOR DE TEMPERATURA

Para sensar la temperatura se usa una sonda sumergible con un sensor digital de temperatura DS18B20, este sensor esta empaquetado en un To-92 y cuenta con tres terminales, dos de alimentación y uno de comunicación, la alimentación del DS18B20 puede ser en el rango de voltajes desde 3.0V a 5.5V. El pin de comunicación permite ingresar y leer datos de manera serial, el protocolo por el que se comunica el sensor con el microcontrolador es 1 Wire, el cual permite acceder a múltiples dispositivos desde un dispositivo maestro. El rango de operación es de -55°C hasta $+125^{\circ}\text{C}$ y la resolución puede ser de 9 a 12 bits. La exactitud del dispositivo es de ± 0.5 grados centígrados en un rango de temperaturas de -10 a 80 grados centígrados.

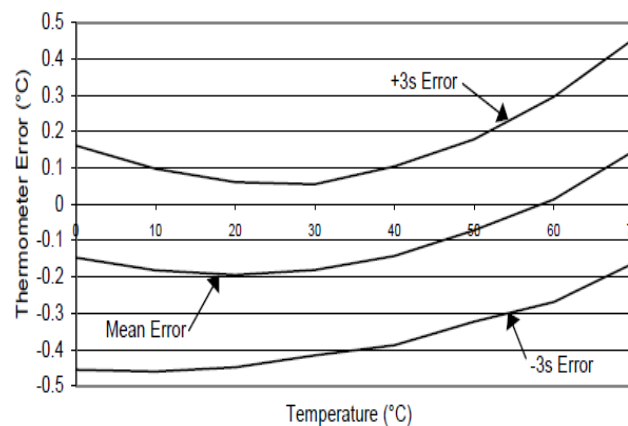


Figura 16. Curva de error típica del DS18B20 [22]

7.5.2 SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA

El DHT11 es un sensor de humedad y temperatura que envía datos mediante una señal digital con una resolución de 8 bits, la interfaz de la señal es en el formato serial; "Single-Wire Two-Way", o único hilo bidireccional. La humedad es obtenida por un componente del tipo resistivo y la temperatura es obtenida por un componente tipo NTC. En su interior el DHT11 posee un microcontrolador que procesa las señales de las magnitudes y las calibra apartir de unos parámetros guardados por el fabricante en la memoria OTP. El rango de medición de la humedad es del 20% al 90% con una resolución de 1%. La exactitud es de $\pm 4\%$. El periodo mínimo de muestreo es de 1 segundo. El DHT11 funciona con un voltaje en el rango de 3 a 5 voltios.

7.5.3 SENSOR DE PH

El índice de pH es dado por un kit que permite medir el pH de un líquido. El kit de medición del pH posee una placa controladora que entrega un valor analógico proporcional a la medición. El controlador tiene un potenciómetro multivuelta que permite calibrar de la sonda.

El sensor de pH se alimenta con un voltaje de 5V DC, consume entre 5 y 10mA, posee un rango de medición de 0 a 14 pH a temperaturas que van desde 0°C a 60°C. La precisión es de $\pm 0.1\text{pH}$ a 25 °C y su tiempo de respuesta es ≤ 5 segundos. El sensor se compone de un controlador y una sonda la cual se acopla mediante un conector BNC. Las características más importantes de la sonda del sensor de pH se muestran en la tabla 8.

Característica	Valor
Rango de pH	0-14 pH
Rango de temperatura	0-60 °C
Punto cero	$7 \pm 0. \text{pH}$
Error	0.2 pH
Porcentaje de pendiente teórica	$\geq 98.5\%$
Resistencia interna	$\leq 250\text{M}\Omega$
Tiempo de respuesta	$\leq 1\text{min}$

Tabla 8. Características de la sonda del sensor de pH.

El sensor de pH tiene una salida lineal, la recta característica de la salida del sensor se calcula apartir de la medición del valor de las soluciones calibradoras en el ADC del microcontrolador. En la figura 17 se muestra la ecuación de la recta y la gráfica de la función de la salida del sensor de pH.

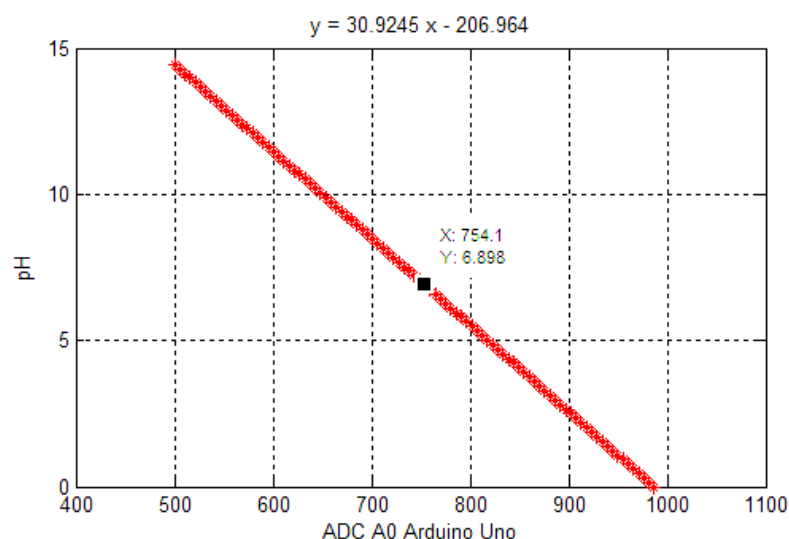


Figura 17. Ecuación de la recta y gráfica de la función de la salida del sensor de pH.
[Imagen autoría propia]

Las soluciones calibradoras permiten medir el valor en el sensor analógico para caracterizar la recta que permite conocer el valor del pH. La solución para calibrar el pH se obtiene mezclando el contenido del sobre en 250mL de agua desionizada. La exactitud de la solución es de $\pm 0.01\text{pH}$. En la siguiente tabla se muestran los valores de tres soluciones calibradoras que varían su valor de acuerdo a la temperatura.

°C	pH	pH	pH
10	4.00	6.92	9.33
15	4.00	6.90	9.28
20	4.00	6.88	9.23
25	4.00	6.86	9.18
30	4.01	6.85	9.14
35	4.02	6.84	9.10
40	4.03	6.84	9.07
45	4.04	6.83	9.04
50	4.06	6.83	9.02

Tabla 9. Valores de las soluciones calibradoras de pH; 4.00, 6.86 y 9.18.

La señal generada por el sensor de pH es análoga, puede tener alteraciones o ruido por lo cual es necesario implementar un filtro. Mediante un script subido en la placa Arduino UNO, se implementa un filtro pasa bajo móvil exponencial el cual permite atenuar las alteraciones o el ruido en la señal análoga. El filtro pasa bajo media móvil exponencial atenúa el ruido de alta frecuencia. Para una señal $Y(t)$, la media móvil exponencial se calcula como se expresa en la ecuación 1.

$$S(t) = \begin{cases} Y(0) & t = 0 \\ \alpha Y(t) + (1 - \alpha)S(t - 1) & t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

Dónde:

El coeficiente α es un factor entre 0 y 1.

$Y(t)$ es el valor de la señal que se desea filtrar en un período de tiempo t .

$S(t)$ es el valor de la media móvil exponencial en cualquier período de tiempo t .

$S(t - 1)$ es el valor de la media móvil exponencial en el período de tiempo $t - 1$.

En la figura 18 se muestra la señal del sensor de pH sin filtro y con filtro pasa bajo media móvil exponencial.

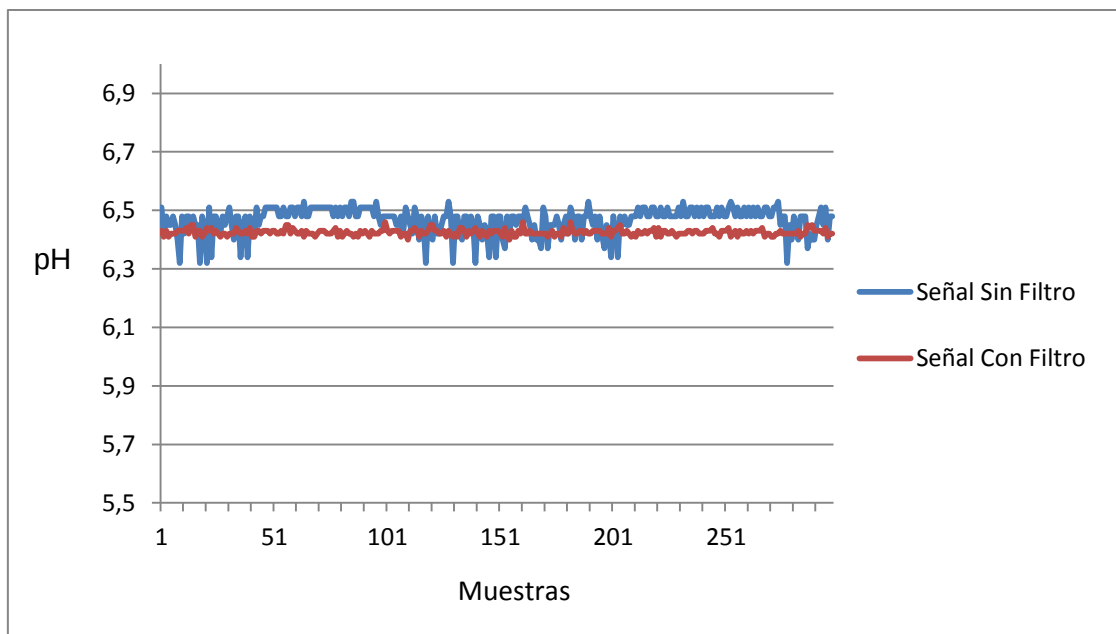


Figura 18. Señal análoga con y sin filtro pasa bajo media móvil exponencial. [Imagen autoría propia]

7.5.4 SENSOR DE EC

La conductividad es la capacidad que tiene una sustancia de conducir corriente, por lo cual es la magnitud recíproca de la resistividad. En un líquido la conductancia es un indicativo de la cantidad de sales o electrolitos que se encuentran en una solución. En el Sistema Internacional de Unidades la unidad para la conductividad es Siemens sobre metro, sin embargo hay otras unidades como el mS sobre cm o mS/cm.

