SISTEMA DE CONTROL DIFUSO DE PH PARA UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGA Y MONITOREO POR IOT DE LAS VARIABLES DE PROCESO



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autor
Braian Camilo Lara Hidalgo
Gustavo Antonio Guerrero Camacho

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Control y Automatización
Bogotá D.C. enero, 2023

SISTEMA DE CONTROL DIFUSO DE PH PARA UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGA Y MONITOREO POR IOT DE LAS VARIABLES DE PROCESO

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autor
Braian Camilo Lara Hidalgo, 20201383025, blarah@correo.udistrital.edu.co
Gustavo Antonio Guerrero Camacho, 20201383006,
gaguerreroc@ correo.udistrital.edu.co

Modalidad
Monografía
Presentado para optar al título de: Ingeniero en Control y Automatización

Director
M. Sc. Jorge Eduardo Porras Bohada

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Control y Automatización
Bogotá D.C. enero, 2023

Dedicatoria

En esta breve sección queremos agradecer a nuestros padres, hermanos y familiares que nos acompañaron durante todos este proceso educativo, ya que detrás de este logro no solo se encuentra nuestro esfuerzo como estudiantes, sino la ayuda, paciencia y apoyo de cada persona que vivió con nosotros nuestro periodo universitario. También queremos dar las gracias a los diferentes docentes que compartieron su conocimiento con nosotros, sin su ayuda y guía no se hubiera podido cumplir esta meta.

Índice

Dedicatoria i
Índice ii
Índice de Figuras iv
Índice de Tablas vi
Índice de anexos vii
Glosario viii
Lista de Abreviaturas y Siglas ix
1. Resumen x
2. Introducción 1
3. Planteamiento del problema 2
4. Justificación 3
5. Objetivos 4
5.1. Objetivo General 4
5.2. Objetivos específicos 4
6. Marco de referencia 5
6.1. Antecedentes 5
6.2. Marco teórico 12
6.2.1. Cultivo hidropónico 12
6.2.2. Potencial de Hidrógeno (pH) 14
6.2.3. El efecto del pH en las plantas 14
6.2.4. Radiación solar 15
6.2.5. Solución nutritiva 16
6.2.6. Lechuga 18
6.2.7. Raspberry PI 3 B+ 20
6.2.8. PSOC 21
6.2.9. Python 22
6.2.10. Nube 22
6.2.11. IoT 22
6.2.12. MongoDB 23
6.2.13. Azure IoT Central 24
6.2.14. Control difuso. 24
6.3. Marco Legal 27
7. Metodología 27
6.2. Circuitos de control y adquisición de datos 29
6.2.1. Comunicación serial 29
6.2.2. Sensor PH 30
6.2.3. Sensor Electro-conductividad 34
6.2.4. Sensor de radiación solar 35
6.2.5. Sensor DTH11 36
6.2.6. Sensor DS18B20 37
6.2.7. Sensores de nivel 37

6.2.8. Motobombas de dosificación 38
6.2.9. Motobomba de recirculación y mezclador 39
7.1. Control difuso 40
7.1.1. Universo del discurso 41
7.1.2. Determinación de las variables Lingüísticas 41
7.1.3. Reglas de control 42
7.2. Programación y comunicación 44
6.2.1 Raspberry Pi3 44
6.2.2 PSOC 5LP 52
6.2.3. Conexión MongoDB 58
8. Resultados 60
8.1. Estructura cultivo hidropónico 60
8.2. Tablero de control 61
8.3. Interfaz grafica 63
8.4. Medición de las variables de proceso 64
8.5. Producto final 67
9. Conclusiones y Recomendaciones 71
10. Referencias 73

Índice de Figuras

Figura 1. Prototipo del cultivo hidropónico 6
Figura 2. Sistema de cultivo hidropónico horizontal..... 7
Figura 3. Esquema ilustrativo de sistema NFT..... 14
Figura 4. Representación de la escala del PH..... 15
Figura 5 Sensor electro conductividad 17
Figura 6. Ficha Técnica de la lechuga. 18
Figura 7. Estados de crecimiento de la planta de lechuga. 19
Figura 8 Diagrama de un controlador difuso..... 25
Figura 10. Intersección y unión conjuntos difusos 27
Figura 11. CAD estructura del cultivo..... 28
Figura 12. Vista frontal y superior. 29
Figura 13. Comunicación serial..... 29
Figura 14. Conexión modulo sensor de Ph..... 31
Figura 15 Buffer de pH..... 31
Figura 16 Medicion Buffer Hi7010..... 32
Figura 17. Grafica liberalización del sensor PH..... 33
Figura 18. Conexión módulo Electro conductividad (Diseño original). 35
Figura 19 Sensor de radiación solar (Diseño original)..... 35
Figura 20 Conexion sensor de humedad (Diseño original) 36
Figura 21. Conexión sensor DS18B20 (Diseño original)..... 37
Figura 22. Conexión sensores de nivel (Diseño original) 38
Figura 23. Conexión driver L298N (Diseño original)..... 38
Figura 24. Conexión módulos relés (Diseño original). 39
Figura 25. Representación gráfica variables lingüísticas de entrada (Diseño original). 41
Figura 26. Representación gráfica variables lingüísticas de salida (Diseño original)..... 42
Figura 27. Simulación reglas del controlador Matlab (Diseño original)..... 43
Figura 28. Curva de control simulación Matlab (Diseño original)..... 43
Figura 29. Conexión lógica Psoc Creator sensor DS18b20 (Diseño original)..... 52
Figura 30. Multiplexor entradas análogas (Diseño original)..... 52
Figura 31. Conexión lógica Psoc Creator comunicación serial (Diseño original). 52
Figura 32. Conexión lógica Psoc Creator pines digitales (Diseño original) 53
Figura 33. Estructura cultivo hidropónico (Fotografía original)..... 61
Figura 34.Interior tablero de control (Fotografía original)..... 62
Figura 35. Exterior tablero de control (Fotografía original)..... 62
Figura 36. Interfaz Gráfica (Fotografía original)..... 63
Figura 37. Interfaz Azure (Fotografía original)..... 64
Figura 38. Grafica PH..... 64
Figura 39. PH vs Temperatura..... 65
Figura 40. Grafica de temperatura..... 66
Figura 41. Grafica EC vs PH..... 66
Figura 42. Plántula de lechuga (Fotografía original)..... 67
Figura 43. Primeras Hojas de lechuga (Fotografía original). 67
Figura 44. Crecimiento de las diferentes plantas. (Fotografía original)..... 68

Figura 45. Variación del crecimiento (Fotografía original). 68
Figura 46. Variación 2 del crecimiento (Fotografía original). 69
Figura 47. Lechuga saludable (Fotografía original). 69
Figura 48. Plantas en estado de deterioro (Fotografía original). 70
Figura 49. Raíz afectada por algas (Fotografía original). 71

Índice de Tablas

Tabla 1. Absorción con respecto al pH 6
Tabla 2. Trabajos referentes 9
Tabla 3. Trabajos universidad Distrital Francisco José de Caldas 12
Tabla 4 Solución de hidroponía A 17
Tabla 5 Solución de hidroponía B 17
Tabla 6. Solución hidropónica C. 18
Tabla 7. Valores de referencia sensor de pH. 32
Tabla 8 Ficha técnica del sensor DS18B20 37
Tabla 9. Universo del discurso 41
Tabla 10. Variables Lingüísticas 41
Tabla 11. Reglas del controlador 42

Índice de anexos

1. Diagrama esquemático del dispositivo

Glosario

Concepto	Explicación breve y detallada del concepto
pH	La sigla significa Porcentaje de Hidrógeno y su escala permite determinar el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia acuosa
UV	La radiación Ultravioleta es un tipo de radiación no ionizante que emite el sol y puede ser reproducida de forma artificial con el uso de lámparas especiales.
Control difuso	Los reguladores difusos son reguladores no-lineales. Por medio de la selección adecuada de funciones de pertenencia y del establecimiento de una base de reglas se pueden compensar no-linealidades en el sistema de regulación de procesos.
Hidroponía	Método de cultivo industrial de plantas que en lugar de tierra utiliza únicamente soluciones acuosas con nutrientes químicos disueltos, o con sustratos estériles como soporte de la raíz de las plantas.
NFT	Técnica de película de nutrientes, es una de las técnicas más utilizadas en la hidroponía, la cual se basa en la circulación continua o intermitente de una fina lámina de solución nutritiva a través de las raíces del cultivo.
Base de datos	Un conjunto de información perteneciente a un mismo contexto, ordenada de modo sistemático para su posterior recuperación, análisis y/o transmisión.
Nube	Hace referencia a los servidores a los que se accede a través de Internet, y al software y bases de datos que se ejecutan en esos servidores.
HMI	Estas siglas significa Human-Machine interface y hacen referencia a un panel que permite a un usuario leer la información pertinente de una máquina en un proceso y en algunas ocasiones también permite interactuar con dicha máquina.

Lista de Abreviaturas y Siglas

Sigla/Abreviatura	Significado
PSOC	Programable System on Chip
IoT	Internet of Things
DB	Data Base
I2C	Inter Integrated circuit
pH	Potencial de hidrógeno
EC	Electro Conductividad
UV	Ultra-violeta
SIMO	Single Input – Multiple output
HMI	Human Machine Interface
EPG	Error positivo grande
EPP	Error positivo pequeño
EC	Error cero
ENP	Error negativo pequeño
ENG	Error negativo grande
VNC	Virtual Network Computing
SSH	Secure Shell
NFT	Nutrient Film Technique
RS232	Recomend Standard 232

1. Resumen

Actualmente, se ha popularizado y masificado en gran medida la implementación de cultivos urbanos en muchas ciudades del país, esto ya que los alimentos obtenidos en casa suelen ser de gran confianza para el consumidor, dado que los pesticidas, plagas y enfermedades que estos cultivos suelen padecer son de mayor control y conocimiento para quien los cultiva. Además, es enorme la variedad de plantas que se pueden tener en casa y, dependiendo de la técnica de cultivo a usar, se puede optimizar el uso de espacios y recursos en casa.

Observando el contexto de los años anteriores, se puede resaltar la dificultad para la obtención de alimentos de calidad cuando tiempos de crisis golpean la sociedad en general, y esto representa la necesidad de que cada persona tenga otra alternativa para la adquisición de alimentos que no sean o dependan directamente de los comercios locales. Sin embargo, los cultivos, que tradicionalmente se hacen en tierra, representan un obstáculo para los centros urbanos o entornos domésticos de algunas personas que pueden ver el auto cultivo de alimentos como una opción.

Un sistema de cultivo con la técnica de la hidroponía, son por muchos motivos, una de las mejores prácticas para poder tener un cultivo urbano en un espacio reducido y sin la necesidad de emplear tierra para la planta a cultivar, y no solo por las cualidades propias de la técnica de cultivo, la cual es sumamente eficiente para cultivar plantas como la lechuga, sino por la gran factibilidad de la tecnificación del proceso, ya que diversas herramientas permiten el control, monitoreo y verificación del estado del cultivo. En adición, la combinación con técnicas de control de procesos (controlador difuso) junto a la creciente tendencia del IoT, permite el desarrollo de un sistema, que facilita al usuario la producción de alimentos y monitoreo del proceso.
Al implementar un sistema de cultivo NFT, con regulación de pH aplicando un controlador difuso a la dosificación de los reguladores suministrados a la sustancia nutritiva que se irriga a las raíces de las lechugas cultivadas, se logró obtener el crecimiento de estas en un estado de salud óptimo que permite su consumo sin dependencia de pesticidas o tierra, que representan los mayores impedimentos para los cultivos urbanos y sin tener que afrontar condiciones climáticas demasiado adversas o plagas propias de las zonas rurales.
Palabras claves: Control difuso, Cultivos urbanos, Hidroponía, IoT, Lechuga.

2. Introducción

Hoy en día la agricultura tradicional se encuentra en un proceso de tecnificación, que busca aumentar la productividad y mejorar la calidad de los productos que el agricultor desea comercializar, pero la agricultura a gran escala no es la única que requiere modernización.

Los cultivos urbanos son una tendencia creciente en las urbes de distintas zonas del país y teniendo en cuenta que en la ciudad una persona difícilmente podrá dedicarse a la agricultura como forma de subsistencia o actividad comercial, surge la necesidad de que el agricultor pueda dedicarse a un mayor número de actividades que no necesariamente deben estar relacionadas con el cultivo que se encuentra en casa.

Es importante destacar que la regulación del pH de las sustancias con las que se riegan los cultivos hidropónicos son controladas de forma manual, esto representa una tarea constante para quien busca poder cultivar sus propios alimentos, por ende, la automatización del control de esta característica facilita en gran medida la tarea que debe realizar el agricultor urbano, ya que no debe estar realizando mediciones rudimentarias cuando se va a realizar una circulación de fluido, sino que el trabajo que este debe realizar se limita a mantener disponibilidad de las sustancias que el sistema de control requiera para regular el pH de la sustancia antes de realizar los riegos programados.

3. Planteamiento del problema

Actualmente, la crisis generada por la pandemia del COVID-19 ha significado un cambio en la vida de la ciudadanía. Dichos cambios han desembocado en la necesidad de adaptación para suplir las necesidades básicas. Debido a los confinamientos se genera una gran dificultad para la obtención de los alimentos y la especulación ha elevado los precios de algunos de ellos. Lo anterior crea la necesidad de aplicar una forma de producción de alimentos en las zonas urbanas, aun cuando el espacio dentro de una casa de uso residencial es muy limitado y requiriendo del mínimo conocimiento o asesoría sobre la producción del alimento que se desee producir. Teniendo en cuenta que el usuario no se dedicará exclusivamente a actividades de agricultura, se requeriría una forma práctica para poder monitorear el cultivo.

4. Justificación

Desde el año 1930 se ha empleado la técnica de la hidroponía como método para el cultivo de algunos vegetales en lugares poco favorables para la implementación de un cultivo tradicional. Esta novedosa forma de cultivar le permite a quien lo emplea producir un vegetal de gran calidad, con un costo relativamente bajo y con una mayor eficiencia que en algunos otros métodos. De la hidroponía se destaca la poca necesidad de suelo para la producción de alimentos, la baja susceptibilidad de los cultivos a agentes bacterianos o plagas presentes en la tierra y a la facilidad en el control de las variables más relevantes para el desarrollo de una planta sana y apta para el consumo humano. Otra facilidad que posibilita esta técnica, es que las variables de control fundamentales para el desarrollo de la planta pueden ser monitoreadas y supervisadas de forma remota, esto da la capacidad de almacenar los datos del cultivo como humedad, pH, cantidad de riegos en el día. Lo anterior permitiría tomar decisiones y reconfigurar el control de dichas variables para mantener el cultivo en condiciones óptimas.

5. Objetivos

5.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de control difuso para un cultivo hidropónico con monitoreo por IoT para producir lechuga al interior de una residencia de la zona urbana de Bogotá.

5.2. Objetivos específicos

- Desarrollar e implementar un controlador difuso por el método de Mamdani para manipular las características de la solución nutritiva de un cultivo hidropónico a través de la medición de PH.
- Permitir la monitorización por IoT almacenando en base de datos las variables de PH, conductividad eléctrica, temperatura y radiación solar del cultivo al subir los datos a la nube para su consulta y análisis.
- Realizar la caracterización del sensor de PH.
- Diseñar e implementar interfaz gráfica (HMI) para la supervisión del cultivo hidropónico.

6. Marco de referencia

6.1. Antecedentes

Según estudios de las naciones unidas, se estima que para el año 2050 la población mundial alcanzará una cifra aproximada a los 9.7 billones de habitantes, y cerca del 54.4% habitará en zonas urbanas. Lo anterior causará un fuerte impacto en múltiples áreas que de forma directa o indirecta influyen en la vida humana, de estas destaca la agricultura, ya que las áreas de cultivo existentes tienen una extensión definida o limitada, y la sobreexplotación de las áreas empleadas actualmente ocasiona la erosión de las mismas, y con el paso del tiempo serán totalmente estériles e inútiles para los cultivos de consumo. (Yolanda et al., 2017)

Tratando de mitigar la problemática mencionada previamente, a lo largo del tiempo han ido sugiriendo y desarrollando nuevas técnicas que permitan cultivar alimentos sin depender exclusivamente de grandes extensiones de tierra fértil, una técnica que ha tomado cada vez más fuerza en los últimos años es la hidroponía

A pesar de la tendencia que ha generado dicho método, la hidroponía no es una técnica del nuevo milenio. Apenas en el año 382 a.C. se empleaba la irrigación de las raíces para generar crecimiento en las plantas, y posteriormente en el año 1600 se documentó por primera vez el hecho de que los cultivos obtienen nutrientes en el agua que se empleaba para regar sus raíces. Y es este el principio en el cual se basa esta técnica.

Actualmente la hidroponía se aplica ampliamente en el campo del cultivo para venta de hortalizas de consumo, en este ámbito se ha generado un desarrollo de alta tecnología que permite optimizar la relación costo/beneficio cuando se trata de la producción de una empresa dedicada a esta labor. Sin embargo, la creciente necesidad de obtención de alimentos ha redefinido la aplicabilidad de la hidroponía.

Con la cada vez más común práctica del cultivo urbano, la hidroponía se ha ido empleando de forma “masiva” como la técnica predilecta en dichos cultivos, ya que los requisitos para poder implementar un cultivo de estos son mínimos, a pesar de que el costo inicial es relativamente alto (empleando los fondos para la construcción de la estructura de cultivo, obtención de sustancias a emplear y, en caso de requerirlo, la automatización del proceso de cultivo) la facilidad en la obtención de un cultivo sano y a bajo costo es mucho más sencillo que con otras técnicas, en adición, las características de la planta cosechada son mucho mejores que una planta cultivada con técnicas tradicionales, ya que no se requiere de pesticidas o herbicidas para el control de plagas.