El valor de la concentración de la solución nutritiva se obtiene a partir de un sensor de EC o ppm el cual indica la concentración de las sales diluidas en partes por millón (ppm) o electro-conductividad en (mS/cm). El sensor tiene una salida lineal la cual es caracterizada mediante la medición de los valores obtenidos en el ADC del ESP8266.

El sensor de EC DJS V1.0 se compone de un controlador y una sonda sumergible con acople BNC. El sensor EC funciona con un voltaje de 5 Voltios, el valor de la EC depende de la temperatura del líquido que se pretende sensar, por lo que es necesario contar con la lectura de un sensor de temperatura como un DS18B20. Algunas de las características del sensor de EC se muestran en la siguiente tabla.

Característica	Valor
Rango de lectura	1 a 20 ms/cm
Rango de temperatura	5 -40 °C
Exactitud	< ±10%
Constante del electrodo	k = 1

Tabla 9. Características del sensor de EC DJS V1.0.

La EC depende del valor de la temperatura en el líquido que se esté midiendo, por lo cual es necesario compensar el valor la medición a partir de la lectura obtenida en el sensor de temperatura. Para realizar esta compensación se usa la ecuación 2.

$$EC_Calibration = EC_K * (1 + (Temp_Coef * (Temp - 25.0))) \quad (2)$$

Dónde:

EC_Calibration es la función de compensación del valor de la EC respecto a la temperatura.

EC_K es la constante de calibración.

Temp_Coef es el coeficiente de la solución hidropónica.

Temp es el valor de la temperatura dada por el sensor DS18B20.

La calibración el sensor de EC se realiza mediante el uso de las soluciones calibradoras. Los valores de las soluciones calibradoras son 152 uS/cm, 942 uS/cm, y 2170 uS/cm a 17,5°C. Como se muestra en la figura 19 la constante que permite obtener una salida más lineal y con un mayor rango es K = 0,7.

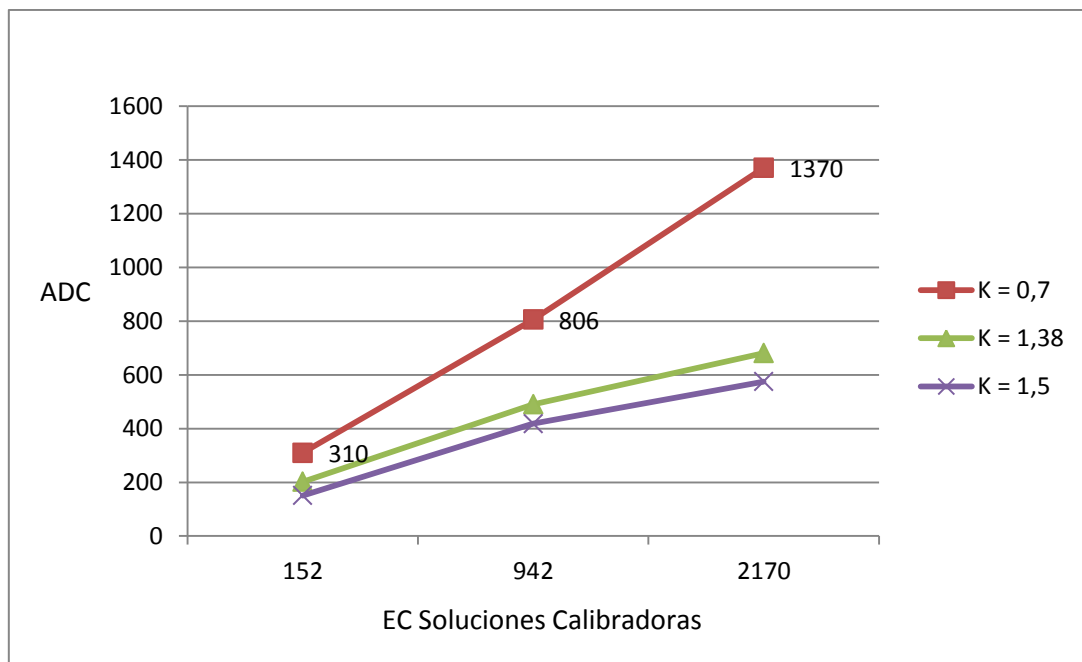


Figura 19. Comparación de las funciones de salida al variar la constante de calibración K. [Imagen autoría propia]

En la figura 20 se muestra la recta característica de la salida del sensor en función de la EC, la cual se calcula a partir de los valores medidos en el ADC de la tarjeta ESP respecto a los valores de las sales calibradoras.

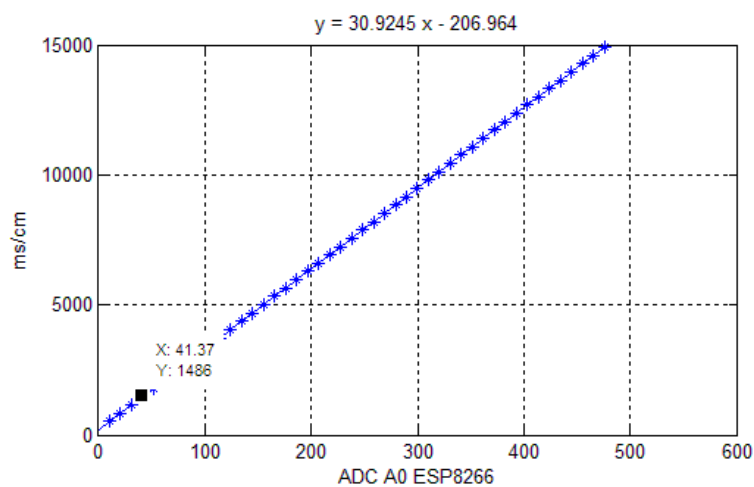


Figura 20. Recta característica de la salida del sensor de EC [Imagen autoría propia]

7.5.5 CALENTADOR

El calentador es un actuador que se compone de varias piezas. Se compone de una resistencia sumergible de 100W a 110VAC la cual es controlada mediante la técnica de control de potencia en AC a partir del disparo de un tiristor.

Para el control del disparo del tiristor, se implementa un detector de cruce por cero y una etapa de potencia para controlar la carga AC. Entre los dispositivos usados se encuentran: Opto acoplador 4N35, MOC3021 y tiristor SCR TYN412.

En la figura 21 se muestra el esquemático del detector de cruce por cero. Este circuito indica con un pulso al microcontrolador, el momento en que la señal de la red AC pasa por cero. En la figura 22 se muestra la señal atenuada de la red AC y el pulso generado por el detector de cruce.

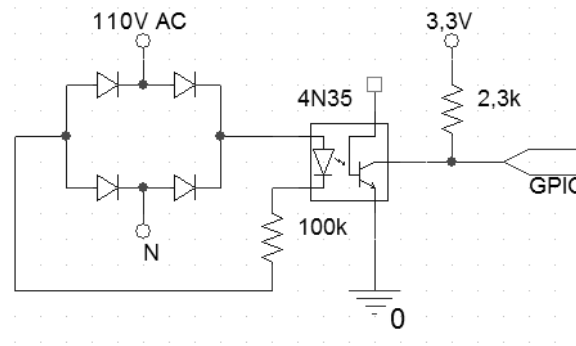


Figura 21. Circuito del detector de cruce por cero. [Imagen autoría propia]

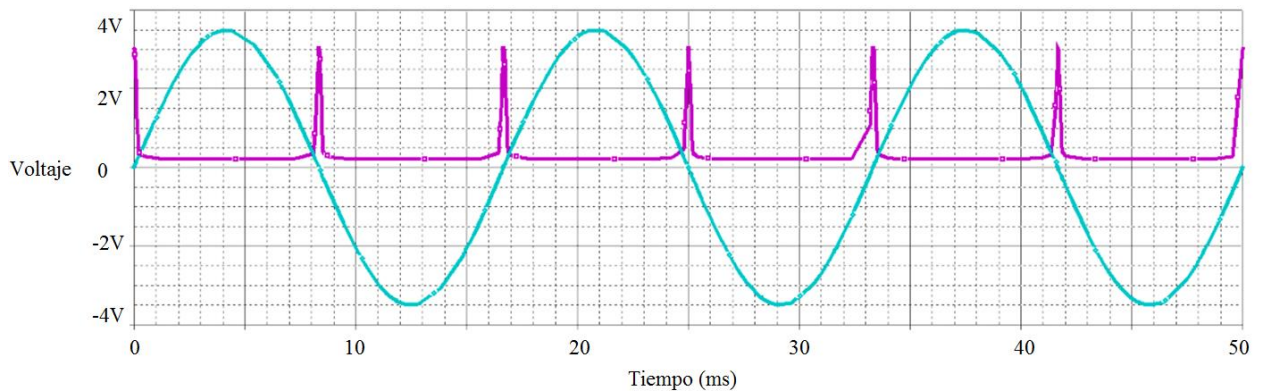


Figura 22. Señal atenuada de la red AC (azul), Señal del detector de cruce (violeta).
[Imagen autoría propia]

En la figura 23 se muestra el esquemático del circuito que produce el disparo del SCR el cual se encuentra acoplado a la carga. El opto acoplador como el MOC3021, permite desacoplar los circuitos DC de los circuitos AC, minimizando el riesgo de cortocircuito en los dispositivos. En la figura 24 se muestra la comparación de la señal del microcontrolador con la señal atenuada de la carga conectada al SCR.

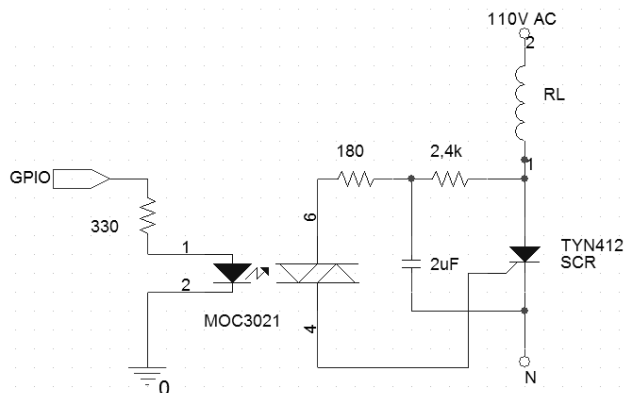


Figura 23. Circuito de control del SCR. [Imagen autoría propia]

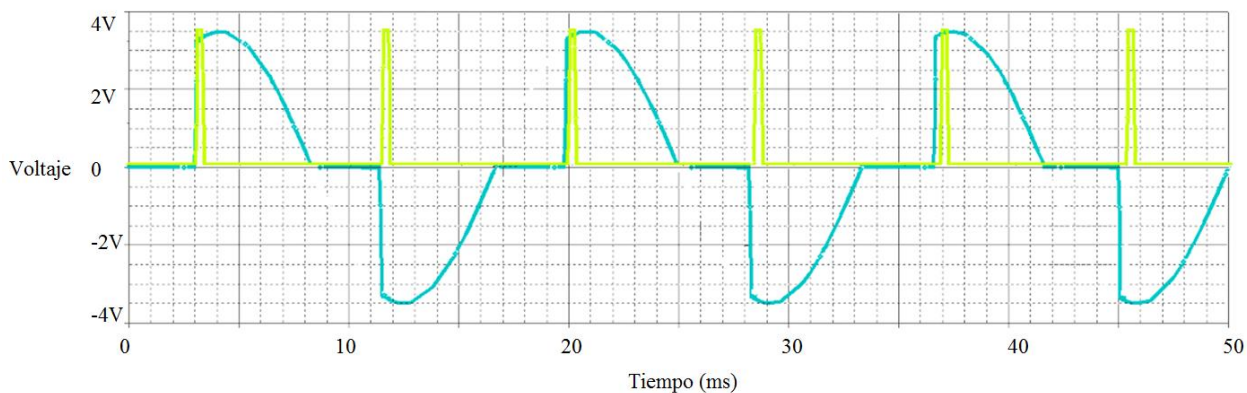


Figura 24. Señal del microcontrolador en (verde), Señal de la carga del circuito de control del SCR (azul). [Imagen autoría propia]

7.5.6 MOTOBOMBA 12V

La motobomba es el actuador encargado de introducir o bombear las soluciones nutritivas al tanque principal del cultivo hidropónico. Las motobombas operan con un voltaje de 12V DC y a toda potencia son capaces de generar un caudal 800 ml/Min. La motobomba se controla mediante PWM.

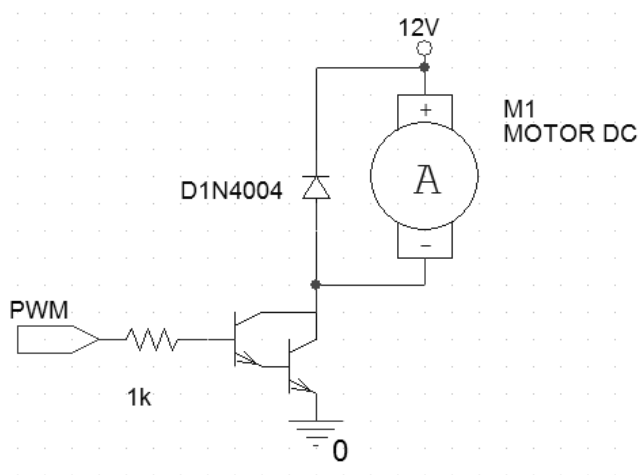


Figura 25. Driver de motor DC 12V usando un amplificador en la configuración de Darlington. [Imagen autoría propia]

El rango de PWM generado es proporcional a la tasa de goteo en la salida de la motobomba DC. EL driver del motor usa un amplificador en configuración de Darlington que convierte la señal de 3,3 Voltios a una de 12 Voltios. En la figura 25 se muestra el esquemático del driver de la motobomba DC. En la figura 26 se muestra una señal de PWM generada por un microcontrolador al 10% y al 90% con una frecuencia de 60Hz.

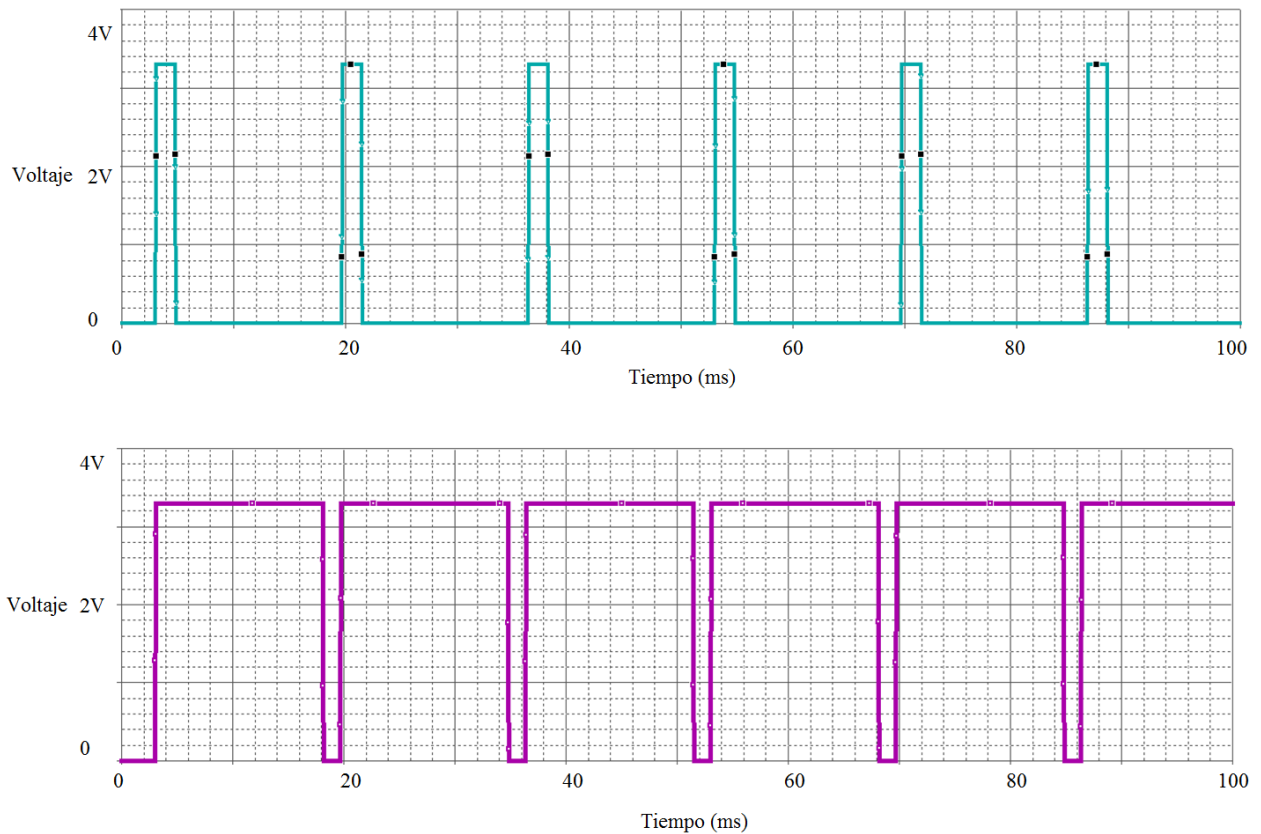


Figura 26. Señal de PWM al 10% 60Hz (azul), Señal de PWM al 90% a 60Hz (violeta).
[Imagen autoría propia]

7.5.7 HUMIDIFICADOR

El humidificador permite incrementar la humedad del cultivo al crear vapor mediante vibraciones ultrasónicas. El humidificador funciona con un voltaje de 5 Voltios DC y se controla mediante PWM. Al igual de las bombas DC de 12V se implementa un driver conformado por un amplificador en la configuración de Darlington el cual convierte la señal de PWM del microcontrolador de 3,3 Voltios a una señal de 5 Voltios y una corriente de hasta 1 Amperio. A diferencia de los drivers de las motobombas que se alimentan con un voltaje de 12 Voltios DC, el driver del humidificador se alimenta con 5 Voltios DC. Es necesario que el entorno que se pretende humedecer sea cerrado para que humedad se mantenga en el área.

7.6 CONTROL PID

La mayoría de controladores usados actualmente en la industria usan esquemas de control PID debido a su confiabilidad y versatilidad. En este proyecto se controla la temperatura, la humedad, el pH y la concentración de la solución nutritiva mediante varios bloques de control PID. Los bloques de control PID se implementan en la tarjeta ESP8266 la cual permite realizar varias tareas mediante algoritmos que modifican variables locales a partir de los valores calculados en la sintonización cada bloque.