La implementación de la hidroponía para entornos urbanos, con bajos recursos o con la finalidad de producir alimentos para autoconsumo se denomina **Hidroponía simplificada,** esta se caracteriza por emplear tecnologías sencillas, baja inversión y la aplicación de mano de obra familiar para la obtención del producto a consumir (*LA HIDROPONIA COMO PROYECTOS EMPRENDEDORES.Pdf*, n.d.).

Dado que cada día es un poco más habitual encontrar este tipo de cultivos en la ciudad, se han ido desarrollando múltiples proyectos con el fin de lograr una mayor eficiencia en la producción de vegetales de hoja con cada vez menos intervención humana, incluso en un escenario de baja tecnología como lo puede ser el patio de una casa.

El control de PH influye sustancialmente en la capacidad de absorción y solubilidad de numerosos elementos nutritivos por la raíz. Lo ideal es tener un valor de pH entre 5 a 6, tener valores que no

estén en este rango dificultan la absorción de diferentes nutrientes como los expuestos en la Tabla 1

Dificil o imposible de absorber a ph ≤5	Difícil o imposible de absorber a ph ≥ 6
Nitrógeno (N)	Boro(B)
Molibdeno(Mo)	Fosfotos(PO)
Azure(S)	Cobre(Cu)

Tabla 1. Absorción con respecto al pH (*La Influencia Del PH En El Cultivo - Anthura*, n.d.)

Proyectos como el de "Aplication of fuzzy logic and neural network to the process control of solution PH in deep Hydroponic culture" implementado en Japón, en el año 1991, basa su funcionalidad en el control del porcentaje de hidrógeno (PH), tomando como base una sustancia nutritiva y aplicando sustancias ácidas o alcalinas para mantener este indicador en condiciones óptimas para el adecuado crecimiento de la planta. Este control se basa en la implementación de lógica difusa en conjunto al diseño de redes neuronales.
El diseño del prototipo es el siguiente:

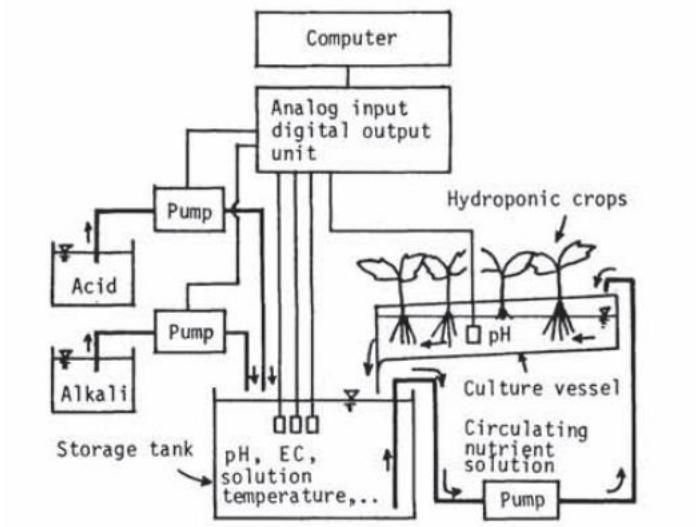


Figura 1. Prototipo del cultivo hidropónico (Cultivo Hidropónico: Qué Es y Cuáles Son Sus Beneficios | Discovery Latinoamérica, n.d.)

Como se observa en la imagen anterior, se desarrolló un sistema de cultivo horizontal con flujo y reflujo de la sustancia nutritiva, adicionalmente al tanque de almacenamiento se cuenta con un tanque de ácido y uno de elemento alcalino, estas dos sustancias son las encargadas de regular el PH en el sistema y son suministradas al tanque de almacenamiento de forma controlada empleando un par de bombas.

Como conclusión, se determina que a pesar de la complejidad que representa el control del PH perse, la lógica difusa permite la obtención de una regulación que satisface los requisitos de la planta a cultivar, de modo que posteriormente el sistema será implementado con diferentes plantas y métodos de control con el fin de validar cual configuración genera mejores resultados (Tao & Burkhardt, 1994).

En el proyecto "DEVELOPMENT OF A pH CONTROL SYSTEM FOR NUTRIENT SOLUTION IN EBB AND FLOW HYDROPONIC CULTURE BASED ON FUZZY LOGIC", describe cómo se implementó un control difuso para PH, en la figura 2 se muestra el diagrama esquemático de flujo y reflujo del sistema de control de pH para nutrientes en la solución. El recipiente de cultivo consta de seis bloques, cada uno de los cuales contiene cuatro flores en macetas. La solución nutritiva fluye y llena el cultivo de 5 - 10 cm de la base de la maceta. La tasa de flujo de la nutrición utilizada en este experimento fue de 2,4 l/min y la medición se realizó con un pH-metro Hanna HI8710E. La solución nutritiva utilizada es O.3M H3P04 y 0.4 M KOH. La válvula utilizada es de tipo solenoide de 1/8 pulgadas de diámetro. La adquisición de los datos de pH y el control de entradas y salidas fue por medio del PCL-812PG. La calibración de la tasa de flujo se realizó en el Marriott tubo (Suhardiyanto et al., 2001).

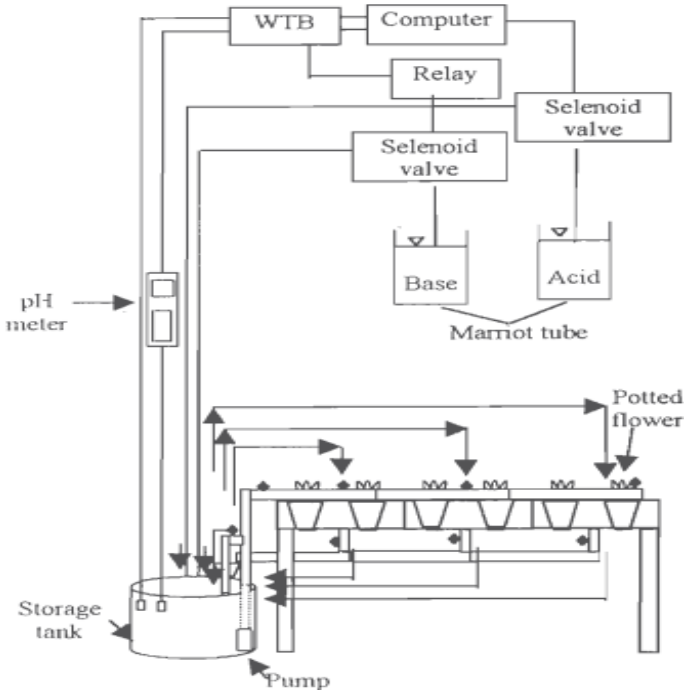


Figura 2. Sistema de cultivo hidropónico horizontal (Cultivo Hidropónico: Qué Es y Cuáles Son Sus Beneficios | Discovery Latinoamérica, n.d.)

Otros proyectos proponen métodos un poco más complejos y elaborados, uno de estos es "MODELlNG pH AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN HYDROPONICS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS", quienes implementan una IA que analiza las variables de PH, conductividad eléctrica y temperatura de la solución nutritiva, estas son contrastadas con una

base de datos (con la cual es entrenada la IA) y busca realizar un modelo predictivo del crecimiento del cultivo.
Se hace el estudio con múltiples arquitecturas de una red neuronal y se contrastan los resultados para determinar cuál de ellas es la más acertada al resultado final (Ferentinos et al., 2000).

Actualmente con el crecimiento de la implementación de estos cultivos, se han ido produciendo distintos prototipos con la misma finalidad y/o aplicabilidad, sin embargo, los métodos o tecnologías implementadas son diferentes entre sí, algunos de los más representativos se documentan en la siguiente tabla:

Título	Autor	Año	Características
Raspberry Pi based pH Control for nutrient Film Hydroponic System (Singgeta et al., 2018)	• Ryan Laksmana Singgetaa • Hung-Wei Linb • Yeong-Hwa Changa	2016	Control: PID de PH Adquisición de datos: PIC18F4525 Microordenador: Raspberry pi Aplicación: Monitoreo, control y almacenamiento de la información recopilada en un servidor local.
Implementation of Real-Time Fuzzy Logic Control for NFT-Based Hydroponic System on Internet of Things Environment (Yolanda et al., 2017).	• Desta Yolanda • Hilwadi Hindersah • Febrian Hadiatna • Muhammad Agus Triawan	2016	Control: difuso de pH y electro conductividad Adquisición de datos: ATMega328 Controlador: Computador con interfaz LabVIEW - XBEE Aplicación: Monitoreo y control de variables (PH-conductividad eléctrica), implementación de la Nube en un servidor Linux.
Internet of Things Based Plant Monitoring System for Hydroponics Agriculture (Shewale & Chaudhari, 2018).	• Mitali V. Shewale • Devendra S. Chaudhari	2018	Control: Difuso (Mandani) PH - conductividad eléctrica. Controlador: LPC2138 Aplicación: Monitoreo y control de variables, se implementa una app en Android studio que permite consultar información y modificar el controlador.