Hay diversas maneras de sintonizar un bloque PID, dependiendo del tipo de sistema, su complejidad y de la información con la se cuenta, se puede llevar a cabo una sintonización de los controladores PID en el sitio. Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones en estado transitorio y en estado estable del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, debemos recurrir a los enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID. [13]

En este proyecto se sintonizaran los controladores mediante las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols y mediante el método heurístico.

7.6.1 SINTONIZACIÓN DE LOS BLOQUES PID DE LA TEMPERATURA, HUMEDAD Y PH APARTIR DEL MÉTODO DE SINTONIZACIÓN DE ZIEGLER-NICHOLS.

El método de sintonización de Ziegler-Nichols, consiste en calcular los valores de las constantes K_p , T_i , y T_d apartir del análisis de la respuesta transitoria de la planta. La respuesta al escalón se caracteriza mediante dos parámetros; el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva como se muestra en la figura 27. Apartir de los valores de las constantes T y L , se obtienen los valores de la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d . En la tabla 10 se muestra la regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta o primer método. Por tanto la ecuación que representa el bloque PID quedara definida como se muestra en la ecuación 3.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

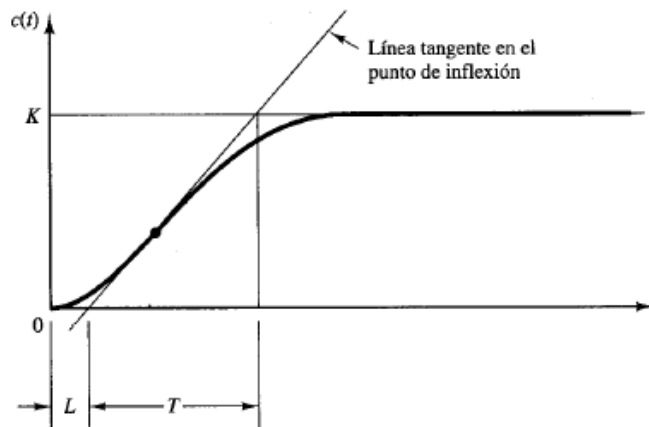


Figura 27. Curva de respuesta en forma de S. [13]

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0.9(T/L)$	$L/0.3$	0
PID	$1.2(T/L)$	$2L$	$0.5L$

Tabla 10. Regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta. [13]

7.6.1.1 SINTONIZACION DEL BLOQUE PID DEL CONTROL DE LA TEMPERATURA

La sintonización del bloque PID de la temperatura se realiza apartir del análisis de la curva obtenida en lazo abierto. La curva es obtenida mediante los datos enviados por el microcontrolador a través del puerto serial, las muestras son enviadas a una tasa de 2 muestras por segundo. Los valores de la constantes tiempo de retardo L y la constante de tiempo T son: $L = 185$ y $T = 4912$. En la figura 28 se muestra la curva de respuesta de la planta de temperatura en lazo abierto.

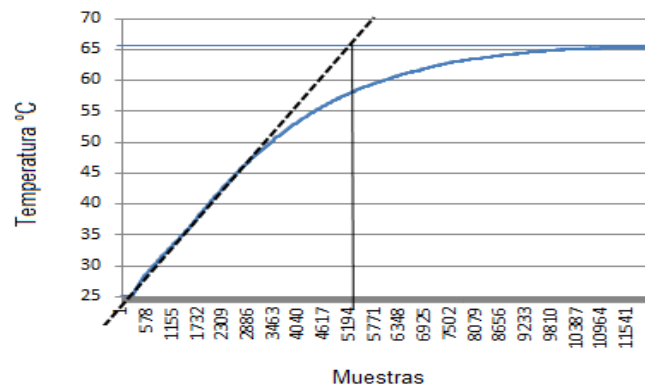


Figura 28. Curva de la respuesta de la planta de control de temperatura en lazo abierto. [Imagen autoría propia]

Aplicando las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols se obtuvieron los valores de la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d . Los valores de las constantes obtenidos son $K_p = 31.8$, $K_i = 0.086$, $K_d = 2947.2$. En la figura 29 se muestra la respuesta de la planta ya sintonizada a una entrada en forma de escalón.

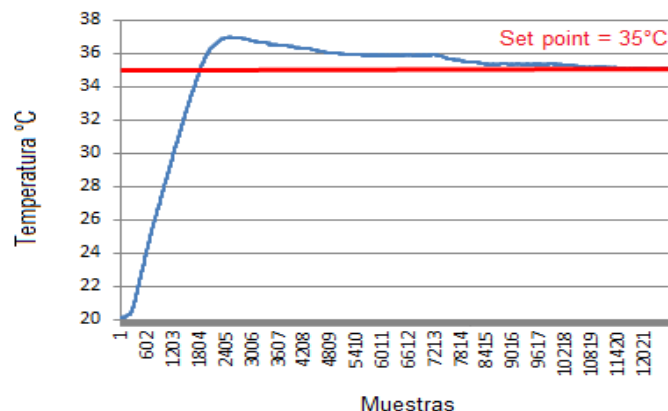


Figura 29. Respuesta de la planta de control de temperatura apartir de la excitación de una entrada en forma de escalón. [Imagen autoría propia]

7.6.1.2 SINTONIZACION DEL BLOQUE PID DEL CONTROL DE LA HUMEDAD

La sintonización del bloque PID de la humedad se realiza apartir del análisis de la curva obtenida en lazo abierto. Los valores de la constantes tiempo de retardo L y la constante de tiempo T son: $L = 27$ y $T = 135$. En la figura 30 se muestra la curva de respuesta de la planta de control de humedad en lazo abierto.

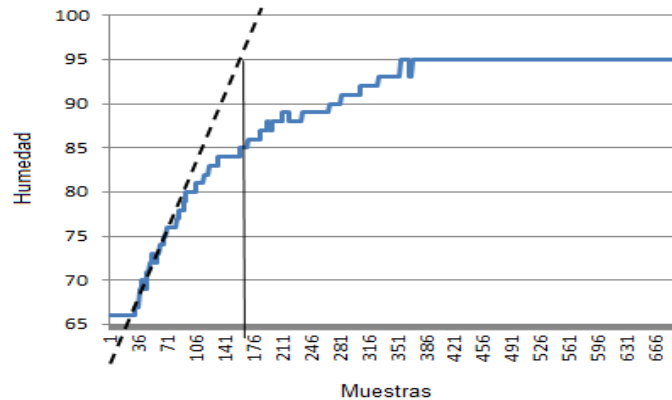


Figura 30. Curva de la respuesta de la planta de control de la humedad en lazo abierto. [Imagen autoría propia]

Aplicando las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols se obtuvieron los valores de la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d . Los valores de las constantes obtenidos son $K_p = 6$, $K_i = 0.111$, $K_d = 81$. En la figura 31 se muestra la respuesta de la planta ya sintonizada a una entrada en forma de escalón.

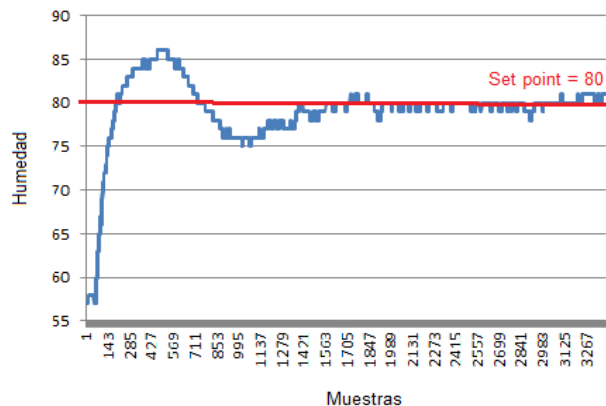


Figura 31. Respuesta de la planta de control de la humedad apartir de la excitación de una entrada en forma de escalón. [Imagen autoría propia]

7.6.1.3 SINTONIZACION DEL BLOQUE PID DEL CONTROL DEL PH (-).

La sintonización del bloque PID del control del pH negativo se realiza apartir del análisis de la curva obtenida en lazo abierto. Los valores de la constantes tiempo de retardo L y la constante de tiempo T son: $L = 7.5$ y $T = 12$. En la figura 32 se muestra la curva de respuesta de la planta de control del control del pH negativo en lazo abierto.

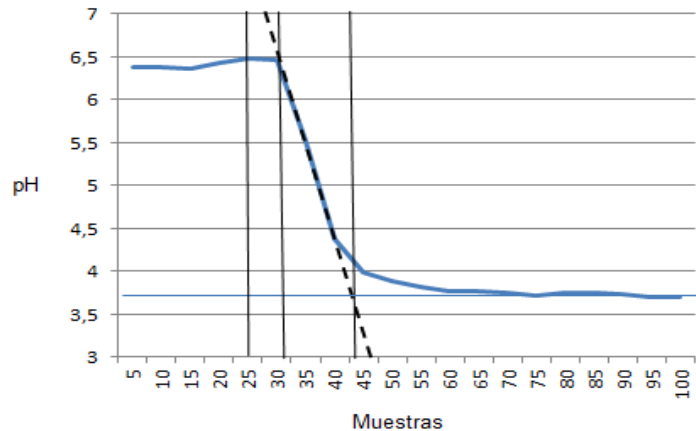


Figura 32. Curva de la respuesta de la planta de control del control del pH negativo en lazo abierto. [Imagen autoría propia]

Aplicando las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols se obtuvieron los valores de la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d . Los valores de las constantes obtenidos son $K_p = 1.92$, $K_i = 0.128$, $K_d = 7.2$. En la figura 33 se muestra la respuesta de la planta ya sintonizada a una entrada en forma de escalón.

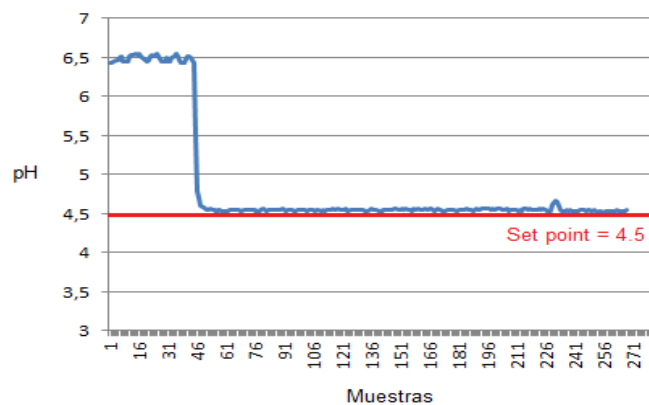


Figura 33. Respuesta de la planta del control del pH negativo apartir de la excitación de una entrada en forma de escalón. [Imagen autoría propia]

7.6.1.4 SINTONIZACION DEL BLOQUE PID DEL CONTROL DEL PH (+).

La sintonización del bloque PID del control del pH positivo se realiza apartir del análisis de la curva obtenida en lazo abierto. Los valores de la constantes tiempo de retardo L y la constante de tiempo T son: $L = 2$ y $T = 4.75$. En la figura 34 se muestra la curva de respuesta de la planta de control de humedad en lazo abierto.

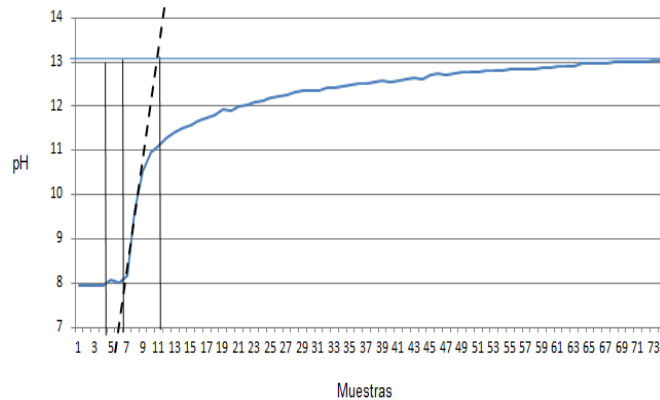


Figura 34. Curva de la respuesta de la planta del control del pH positivo en lazo abierto.
[Imagen autoría propia]

Aplicando las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols se obtuvieron los valores de la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d . Los valores de las constantes obtenidos son $K_p = 2.85$, $K_i = 0.7125$, $K_d = 2.85$. En la figura 35 se muestra la respuesta de la planta ya sintonizada a una entrada en forma de escalón.

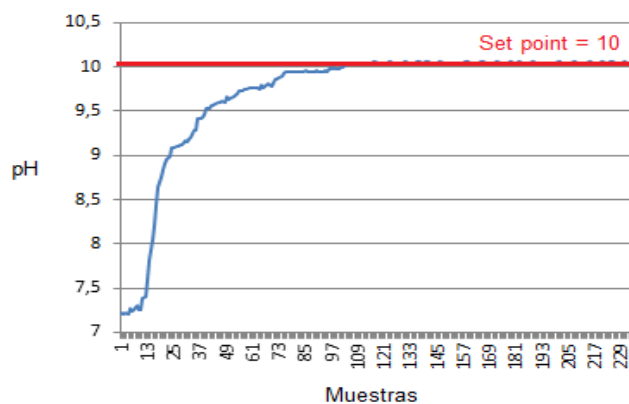


Figura 35. Respuesta de la planta del control del pH positivo apartir de la excitación de una entrada en forma de escalón. [Imagen autoría propia]

7.6.2 SINTONIZACIÓN DEL BLOQUE PID DEL CONTROL DE LA SOLUCION NUTRITIVA, APARTIR DEL MÉTODO HEURISTICO

A diferencia del método de sintonización de Ziegler-Nichols en el cual se sintoniza el controlador apartir del análisis de la curva en lazo abierto, el método heurístico permite sintonizar los controladores mediante el análisis de la respuesta en lazo cerrado para diferentes valores en las constantes K_p , K_i y K_d del bloque PID. Para sintonizar el controlador mediante el método heurístico primero se ajusta la acción proporcional, haciendo la acción integral y derivativa mínimas o igual a 0. Se estudiará el comportamiento de la planta ante una excitación en la entrada para diferentes valores de K_p hasta lograr que la respuesta se acomode al comportamiento esperado. Luego se ajustara la acción integral modificando la ganancia K_i , de tal manera que la respuesta disminuya su error en estado permanente, la hacer esto es posible que se presenten oscilaciones. Finalmente se ajusta la acción derivativa modificando la ganancia K_d , de tal manera que se atenúen las oscilaciones. En la figura 36 se muestra la respuesta de la planta ante una entrada en forma de escalón para distintos valores de K_p .

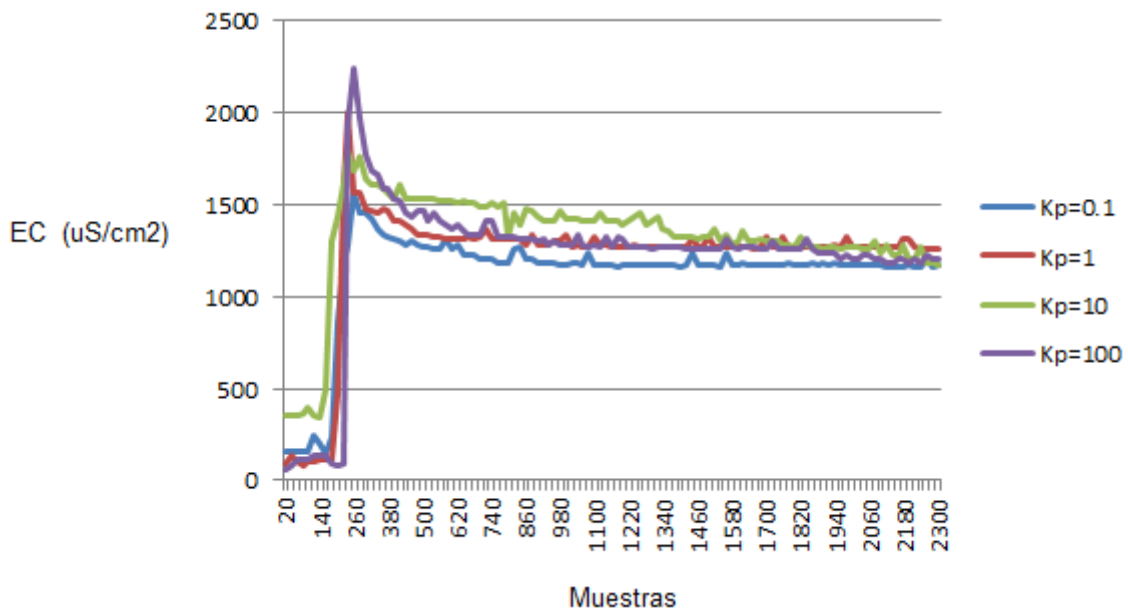


Figura 36. Respuesta de la planta del control de la solución nutritiva ante una entrada en forma de escalón para distintos valores de K_p . [Imagen autoría propia]

Una vez que el sistema presenta la respuesta más cercana al punto esperado se obtuvieron los valores para las constantes del bloque PID. Los valores de las ganancias obtenidas mediante el método heurístico son $K_p = 0.1$, $K_i = 0.05$ y $K_d = 5$. En la figura 37 se muestra la respuesta del sistema de control de la solución nutritiva ante una excitación en forma de escalón unitario

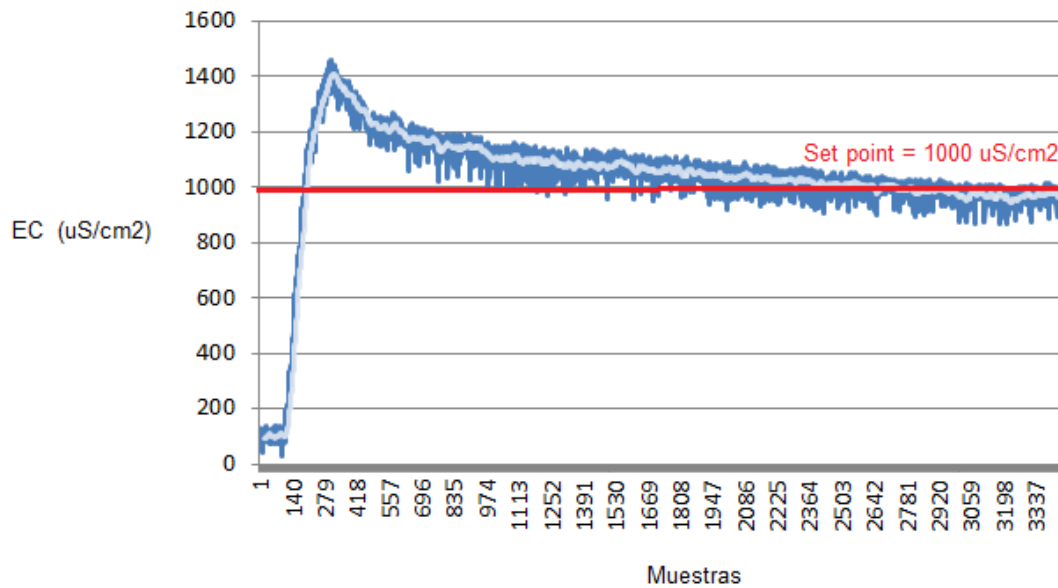


Figura 37. Respuesta de la planta del control de la solución nutritiva apartir de la excitación de una entrada en forma de escalón. [Imagen autoría propia]

7.7 SERVIDOR WEB

El servidor Web permite al usuario monitorear y modificar las variables y los estados del sistema mediante una interfaz. El servidor web es montado en la tarjeta ESP8266 la cual además se encarga de calcular y controlar las variables del sistema. Para poder acceder al servidor de la ESP8266 es necesario indicarle al dispositivo el nombre de la red de WiFi y la contraseña. Los datos de la red pueden ser agregados al código o enviados a través del puerto serial.