Fuzzy Ponics: a Fuzzy Based System to Control Temperature, Relative Humidity, Electrical Conductivity and PH of Hydroponics (Gyulyev et al., 2018).	• Armie E. Pakzad • Abbas Ali Pakzad	2018	Este proyecto en particular consiste en el desarrollo de un controlador en un ambiente simulado (sin un prototipo para aplicar y obtener resultados prácticos), se pretende diseñar un controlador difuso que permita la regulación de múltiples variables de forma simultánea (PH, conductividad eléctrica, humedad relativa y temperatura) en un ambiente controlado.
Hydroponics Farm Monitoring Using Data Fusion and Fuzzy Logic Algorithm (Bacalla & Vinluan, 2019).	• Alex C. Bacalla • Albert A. Vinluan	2019	Al igual que el anterior, este proyecto diseña un control difuso para múltiples variables (PH, temperatura, nivel del agua y conductividad eléctrica) y de la misma forma se desarrolla en un ambiente simulado, en este caso Matlab.
Smart Hydroculture Control System Based On Iot And Fuzzy Logic (Herman & Surantha, 2020).	• Herman and Nico Surantha	2020	Control: Difuso de PH, nivel del agua y conductividad eléctrica Controlador y adquisición de datos: Arduino Aplicación: Monitoreo y control de variables, almacenamiento de datos y consulta desde página web.
Control de las soluciones y variables ambientales de un cultivo hidropónico de lechuga mediante un sistema embebido conectado a internet (Rodriguez Moncada, 2020).	• Luis Miguel Rodríguez Moncada	2020	Control: PID para controlar temperatura, humedad y PH Controlador: ESP8622 Aplicación: Monitoreo y control de variables con almacenamiento de datos en un servidor local.

Tabla 2. Trabajos referentes
Universidad distrital

Título	Autor	Año	Características
Simulación sistema de irrigación en cultivo hidropónico (Aceh & kue tradisional khas Aceh, 2020).	• Nancy Janeth Rodríguez Díaz	2020	simulación de Cultivo hidropónico ubicado en el municipio de Cajicá, implementación basada software mediante ti portal, sin desarrollo practico. Tesis de grado facultad de ingeniería especialización en informática y automática industrial
Diseño del sistema NFT para la unidad productiva de lechuga hidropónica de la asociación el trébol en Madrid Cundinamarca (Fitria, 2013)	• Jairo González Peñarete	2020	El proyecto se basó en el desarrollo del sistema NFT para la unidad productiva de lechuga hidropónica, logrando aumentar la capacidad de producción a 3.840 unidades de producto mediante la redistribución del espacio. Se evalúa la viabilidad financiera de la implementación del sistema NFT para la unidad productiva de lechuga hidropónica de la Asociación El Trébol, en Madrid Cundinamarca. Tesis especialización en Gestión de Proyectos de Ingeniería Facultad de Ingeniería
Implementación de un prototipo de oxigenador accionado	• Héctor Javier Alonso Melo	2020	Se evidencia el desarrollo e implementación de un

por energía eólica en un cultivo hidropónico de raíz flotante en la localidad de ciudad bolívar (Amaya & Cruz, 2016)	• Andrés Mauricio Espitia Acevedo		sistema de oxigenación para cultivos hidropónicos de raíz flotante, utilizando energía eólica, para esto se realizó la selección del tipo de rotor adecuado para las necesidades a suplir, y se tomó como base de trabajo las condiciones del viento de la localidad de Ciudad Bolívar, en Bogotá Colombia. Tesis de grado facultad tecnológica Proyecto curricular tecnología mecánica.
Análisis técnico financiero de sistemas productivos de lechuga hidropónica para su implementación en invernaderos, edificaciones, y terrazas en Bogotá y sus cercanías (Gasc et al., 2018a).	• German Andrey Cetina Galviz • Paula Alejandra González Rincón	2018	Determinar la viabilidad para la producción de lechuga hidropónica en invernaderos, edificaciones y terrazas en la ciudad de Bogotá por medio del análisis de diferentes procesos y técnicas de producción, la viabilidad económica y financiera para la producción de lechuga por medio de un estudio financiero para su aplicación en Bogotá. Tesis de grado ingeniero industrial facultad de ingeniería
Diseño e implementación de un control de pH,	• Amaya • L. Cruz	2018	En este proyecto se plantea el control de

conductividad y monitoreo del nivel de agua para el cuidado cultivos hidropónicos de uso Doméstico (Alonso Melo et al., 2020).			nivel de la sustancia nutritiva que será suministrada al sistema, la cual ya se encuentra en condiciones de acides óptimas para la planta a cultivar. Se realiza un control simple On/Off de nivel y de flujo irrigado en las raíces de la planta Tesis de grado facultad de ingeniería especialización en informática y automática industrial
Estudio de factibilidad del diseño y montaje de sistemas de cultivos hidropónicos de lechuga en conjunto residencial okapi ii en la ciudad de Bogotá (Zamai et al., 2016).	• Dayann Eliana Obando • Jhon Jairo Ladino • Oscar Ignacio Solano	2016	Estudio de factibilidad del diseño y montaje de sistemas de cultivos hidropónicos de lechuga en conjunto residencial okapi ii en la ciudad de Bogotá.

Tabla 3. Trabajos universidad Distrital Francisco José de Caldas

6.2. Marco teórico

6.2.1. Cultivo hidropónico

Hidroponía, es un conjunto de técnicas que permite el cultivo de plantas en un medio libre de suelo. La hidroponía permite en estructuras simples o complejas producir plantas principalmente de tipo herbáceo aprovechando sitios o áreas como azoteas, suelos fértiles, terrenos escabrosos, invernaderos climatizados o no, etc. A partir de este concepto se desarrollaron técnicas que se apoyan en sustratos (medios que sostienen a la planta), o en sistemas con aportes de soluciones de nutrientes estáticos o circulantes, sin perder de vistas las necesidades de la planta como la temperatura, humedad, agua y nutrientes. La palabra hidroponía deriva del griego HIDRO (agua) y PONOS (labor o trabajo) lo cual significa literalmente trabajo en agua.

La hidroponía es una herramienta que permite el cultivo de plantas sin suelo, es decir sin tierra. Un cultivo hidropónico es un sistema aislado del suelo, utilizado para cultivar plantas cuyo crecimiento es posible gracias al suministro adecuado de los requerimientos hídrico- nutricionales, a través del agua y solución nutritiva. Con la técnica de cultivo sin suelo es posible obtener hortalizas de excelente calidad y sanidad, permitiendo un uso más eficiente del agua y los nutrientes (Beltrano & Gimenez, 2020).

Ventajas de los cultivos hidropónicos:

- Cultivos libres de parásitos, bacterias, hongos y contaminación.
- Reducción de costos de producción.
- Independencia de los fenómenos meteorológicos.
- Permite producir cosechas en contra estación
- Menos espacio y capital para una mayor producción.
- Ahorro de agua, que se puede reciclar.
- Ahorro de fertilizantes e insecticidas.
- Se evita la maquinaria agrícola (tractores, rastras, etcétera).
- Limpieza e higiene en el manejo del cultivo.
- Mayor precocidad de los cultivos.
- Alto porcentaje de automatización.
- Mejor y mayor calidad del producto.
- Altos rendimientos por unidad de superficie
- Aceleramiento en el proceso de cultivo
- Posibilidad de cosechar repetidamente la misma especie de planta al año
- Ahorro en el consumo del agua
- Productos libres de químicos no nutrientes.

La técnica hidropónica de cultivo con flujo laminar de nutrientes, NFT (Nutrient Film Technique) se desarrolló para aumentar la productividad del sector de producción hidropónica. De manera general, un cultivo NFT está compuesto por canales orientados de manera paralela unas con otras, las cuales se encuentran conectadas a un sistema de suministro de solución nutritiva en PVC. La solución nutritiva es suministrada de manera constante por una bomba que impulsa el líquido a través de la tubería y atraviesa los canales formando una lámina que alimenta las raíces de las plantas. El líquido se va desplazando por gravedad hasta llegar a un depósito en el que se encuentra la bomba que lo impulsa de nuevo hacia los canales. Los sistemas NFT son recomendados para cultivos de lechugas y hierbas, más que para otro tipo de plantas, porque las condiciones de oxígeno en la solución nutritiva no son las recomendables para cultivos como el tomate, pepino, entre otros (Silva et al., n.d.).