Inicialmente el sistema muestra la dirección IP en el módulo LCD de 16 x 2. La dirección IP que se muestra en el módulo LCD, es la dirección IP del servidor web conectado a la red local. Mediante un dispositivo como un ordenador o un teléfono móvil, que esté conectado a la misma red local, se puede acceder al servidor para monitorear y modificar las variables y el estado de los sistemas de control. En la figura 38 se muestra la pantalla LCD con la dirección IP del servidor y la hora.

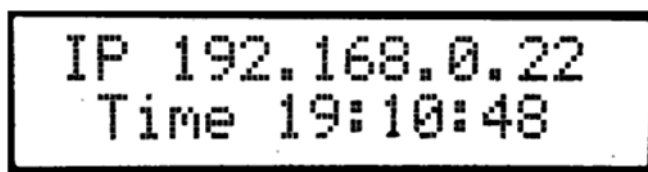


Figura 38. Información inicial presentada en la pantalla LCD con la dirección IP del servidor y la hora. [Imagen autoría propia]

7.7.1 INTERFAZ GRAFICA

El servidor Web despliega una página Web la cual muestra los valores de las variables del sistema; Temperatura del tanque principal, Humedad Relativa, pH de la solución, EC de la solución y la hora. La interfaz presentada en la página web permite interactuar con el sistema mediante varios botones con los cuales se puede cambiar el set point de las variables o la información desplegada en el LCD. El servidor web montado en la ESP8266 mantiene la hora actualizada accediendo a un servidor en la red de internet el cual envía la hora en formato UTC. Es importante mantener la hora actualizada debido a que las condiciones del cultivo cambian de día y de noche.

En la figura 39 se muestra la interfaz de la página Web desplegada por el servidor Web en el cual se observan las variables del sistema y los botones que permiten interactuar con el sistema.

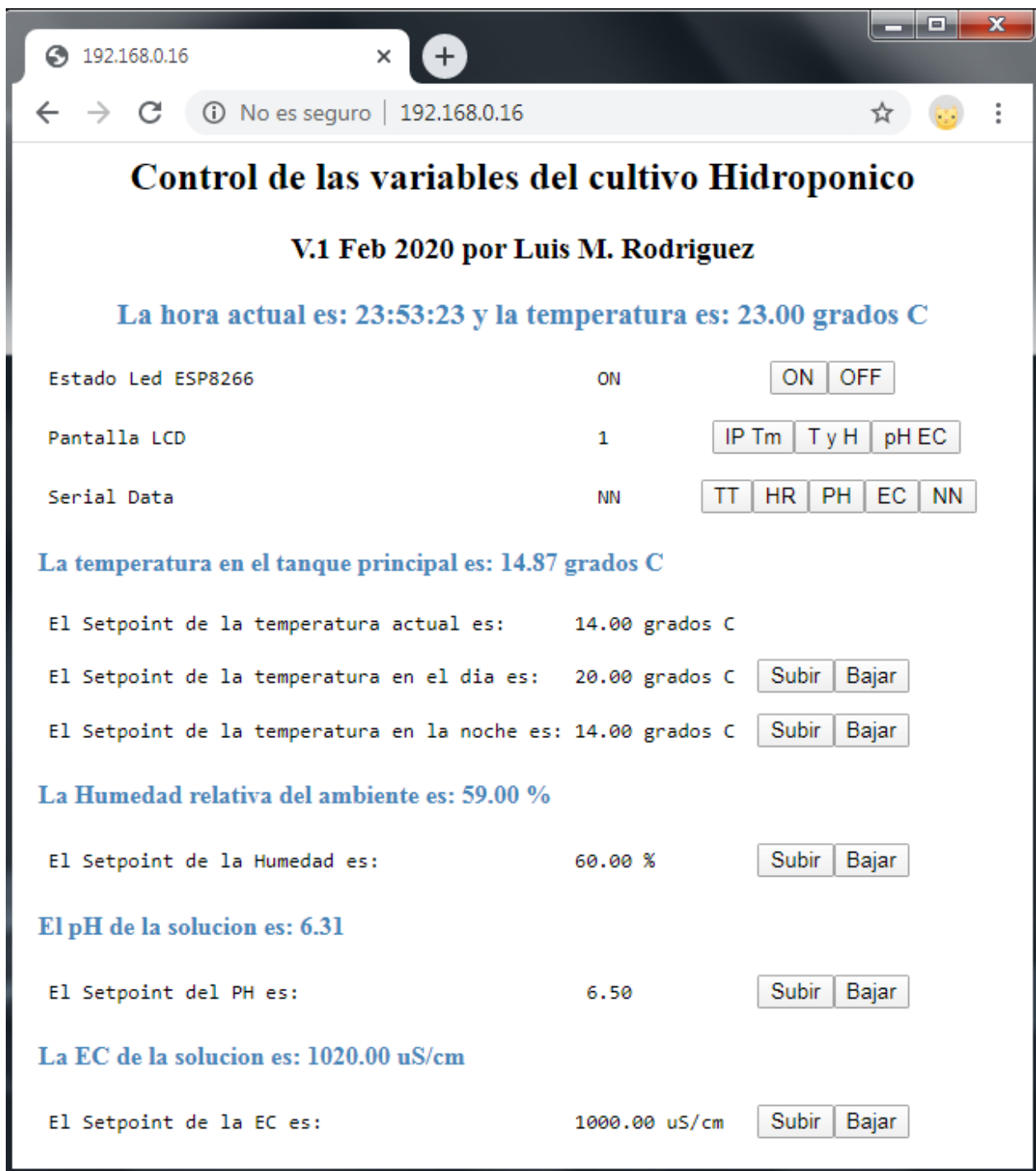


Figura 39. Interfaz de la página Web desplegada por el servidor Web. [Imagen autoría propia]

Como se observa en la figura 38, en seguida de la cabecera en la parte superior de cuerpo de la página web, se muestran tres estados con varias opciones que pueden cambiar dependiendo de la necesidad del usuario.

El “Estado Led ESP8266” permite encender o apagar el led de la ESP8266 apartir del accionamiento de los botones “ON” y “OFF”, esto con el fin de verificar que el servidor se encuentra conectado al dispositivo en el que se está visualizando la página web. La opción “Pantalla LCD” presentada en la página Web, permite cambiar la información mostrada en el módulo LCD. Cuando se hace clic al botón “IP Tm” se muestra en el módulo LCD la IP del dispositivo y la hora actualizada en formato de 24 horas. Cuando se hace clic al botón “T y H”, se muestra en la pantalla LCD el valor de la temperatura en el tanque como “TT”, el valor de la Humedad relativa como “HR”, los set point como “ST” y “SH”. Cuando se da clic al botón “pH EC” en la pantalla LCD se observa el valor del pH como “PH”, la EC como “EC”, los set point como “SP” y “SE”. En la Figura 40 se muestra la información desplegada en el módulo LCD dependiendo del estado de la opción “Pantalla LCD”.

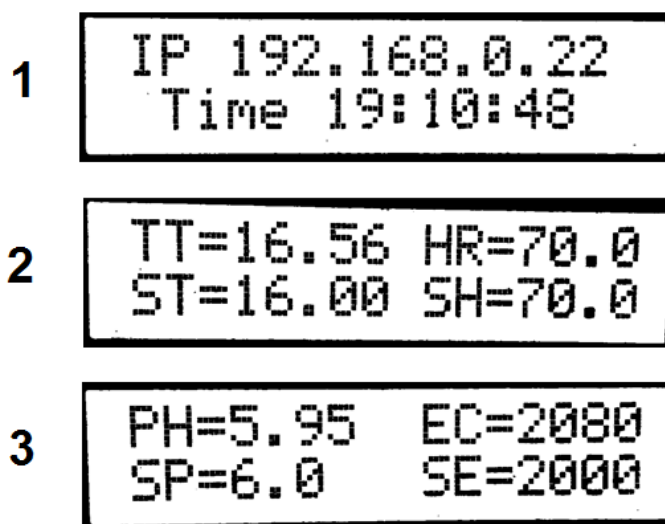


Figura 40. Presentación de la información en el módulo LCD y su número indicador.
[Imagen autoría propia]

La opción “Serial Data” permite enviar datos a través del puerto USB, los datos se visualizan en el puerto serial del software arduino. Dependiendo del cual sea el botón seleccionado, se enviara los datos de la variable solicitada. Para acceder al valor de la temperatura del tanque principal se da clic al botón “TT”, para acceder al valor de la Humedad se da clic al botón “HR”, para acceder al valor del pH se da clic al botón “PH”, para acceder al valor de la EC se da clic al botón “EC”, para no enviar ningún dato se da clic al botón “NN”.

En el cuerpo de la página web, en seguida de los estados que permiten cambiar la información presentada en el LCD y el puerto serial, se encuentra los estados de las variables del sistema; La temperatura del tanque principal, la humedad relativa, el pH de la solución y por último el valor de la EC de la solución. También es presentado el valor del set point para cada variable. Los botones “Subir” y “Bajar”, permiten cambiar el valor del set point de cada variable de ser necesario. En la tabla 11 se muestra la función de cada botón y el significado de cada abreviación presentados en la página web y el modulo LCD.

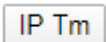
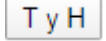
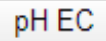
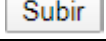
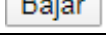
Botón o Símbolo	Acción o significado
	Botón de encendido del Led del ESP8266
	Botón de apagado del Led del ESP8266
	Botón pantalla IP y hora
	Botón pantalla Temperatura y Humedad
	Botón pantalla pH y EC
	Botón dato serial Temperatura del tanque
	Botón dato serial Humedad Relativa
	Botón dato serial pH
	Botón dato serial EC
	Botón dato serial Nulo
	Botón subir set point
	Botón bajar set point
ST	Set point temperatura
SH	Set point Humedad
SP	Set point pH
SE	Set point EC

Tabla 11. Función de cada botón y significado de las abreviaciones presentadas en la página web y el modulo LCD.

El servidor web además de permitir monitorear y cambiar los estados y variables del sistema, presenta un sistema de advertencia o alarma que indica cuando una variable se encuentra por encima o debajo de los valores normales o aceptables. Cuando la variable presenta un valor anormal, se muestra una advertencia y cambia el color de la cadena de caracteres presentada en la página web de un azul oscuro a un naranja oscuro. En la figura 41 se muestra un ejemplo en el que el sistema presenta una advertencia cuando la temperatura esta por muy debajo del nivel determinado.

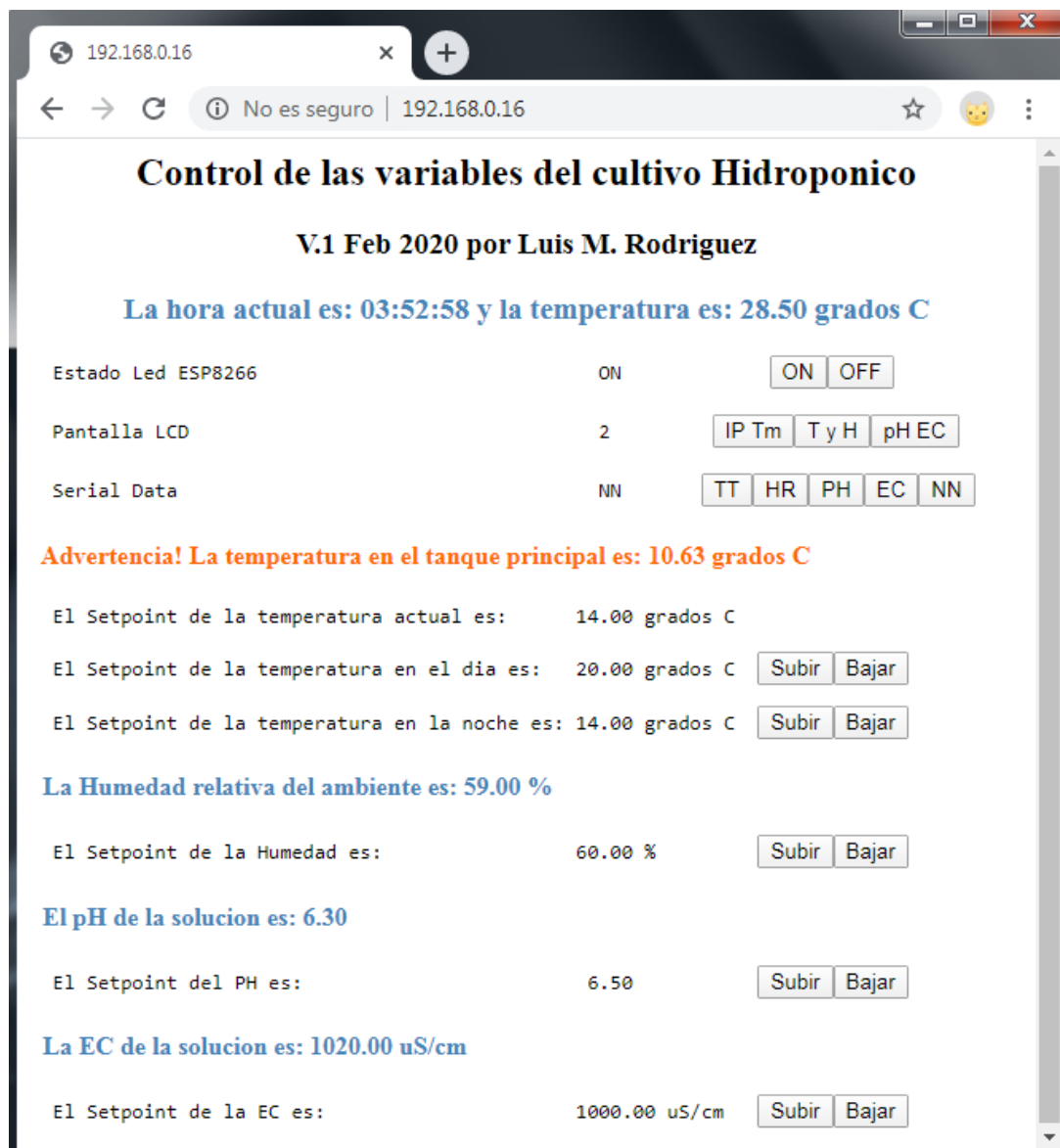


Figura 41. Advertencia del servidor cuando la temperatura está por debajo del nivel determinado. [Imagen autoría propia]

8. CONCLUSIONES

En este proyecto se demostró que es posible implementar sistemas complejos de control disponiendo de recursos limitados como dispositivos usados para usos académicos y software de libre acceso. En el mercado hay una grande variedad de dispositivos que permiten implementar diversos sistemas que pueden simplificar las tareas cotidianas tanto en el ámbito doméstico como industrial, además a medida que avanza la tecnología es posible disponer de dispositivos más potentes y económicos.

Es posible de que cualquier persona pueda implementar un cultivo hidropónico, sin embargo es necesario tener en cuenta varios aspectos que si no son tenidos en cuenta pueden generar problemas en el rendimiento de los cultivos. A partir del análisis de la sintomatología de las plantas cultivadas, estudiando la forma y coloración de tallos y hojas, es posible determinar las causas de estos problemas. Algunos de los problemas más comunes en el desarrollo de los cultivos hidropónicos son; retención de sales en tuberías, falta o exceso de compuestos en la solución, falta de oxigenación en la solución y las raíces, falta de luz.

Debido a las características y limitaciones de los dispositivos usados en este proyecto no fue posible agregar un sistema de enfriamiento de la solución nutritiva, sin embargo es posible implementar un sistema de control más completo apartir de otros sistemas embebidos o dispositivos más robustos como una Raspberry o la nueva tarjeta de Arduino Portenta H7.

El agua es un recurso fundamental en los cultivos hidropónicos, por lo que es importante emplear el tipo de agua adecuado. Las aguas no tratadas pueden afectar al consumidor debido a que el cultivo puede retener metales pesados y químicos que son perjudiciales. EL agua del acueducto y alcantarillado posee una cantidad elevada de cloro, esto con el fin de eliminar los microorganismos y hacerla potable, sin embargo en un cultivo hidropónico el efecto del cloro puede traer efectos adversos como el aumento del pH y el aumento de compuestos nocivos para el cultivo. El agua de lluvia posee unas condiciones favorables para ser usada en los cultivos, también el agua del acueducto puede ser declorada mediante el uso de filtros o almacenándola en estanques artificiales al aire libre.

Los cultivos hidropónicos pueden servir como un recurso de auto abastecimiento en caso de una crisis, o en entornos en los que las condiciones ambientales sean extremas. Al unir las nuevas tecnologías y los dispositivos electrónicos con la industria alimentaria es posible generar nuevas herramientas para facilitar y aprovechar mejor los recursos naturales como el agua, además usar espacios que anteriormente no se aprovechaban como las zonas urbanas. Sin embargo mientras se siga dependiendo de la energía obtenida de fuentes no renovables y contaminantes, es posible que los beneficios obtenidos sean opacados por las consecuencias de la contaminación, el daño a la biodiversidad y el medio ambiente.

9. TRABAJOS FUTUROS

Al unir los sistemas de automatización con el campo de la agronomía industrial y la hidroponía se abre un nuevo mundo con diversas posibilidades para mejorar la calidad de vida y aprovechar mejor los recursos.