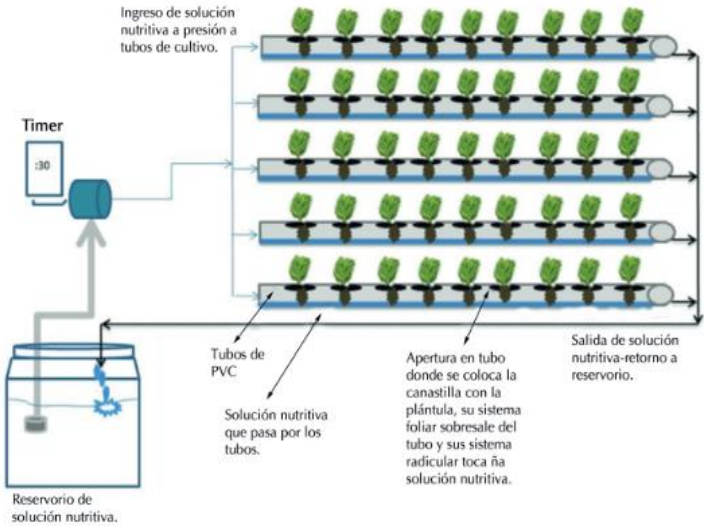


Figura 3. Esquema ilustrativo de sistema NFT (Cómo Producir Lechuga Hidroponica En Sistema NFT - InfoAgronomo, n.d.)

6.2.2. Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH o potencial de Hidrógeno se refiere a la concentración de iones de Hidrogeno (H+), los cuales determinan el grado de acidez o alcalinidad de una solución. El nivel de pH de la solución afecta las propiedades químicas de las sustancias que la componen, así como las propiedades de las raíces (particularmente, la carga eléctrica alrededor de ellas). La consecuencia es que hay sustancias que son más fáciles de absorber por las raíces a un cierto pH, y otras que requieren un pH diferente para ser absorbidas.

Las plantas asimilan mejor los nutrientes en un rango de entre 5.5 y 6.5. Es fundamental cuidar este punto ya que si los niveles de pH salen de este rango la planta deja de nutrirse correctamente.

6.2.3. El efecto del pH en las plantas

En la hidroponía (y en general en cualquier tipo de cultivo), la planta toma los nutrientes que necesita a través de su raíz y los transporta hasta las hojas, en donde son asimilados. Este proceso se ve afectado cuando el pH no es adecuado, bien sea por encontrarse demasiado alto (básico) o demasiado bajo (ácido), causando estrés a la planta, limitando su crecimiento y por ende bajando la calidad y rendimiento del cultivo. Se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo reducido a través de la aplicación de soluciones nutritivas ligeramente ácidas. El valor óptimo del pH del sustrato debe estar entre 6.0 y 7.0. El cuidado adecuado de un cultivo hidropónico implica un monitoreo de los niveles de pH del agua. Las plantas admiten un rango determinado de valores de pH en el agua absorbida, sin embargo, salirse de este rango puede traer consecuencias negativas. Por tanto, cualquier cambio en unidad de pH puede tener un gran efecto en la disponibilidad de iones a las plantas.

Unidad de Medida del pH
El pH se define como el logaritmo negativo de base 10 de la actividad de los iones hidrógeno:

$$pH = -\log_{10}[a_{H+}] \text{ (1)}$$

Se presenta en una escala de 1 a 14. Son ácidas las sustancias con pH menores que 7 y alcalinas (o básicas) las de pH superiores a 7. El pH = 7 indica neutralidad de la sustancia. La figura 4 representa la escala del PH (Amaya & Cruz, 2016).

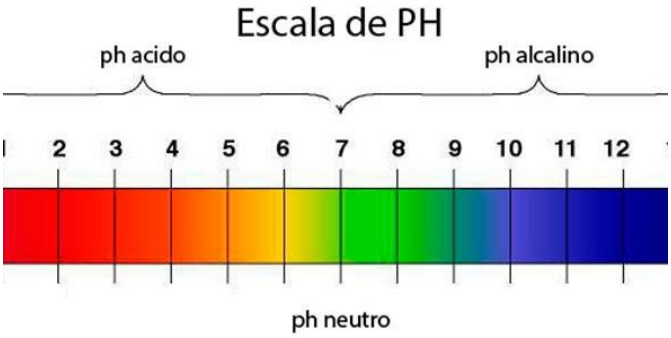


Figura 4. Representación de la escala del PH. (Escala Del PH - Experimentoscientificos.Es, n.d.)

6.2.4. Radiación solar

La radiación solar es uno de los principales factores ambientales que afectan la vida en nuestro planeta. Esta radiación controla el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos tanto a través del control de procesos fotobiológicos (fotosíntesis, fotoperiodo, fototropismos, etc.) como por medio de su acción sobre otros factores ambientales (temperatura, humedad, etc.) y ciclos naturales (ciclos diarios, anuales, hídricos, etc.) que finalmente inciden en la distribución de los organismos. La radiación que llega a la Tierra abarca una amplia gama del espectro electromagnético y aproximadamente el 40% de ella es la que conocemos como luz o radiación visible. Esta comprende longitudes de onda que van de los 400 a los 700 nm, rango que abarca los colores violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo y que por ser usado por los vegetales en el proceso de la fotosíntesis, también se le denomina radiación fotosintéticamente activa o PAR (sigla derivada del inglés: photosynthetic active radiation)
Dentro de los diversos factores determinantes del crecimiento y desarrollo vegetal, la radiación electromagnética, y en particular la franja de entre 200-400nm de longitud de onda, denominada radiación ultravioleta (UV), se reconoce como uno de los más influyentes (Mazza et al. 1999, Paul 2000, Kakani et al. 2003). Sus efectos incluyen cambios en caracteres fisiológicos, bioquímicos y de crecimiento; como grosor, área y longitud foliar, (Rozema et al. 1997), disminución en la eficiencia del fotosistema II y cambios en concentraciones de pigmentos (Caldwell & Britz 2006, Tsormpatsidis et al. 2008). El incremento en niveles de radiación ultravioleta tipo B (UV-B) se ha asociado con una disminución de productividad en cultivos de guisantes, cebada, mostaza, pepino y lechuga (Utama, 2017).

La radiación solar de la superficie de la tierra es típicamente definida como la radiación solar total en un rango de longitud de onda de 280 a 4000 nm. Es determinada como la radiación solar de onda corta expresada en vatios por metro cuadrado. Este sensor de radiación solar es sensible a una parte del espectro solar, aproximadamente 240 – 370 nm.

6.2.5. Solución nutritiva

Como se ha venido mencionando, el aporte de nutrientes a las plantas en un cultivo hidropónico se realiza a través de soluciones nutritivas que están en constante contacto con las raíces de la planta.

La composición de la solución nutritiva debe estar equilibrada con los nutrientes necesarios y adecuados para cada planta, cuidando que tanto el pH como la conductividad eléctrica sean los adecuados. De no tenerse un adecuado equilibrio y tener carencia en uno o más elementos que requiere la planta, entonces se presentará una disminución en la tasa de crecimiento, la cual se podrá apreciar por síntomas visuales en las hojas. (Beltrano & Gimenez, 2015, pág. 63).

Para que una solución nutritiva sea efectiva debe tener el balance adecuado entre conductividad eléctrica, iones minerales y pH. El agua también debe contar con cierto grado de dureza que garantice la presencia de C03HCa. CO3HMg. S04-2 y NO3- y trazas de oligoelementos como hierro, zinc, etc. La acidez del agua debe encontrarse en el orden de 5.3 a 5.5.
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 formula 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.

Nutrición de las plantas en los cultivos hidropónicos Como se ha venido mencionando, el aporte de nutrientes a las plantas en un cultivo hidropónico se realiza a través de soluciones nutritivas que están en constante contacto con las raíces de la planta.

La composición de la solución nutritiva debe estar equilibrada con los nutrientes necesarios y adecuados para cada planta, cuidando que tanto el pH como la conductividad eléctrica sean los adecuados. De no tenerse un adecuado equilibrio y tener carencia en uno o más elementos que requiere la planta, entonces se presentará una disminución en la tasa de crecimiento, la cual se podrá apreciar por síntomas visuales en las hojas. (Beltrano & Gimenez, 2015, pág. 63).

Para que una solución nutritiva sea efectiva debe tener el balance adecuado entre conductividad eléctrica, iones minerales y pH. El agua también debe contar con cierto grado de dureza que garantice la presencia de C03HCa. CO3HMg. S04-2 y NO3- y trazas de oligoelementos como hierro, zinc, etc. La acidez del agua debe encontrarse en el orden de 5.3 a 5.5 (Silva et al., n.d.).
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 formula 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 las tablas 3 ,4 y 5, se muestra la concentración de los compuestos que son disueltos en 100 litros de agua para conformar cada solución.