Una posible adaptación del sistema ya implementado en este proyecto es el control automatizado de la iluminación de un cultivo en interior o indoor. Ya sea que las condiciones climáticas no permitan una buena recepción de la luz o el cultivo se encuentre dentro de un lugar que no permita el paso de la luz solar, el uso de la luz artificial es una buena opción para suplir al cultivo la luz necesaria. Mediante un control digital se puede implementar un sistema que imite los ciclos de luz natural para los periodos de crecimiento y floración. En la figura 42 se muestra un ejemplo del uso de la luz artificial en un cultivo hidropónico, el sistema es implementado por la compañía japonesa Spread la cual implementa sistemas de cultivos hidropónicos usando el espacio vertical. [23]



Figura 42. Uso de la luz artificial en un cultivo hidropónico implementado por la compañía japonesa Spread. [24]

A medida que la población mundial aumenta, se reduce el espacio para cultivar y aumenta la demanda de alimentos. Una potencial solución, es la implementación de campos de cultivos en estructuras similares a los edificios. Con un control preciso de todas las variables que intervienen en la producción de hortalizas como la humedad, la luz, la solución nutritiva, la temperatura y la calidad del aire, es posible implementar un cultivo en cualquier espacio. Aprovechando el espacio vertical es posible aumentar la productividad en un área reducida. Si el sistema de cultivo vertical se ubica en un área urbana, se pueden ahorrar recursos como el combustible usado para transportar la mercancía desde los campos hasta la ciudad. La sistematización y optimización de los procesos de producción de un cultivo vertical podría necesitar recursos en el área de la automatización y manipulación de grandes cantidades de información, sin embargo las ventajas y los resultados pueden superar a los desafíos y retos iniciales. En la figura 43 se muestra un prototipo de edificio realizado por la empresa Plantagon, el cual se pretende usar para cultivar de manera masiva aprovechando el espacio vertical. [25]

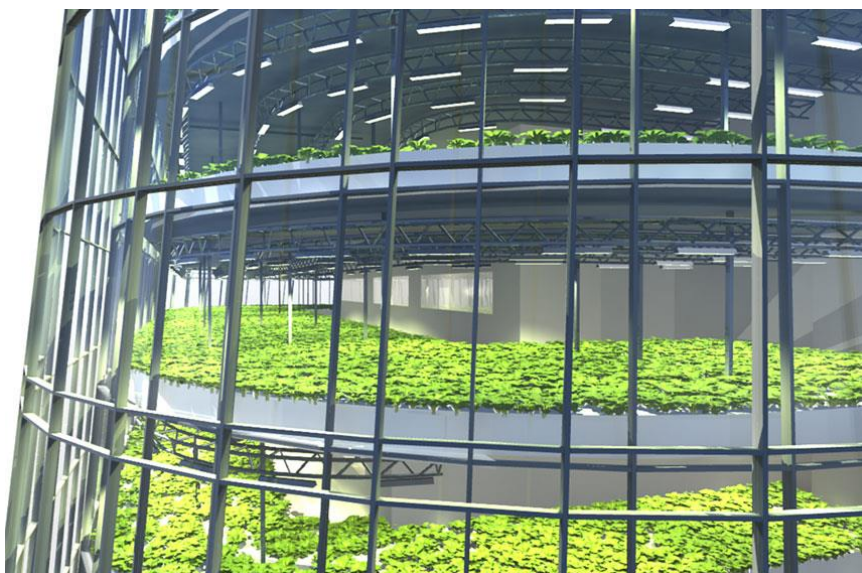


Figura 43. Ilustración del diseño de un prototipo de un edificio que produce cultivos hidropónicos de manera masiva. [26]

Existen diversas especies que pueden ser cultivadas usando sistemas hidropónicos, el cultivo de fresa es un buen candidato para ser usado en el sistema implementado en este proyecto. La fresa requiere unas condiciones ambientales muy precisas, similares a las requeridas en el cultivo de lechuga. [27]

10. IMPACTO SOCIAL

El cuidado del medio ambiente y los recursos naturales son fundamentales para sustentar una mejor calidad de vida en el futuro. A partir de la implementación de las nuevas tecnologías y herramientas en el área agrícola es posible educar y generar un sentido de conciencia en la sociedad frente a las problemáticas ambientales como la contaminación del suelo y el agua. La automatización y el control de sistemas de producción agroindustrial, puede ofrecer oportunidades de emprendimiento, debido a que es un campo aun en desarrollo, en especial en Latinoamérica. La técnica de la hidroponía permite ahorrar grandes cantidades de agua en comparación de los cultivos tradicionales. La mayoría de métodos actuales de producción agrícola dependen del uso de agentes químicos como los pesticidas, fungicidas y herbicidas, los cuales perjudican tanto al medio ambiente como a los seres que consumen esos alimentos.

Las aguas no tratadas y los agroquímicos usados en la agricultura para controlar a los huéspedes indeseados pueden generar diversas enfermedades gastrointestinales. Los cultivos hidropónicos no necesitan de herbicidas ni pesticidas debido a que las plantas crecen en tuberías ubicadas dentro de un invernadero. El agua usada es recirculada con la solución nutritiva. El consumo de los alimentos producidos por los cultivos hidropónicos es más sano y no perjudica a la salud del consumidor debido a que no se usan químicos tóxicos. A pesar de que la solución nutritiva se compone de varias sales y compuestos químicos, las plantas solo interactúan con las sales por medio de las raíces y toman solo lo necesario para su crecimiento. [28]

Si el cultivo hidropónico se encuentra en un área urbana, puede mejorar la calidad del aire de la ciudad. Las plantas absorben el dióxido de carbono y emiten oxígeno a la atmosfera, lo cual es beneficioso para mejorar la calidad del aire y la vida en general. Sin embargo los sistemas eléctricos y electrónicos usados para mantener el cultivo, pueden generar un consumo elevado de energía la cual en la actualidad aún se obtiene en su mayoría de fuentes convencionales como el petróleo y el carbón. Por otra parte implementar cultivos masivos en las ciudades puede ser desfavorable para las comunidades rurales que dependen de la industria agrícola convencional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. O. Huterwal, Hidroponía, Cultivo de plantas sin tierra, Buenos Aires Republica de argentina 1986
- [2] Javier Sanchez V, Fertirrigación: Principios, Factores, Aplicaciones, Lima, 2000
- [3] Gilda Carrasco, La empresa hidropónica de mediana escala: la técnica de la solución nutritiva recirculaste ("NFT"), Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, 1996
- [4] Milton A Gutierrez, Medición y corrección en tiempo real de la solución nutritiva en cultivos hidropónicos, Facultad de Ingeniería electrónica, Universidad Santo Tomas, Trabajo De Grado, 1992
- [5] D. Yolanda, H. Hindersah, Febrian H, Muhammad A., Internet of Things using Publish and Subscribe Method Cloud-based Application to NFT-based Hydroponic System. Indonesia, 2016
- [6] D. Yolanda, H. Hindersah, Febrian H, Muhammad A., Implementation of Real-Time Fuzzy Logic Control for NFT-Based Hydroponic System on Internet of Things Environment. Indonesia, 2016
- [7] Jumras P., NathapHon B, Siriwan W, Teerayut H., Internet of Things for Planting in Smart Farm Hydroponics Style, Thailand, 2016
- [8] Manejo integrado de plagas y enfermedades en cultivos hidropónicos en invernadero, Manual práctico, 2002
- [9] Jazmin Carolina Ortega Ortiz, Desarrollo de un prototipo de adquisición de variables ambientales en cultivos hidropónicos de lechuga, mediante una red de sensores, utilizando un sistema embebido, Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de san Buenaventura, 2014.
- [10] Andrew Villate Paez, Prototipo de un silo electrónico de papa, Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería electrónica, Universidad Santo Tomas, 1995
- [11] Victor Otazu, Manual de producción de semilla de papa de calidad usando aeroponia, Peru, 2010
- [12] Jorge Gutierrez Tlahque, Producción hidropónica de lechuga con y sin recirculación de solución nutritiva, Universidad Autónoma Chapingo, México, 2011

- [13] Katsuhiko Ogata, Ingeniería De Control Moderna, Pearson Educación, España, 2010
- [14] Vistronica SAS. Kits de Electrónica y Robótica Educativa. Abril 2020. Recuperado de <https://www.vistronica.com/>
- [15] DFRobot. Quality Arduino IoT DIY Electronic Kits. Abril 2020. Recuperado de <https://www.dfrobot.com/>
- [16] Mouser Electronics. Electronic components distributor. Abril 2020. Recuperado de <https://co.mouser.com/>
- [17] Makerlab Electronics. Distributor Electronic Product and Equipments. Abril 2020. Recuperado de <https://www.makerlab-electronics.com/>
- [18] Naylamp Mechatronics. Perú. Abril 2020. Recuperado de <https://naylampmechatronics.com/>
- [19] Evans, D. (2011). Internet de las cosas. Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo. San José, CA: Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG).
- [20] Ivan Grokhotkov, "ESP8266 Arduino Core Documentation", Noviembre 2019.
- [21] Teachmemicro. Microcontroller Tutorials, Arduino, Raspberry Pi, PIC, Beaglebone Resources. Abril 2020. Recuperado de <http://www.teachmemicro.com/>
- [22] "DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer". Dallas Semiconductor. Datasheet.
- [23] Franklin P. Montahuano, Automatización de un contenedor de carga para el control de clima e iluminación de cultivos hidropónicos. Ecuador, Quito, Alfa omega, Trabajo De Grado. 2018
- [24] Spread Co. Ltd. Plant Factory, Agricultural Business. Abril 2020. Recuperado de <http://spread.co.jp/>
- [25] Campos de cultivo en edificios para alimentar a las ciudades. El Futuro Es Apasionante de Vodafone. Archivo de video. Mayo 2018. Recuperado de (<https://www.youtube.com/watch?v=1RSkKTJm9Lw>)
- [26] Plantagon. Urban Agritechture. Abril 2020. Recuperado de <http://www.plantagon.com/>

[27] Eduardo G., Julio M., Henry M., Jhonny O., Carlos S., Sistemas embebidos open source para la caracterización de la humedad en un cultivo hidropónico de fresa por la variación climática, Artículo de Investigación. Revista Polo del conocimiento. Abril 2019

[28] Manuel Roberto Roncal, "Cultivos semihidroponicos, alternativa para reducir las enfermedades digestivas en la ciudad de celendín – cajamarca", Perú, Abril 2008.

[29] Tomate hidropónico: acercamiento a otras alternativas, Navarra agraria, Edición 179, pp.41-44, 2010

[30] Antonio C. Solé, Instrumentación Industrial, México D.F, Alfaomega, 2011