Solución A	
Compuesto	Peso (gr)
Nitrato de Potasio ,KNO3	68,04
Nitrato de calcio ,Ca(NO3)2	45,04
Sulfato de magnesio,MgSO4	22,68
Fosfato acido de potasio,KH2PO4	22,68

Tabla 4 Solución de hidroponía A

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 (gr)
Nitrato de magnesio,Mn(NO3)2	5,4
Sulfato de zinc , ZnSO4	0,44
Sulfato de cobre , CuSO4H2O	0,005
Potasio iodado,KI	0,04
Ácido bórico,H3bo3	0,2

Tabla 5 Solución de hidroponía B

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 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(gr)
Nitrato Férrico,Fe(NO3)3	8
Ácido Citrico,C.P,C6H8O7	25
Hidróxido de calcio	22,68

Tabla 6. Solución hidropónica C.

El nitrato férrico debe ser disuelto en 1 litro de agua. Cada semana, desde el principio, se agrega 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 (Silva et al., n.d.).

6.2.6. Lechuga

Nombre científico: lactuca sativa; La lechuga es un miembro de la familia de las asteraceae (compositae) que también contiene: girasol, caléndula, crisantemo, alcachofa, margarita y diente de león, Esta especie probablemente se originó en Europa y Asia, se puede utilizar para la alimentación y como un medicamento, las semillas de lechuga son pequeñas, en promedio pueden haber 1000 semillas por cada gramo y se mantiene refrigeradas por mucho tiempo, aunque la lechuga no es de alto valor en efectivo, un cultivador hidropónico puede producir muchos cultivos al año, la lechuga prefiere las temperaturas frescas por otro lado altas temperaturas causan amargura la ficha técnica se muestra en la figura 6.

Composición lechuga					
Parámetro	Cantidad por 100 grs	Ingestas Recomendadas	Minerales		
Agua (g)3	94.8	-	Calcio (mg)3	22	1000 - 1200
Energía (kcal)3	11	3000 - 2300	Hierro (mg)3	0.35	´10 - 15
Proteínas (g)3	1.2	54 – 41	Fósforo (mg)3	23	700
Hidratos de C (g)3	1.1	450 - 350 (a)	Magnesio (mg)3	8.9	400 - 350
Lípidos (g)3	0.22	90 - 80 (a)	Zinc (mg)3	0.37	´15-12
Fibra			Selenio (µg)3	0.41	70 - 55
Fibra total (g)3	1.4	> 30 (a)	Sodio (mg)3	7.5	-
Soluble (g)	0.20	12 (a)	Potasio (mg)3	179	-

Figura 5. Ficha Técnica de la lechuga.

La lechuga posee una cabeza de características paniculada y produce una flor amarilla la cual posiblemente sea derivada de la lechuga verde de tipo espinosa, Lactuca Serriola. Su único óvulo producido de un ovario unicelular es el que madura en una semilla. Su variedad depende principalmente de su tipo de hoja cuyas variedades botánicas se clasifican en: Lechugas de hoja

suelta y lechugas de cabeza. La lechuga de hoja suelta hace parte de la pluralidad botánica Crespa y su tipo de cabeza a Capitata (Gasc et al., 2018a).

El crecimiento de la lechuga puede ser dividido en cuatro estadios: plántula, roseta, encabezamiento (no en todos los tipos) y reproductivo, como se muestra en la Figura 7.



Figura 6. Estados de crecimiento de la planta de lechuga. (Manual de producción de Lechuga) (Ávila, 2015)

Para la producción de lechuga en cultivos hidropónicos NFT: el cultivo se realiza en tubos o canalones fabricados a estos fines o adaptados para ello. Es importante que el material utilizado, no aporte elementos tóxicos para las plantas (Zamai et al., 2016).

- Es importante analizar el suministro de agua, la cual puede provenir de lluvia o ser potable. Cuando el agua es dura, se requiere bajar su pH a 6.
- La temperatura. Una característica de la NFT, es la facilidad con la que la temperatura de la raíz puede ser manipulada para satisfacer los requerimientos de los cultivos. Es importante mantener las soluciones entre 13 y 15 ºC con el fin de prevenir una absorción reducida de nutrientes.
- El pH. En general, la absorción máxima de un ion ocurre entre pH 5 y 7. Normalmente se mantiene el pH entre 5.5 y 6.5, para la mayoría de los cultivos en invernadero.
- La conductividad eléctrica (CE). Se recomienda mantener un nivel de Electro conductividad en los rangos adecuados para que las plantas dentro del sistema no se deshidraten por exceso de sales o al contrario, absorban menos nutrientes por ausencia de los mismos.

- La longitud del canal. Un máximo de 20 m de longitud es generalmente recomendado, se considera que la longitud no debe superar los 20 a 25 m.
- La anchura del canal. Para cultivos hortalizas altas, como por ejemplo la lechuga, la distancia entre plantas se recomienda entre 25 a 30 cm; sin embargo, hay cultivadores que señalan que pueden usarse canales más estrechos, de 15 cm, sin afectar los rendimientos.
- La pendiente del canal. Para asegurar las condiciones convenientes en la zona de las raíces, el canal deberá tener una pendiente que permita a la solución fluir a lo largo del mismo. En general, pendientes entre 1.5 y 2 % parecen convenientes y las menores de 1 % deberán evitarse.
- Si se va a realizar la instalación con tubería de PVC y va a ser una instalación larga, entonces es muy importante que se mantenga una inclinación dentro de dicha tubería donde se asegure que tanto al inicio de tu tubería como al final exista una altura adecuada de nutrientes para asegurar que las plantas no vayan a secarse.
- El oxígeno en la solución nutritiva. La solución nutritiva dentro del sistema se va a mantener oxigenada debido a la circulación de la misma dentro del sistema. Como comentamos en el punto anterior, la circulación ocurre gracias a la inclinación de la tubería para NFT o por diferencias en las alturas de las conexiones.

6.2.7. Raspberry PI 3 B+

La Raspberry Pi es un pequeño ordenador del tamaño de una tarjeta de crédito de muy bajo costo, fue desarrollado en el Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi, dado su hardware se puede usar prácticamente como un verdadero PC. El software que es usado en esta tarjeta es Open Source, el cual su sistema operativo es adaptado de Debian, llamado Raspbian, aunque también la placa puede trabajar bajo otros sistemas operativos, incluyendo la versión 10 de Windows.

Su alta adaptabilidad a los requisitos de un entorno de trabajo es permitida por su bien desarrollado hardware, ya que está compuesta por todos los componentes que conforman un computador de escritorio moderno (Memoria RAM, conectividad WIFI de 2.4G y 5G, Bluethoot, conectividad de periféricos de entrada y salida) y en adición cuenta con protocolos de comunicación para microcontroladores y módulos digitales como SPI, I2C, entre otros.

La ficha técnica de este microcomputador se indica la siguiente descripción:

- CPU + GPU: Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @ 1.4GHz
- RAM: 1GB LPDDR2 SDRAM
- Wi-Fi + Bluetooth: 2.4GHz y 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac, Bluetooth 4.2, BLE
- Ethernet: Gigabit Ethernet sobre USB 2.0 (300 Mbps)
- GPIO de 40 pines
- HDMI
- 4 puertos USB 2.0
- Puerto CSI para conectar una cámara.
- Puerto DSI para conectar una pantalla táctil
- Salida de audio estéreo y vídeo compuesto
- Micro-SD

- Power-over-Ethernet (PoE)

Acerca de su sistema operativo, el SO Raspbian es el que ha sido desarrollado puntualmente para su ejecución sobre este microcomputador, y permite al usuario la utilización de las diferentes herramientas de trabajo en un entorno Linux. El poder emplear software como Python en conjunto a protocoles como RS232, SSH, I2C, VNC hacen que la Raspberry PI sea una alternativa sumamente atrayente.

6.2.8. PSOC

Es la denominación que tienen los microcontroladores programables desarrollados por Cypress Semiconductor. Estas placas constituyen un arreglo parametrizable de tecnología de señal mixta (Es un dispositivo análogo-digital). Estos dispositivos conjugan las ventajas de los SoC, con la flexibilidad de los sistemas programables.
La implementación combinada de circuitos análogos y digitales según la programación del desarrollador es el punto fuerte de este microcontrolador. Los distintos bloques que posee esta herramienta pueden ser combinados con librerías pre-diseñadas por los desarrolladores de Cypress y recursos propios del usuario.
Los bloques análogos están compuestos de condensadores conmutados, amplificadores operacionales, comparadores de voltaje, ADC, DAC (tanto iDAC como vDAC), y bloque de filtros digitales, permitiendo trabajar con múltiples señales análogas de gran complejidad. PSoC además ofrece un subsistema CPU sofisticado con SRAM, EEPROM, una memoria flash, varios núcleos y una variedad de sistemas incluyendo:

- Un oscilador interno principal de baja velocidad.
- Conectividad con un oscilador cristal externo para precisión.
- Interrupciones internas y Watchdog.
- Múltiples relojes.

Los dispositivos PSoC también están dedicados a comunicaciones tales como I2C, SPI, USB 2.0, CAN 2.0
Las especificaciones técnicas dadas por el fabricante son:

- Datasheet PSoc 5800
- Core Arm-Cortex M3
- Max CPU Speed 80-MHz
- Flash/SRAM (KB) 256/64
- ADCs: 1x20-bit Del-Sig / 2x12-bit SAR
- Timer/PWM 4
- GPIO 62
- Prototyping Kit CY8CKIT-059 PSoC® 5LP

6.2.9. Python

Python es un lenguaje de programación poderoso y fácil de aprender. Cuenta con estructuras de datos eficientes y de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos. La sintaxis de Python y su tipado dinámico, junto con su naturaleza interpretada, hacen de éste un lenguaje ideal para scripting y desarrollo rápido de aplicaciones en diversas áreas y sobre la mayoría de las plataformas. El intérprete de Python y la extensa biblioteca estándar están a libre disposición en forma binaria y de código fuente para las principales plataformas desde el sitio web de Python, https://www.python.org/, y pueden distribuirse libremente. El mismo sitio contiene también distribuciones y enlaces de muchos módulos libres de Python de terceros, programas y herramientas, y documentación adicional (Rossum, n.d.).

6.2.10. Nube

La Nube o la Computación en Nube (Cloud Computing), según NIST, se compone de cinco características esenciales, tres modelos de servicio y cuatro modelos de despliegue. La nube en sí misma, es un conjunto de hardware y software, almacenamiento, servicios e interfaces que facilitan la entrada de la información como un servicio. Los servicios de la nube incluyen el software, infraestructura y almacenamiento en Internet, bien como componentes independientes o como una plataforma completa –basada en la demanda del usuario. El mundo de la nube tiene un gran número de actores o participantes. Los grupos de intereses del mundo de la computación en nube son: los vendedores o proveedores: que proporcionan las aplicaciones y facilitan las tecnologías, infraestructura, plataformas y la información correspondiente; los socios de los proveedores: que crean servicios para la nube ofreciendo y soportando servicios a los clientes; los líderes de negocios: que evalúan los servicios de la nube con el objetivo de contratarlos e implantarlos en sus organizaciones y empresas; los usuarios finales que utilizan los servicios de la nube bien de modo gratuito o con una tarifa de pago.

Los servicios de la nube deben ser multi compartidos (multi-tenancy); es decir, empresas diferentes comparten los mismos recursos fundamentales. Por esta razón las empresas comienzan a encontrar nuevos valores en los servicios de la nube, facilitando la eliminación de las complejas restricciones que supone el entorno informático tradicional, incluyendo, espacio, tiempo, energía y costos (Rossum, n.d.).

6.2.11. IoT

Según la recomendación de la UIT-T Y.2060 el Internet de las cosas (IoT) puede considerarse un concepto ambicioso con repercusiones tecnológicas y sociales. Desde la perspectiva de la normalización técnica, IoT puede concebirse como una infraestructura global de la sociedad de la información, que permite ofrecer servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales) gracias a la inter-operatividad de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) presentes y futuras. Aprovechando las capacidades de identificación, adquisición de datos, procesamiento y comunicación, IoT utiliza plenamente los "objetos" para ofrecer servicios a todos los tipos de aplicaciones, garantizando a su vez el cumplimiento de los requisitos de seguridad y privacidad. En el contexto de IoT, los objetos son objetos del mundo físico (objetos físicos) o del

mundo de la información (mundo virtual) que se pueden identificar e integrar en redes de comunicación.
Los objetos tienen información conexa, que puede ser estática y dinámica. Los objetos físicos existen en el mundo físico y es posible detectarlos, actuar sobre ellos y conectarlos. Ejemplos de objetos físicos son el entorno que nos rodea, los robots industriales, los bienes y los equipos eléctricos. Los objetos virtuales existen en el mundo de la información y se pueden almacenar, procesar y acceder a las mismas (Gasc et al., 2018b).

Dentro de los principales proveedores de servicios de IoT tenemos los siguientes:

CARACTERISTICAS	NUBE		
	AZURE	AWS	GOOGLE CLOUD
SERVICIO DE IOT	IoT HUB	IoT Core	IoT Core
IoT Edge	IoT Edge	Greengras	
Protocolos	• DPS • MQTT • HTTPS • OPC • MODBUS • TPC/UDP	• MQTT • HTTPS • OPC • MODBUS • TPC/UDP • WSS • loRaWAN	• MQTT • HTTPS • OPC • MODBUS • TPC/UDP
Servidor	Este de EE. UU. 2	AWS Norte de Virginia	Condado de Berkeley, Carolina del Sur
Almacenamiento estándar	400 mensajes mensuales	300 datos al dia	250 MB
Dispositivos conectados estándar	2	50	

Tabla 7 Caracteristicas de los proveedores de IoT

6.2.12. MongoDB

MongoDB es una base de datos NoSQL orientada a documentos que apareció a mediados de la década de 2000. Se utiliza para almacenar volúmenes masivos de datos.
A diferencia de una base de datos relacional SQL tradicional, MongoDB no se basa en tablas y columnas. Los datos se almacenan como colecciones y documentos.
Los documentos son pares value/key que sirven como unidad básica de datos. Las colecciones contienen conjuntos de documentos y funciones. Son el equivalente a las tablas en las bases de datos relacionales clásicas.

Si comparamos MongoDB con una base de datos tradicional como SQL podemos hacer equivalencias de colecciones con tablas y documentos con filas (registros).

Los documentos de una base de datos MongoDB se almacenan utilizando el formato JSON o BSON. BSON es una versión binaria de un archivo JSON. Son documentos compuestos por clave y valor.

6.2.13. Azure IoT Central

Azure IoT Central es una plataforma de aplicaciones IoT que funciona en un modelo SaaS. IoT Central puede compararse con una solución plug&play a la que se conectan dispositivos compatibles. Utiliza un enfoque basado en plantillas para simplificar la creación de una solución IoT. Ofrece plantillas genéricas y modelos adaptados a sectores específicos. Gracias a una interfaz de gestión centralizada, los usuarios pueden configurar, supervisar y gestionar los dispositivos conectados desde un solo lugar sin necesidad de conocimientos técnicos especializados.

Los dispositivos recopilan datos de sensores para enviarlos como un flujo de telemetría a una aplicación de IoT Central. Por ejemplo, una unidad de refrigeración envía un flujo de valores de temperatura o un camión de entrega transmite su ubicación.
La telemetría, las propiedades y los comandos que un dispositivo implementa se conocen, de manera conjunta, como las funcionalidades del dispositivo. Estas funcionalidades se definen en un modelo compartido entre el dispositivo y la aplicación de IoT Central.

6.2.14. Control difuso.

Lógica difusa
La lógica difusa surge alrededor de los años 60, esta fue propuesta por Lofti A Zadeh. Esta lógica permite simular los mecanismos de razonamiento humano para el control de sistemas el cual basa su método en la experiencia, se caracteriza por la generación de un modelo matemático que emula la incertidumbre del pensamiento y que permite la toma de decisiones usando métodos matemáticos y computacionales.

En resumen, la lógica difusa es la representación matemática de la incertidumbre a la hora de tomar decisiones.

La lógica difusa emplea valores en el rango de 0 a 1 para indicar el grado de pertenencia de un valor de entrada a un conjunto difuso específico, y dado que esta emplea matemática multivariada, un valor de entrada puede pertenecer a distintos conjuntos difusos con valores diferentes de pertenencia asociados a cada uno de ellos.

Controlador difuso
Los controladores difusos son una herramienta de control inteligente que emula el razonamiento humano en la toma de decisiones basando el análisis de un dato de entrada respecto a una base de conocimiento entregada por el diseñador del controlador. El concepto principal de este controlador es, por medio de la base de datos (también conocida como reglas difusas), determinar de una manera lógica el valor de salida correspondiente a una señal de entrada que permita la regulación

o ejecución de acciones que permitan alcanzar un valor de referencia con el fin de lograr alcanzar dicho valor de referencia.

La siguiente imagen muestra el diagrama básico de un controlador difuso.

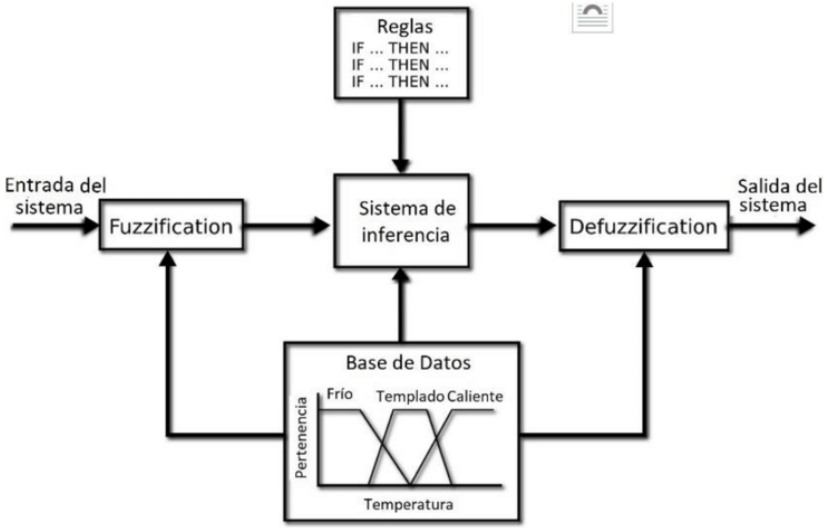


Figura 7 Diagrama de un controlador difuso (Esquema Básico de Un Sistema de Control Difuso. | Download Scientific Diagram, n.d.).

Como la lógica difusa sugiere un cierto grado de pertenencia para un dato que se presente dentro de los conjuntos difusos, permite a un controlador difuso tomar diferentes grados de acción en un sistema. En los sistemas de control debe tomarse en cuenta el conocimiento experto de una o varias personas para la realización de la base de conocimientos sobre la cual se basará la toma de decisiones.

Inicialmente se realiza la fuzificación, en la que los datos de entrada son procesados para calcular el grado de membresía que tendrán dentro del controlador.

Posteriormente se tiene el sistema de inferencia que junto con las reglas de control realizan la toma de decisiones que dictarán la forma en que actuará el sistema. El sistema de inferencia se basa en el grado de pertenencia de los datos de entrada en los conjuntos difusos de los espacios correspondientes, siempre que éstas se den, para tomar una decisión en el espacio de salida.
La última etapa que se tiene dentro del controlador es el defuzificador, que es quien realiza el procesado final con el fin de adecuar los valores difusos obtenidos de la inferencia en valores no difusos útiles para el proceso que se ha de controlar.

Fuzificación
En términos globales, la fuzificación es el proceso de “traslación” de una variable numérica a una nueva variable dentro de un conjunto difuso. Al recibir un nuevo dato de entrada, este es analizado empleando las reglas de control definidas por el diseñador del controlador, la respuesta a dicho

análisis indica el índice o grado de pertenencia del dato de entrada a determinado conjunto dentro del universo de discurso.

Reglas difusas

Estas son primordiales para el proceso de inferencia ya que son las encargadas de establecer la pertenencia de un valor de entrada a un conjunto difuso, ya dichas reglas funcionan bajo el principio IF-THEN, y es este principio el cual permite una asociación directa entre un valor especifico con determinado conjunto sin que el mismo valor pueda corresponder a dos conjuntos de forma simultánea y pueda llegar a entorpecer el controlador.

Defuzificación

Esta etapa del controlador trabaja precisamente de manera inversa a la etapa de fuzzificación, y realiza la traducción de valores difusos a una variable numérica de salida, este valor de salida depende directamente de las reglas de control establecidas durante el proceso de diseño del controlador y son las encargadas de regular o controlar la variable deseada en el controlador. El proceso de defuzificación puede obedecer a un controlador SIMO o MIMO.

Método de inferencia de Mamdani

Este fue propuesto por Ebrahim Mamdani en el año 1975, es por mucho el método más popular y comúnmente usado para el diseño de controles difusos. El principio es relativamente sencillo y consta de 4 pasos.

1. Fuzificación de variables de entrada
2. Evaluación de reglas
3. Agregación de las salidas de las reglas
4. Defuzificación

El método de Mamdani aplica el mismo principio de IF-THEN y emplea los operadores lógicos AND y OR para obtener un valor único que represente con la mayor exactitud posible el resultado de la evaluación. En este proceso es necesario listar las reglas de control difuso para conocer el comportamiento que tendrá el controlador.

Para evaluar la intersección de los conjuntos difusos, se emplea el operador lógico O. Y de la misma manera, para evaluar la unión de los conjuntos se emplea el operador lógico AND.

Posteriormente, al llamado consecuente (resultado de la evaluación de una condición) se le debe aplicar un recorte o escalamiento (esto depende del grado de verdad de la condición evaluada) y finalmente se obtiene como salida la regla de un conjunto difuso.
El recorte consiste en “cortar” el valor de verdad del antecedente (o condición) del valor del consecuente; mientras que el escalamiento es la multiplicación de todos los valores por el valor de verdad del antecedente, manteniendo así la forma original del conjunto difuso.

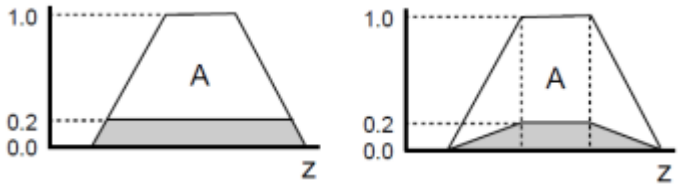


Figura 8. Intersección y unión conjuntos difusos (Sanahuja, 2017) (Logica Difusa e Inteligencia Artificial, n.d.).

Por último, la agregación es la unión de las salidas de las reglas; esto indica que las funciones de pertenencia de cada consecuente se combinan para obtener un único conjunto difuso por cada variable de salida.

6.3. Marco Legal

- NTC 1064: tecnología de los alimentos frutas y hortalizas frescas lechuga
- NTC 2879: productos químicos industriales para uso agropecuario. abonos o fertilizantes. fertilizantes para cultivos hidropónicos
- IPC 221 indica las reglas básicas para el diseño de circuitos impresos.
- IPC 4101 establece las propiedades que deben tener las placas donde se fabricarán los circuitos impresos.
- IEC 61000 – UNE-EN 61000 establece los niveles de emisión o de inmunidad de campos electromagnéticos que puede tener un dispositivo electrónico.
- 2002/95/CE es una regla medioambiental que restringe el uso de algunas sustancias peligrosas en aparatos electrónicos o eléctricos.
- RD 208/2005 prohíbe el uso de algunas sustancias como: plomo, mercurio, cadmio, cromo hexavalente y otras en equipos electrónicos

7. Metodología

Diseño prototipo

En la figura 19 se observa el diseño de la estructura del cultivo. El soporte de esta se encuentra construido con ángulo metálico de 1", el cual brinda estabilidad y resistencia para soportar el peso de los otros elementos que conformar el cultivo. Para evitar los efectos acelerados de la corrosión fue cubierto con pintura anticorrosiva de color negro, esta brindará protección a la estructura metálica de las condiciones ambientales que puedan deteriorarla.

Como sistema de cultivo, se utilizó tubería PVC de 3", la cual se monta de forma horizontal sobre la base metálica. Esta tubería tiene 4 perforaciones de 1.5” de diámetro, dentro de estas 4 perforaciones se introducirá la canastilla que contiene la plántula que se desea cultivar. Estos tubos de PVC tienen una entrada y una salida de líquido. La entrada está diseñada en PVC de 1", que tiene forma de rectángulo, esto tiene como objetivo que el agua entrante al sistema sea distribuida a los 3 tubos de cultivo sin importar que tan solo una motobomba sea la encargada de suministrar el fluido nutritivo.

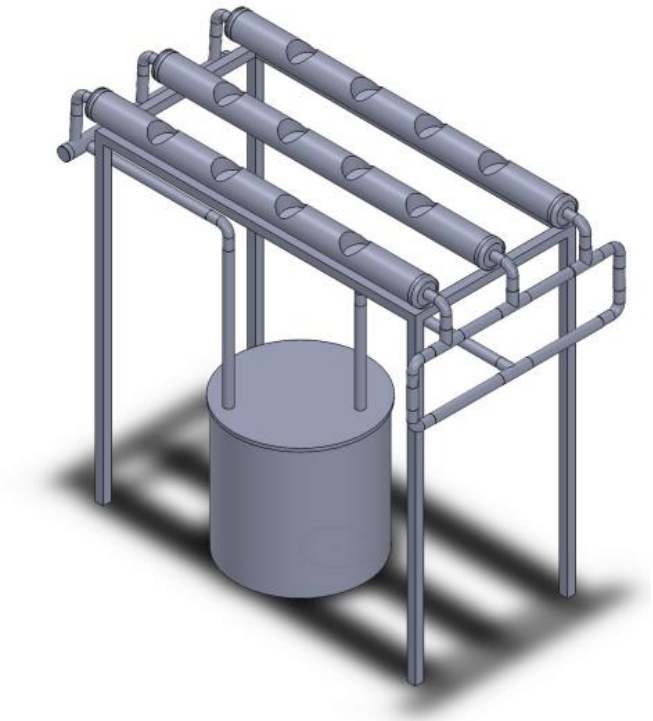


Figura 9. CAD estructura del cultivo (Diseño original)

El líquido que entra, eventualmente deberá salir del sistema, esto se realiza a través de una serie de mangueras conectadas al otro extremo del tubo de PVC de 3", las cuales convergen a un tubo de 2" y este finalmente retorna el líquido saliente hacía el tanque de contención, el cual a su vez es el tanque donde se ejecuta el control de PH para un próximo suministro de líquido al sistema.

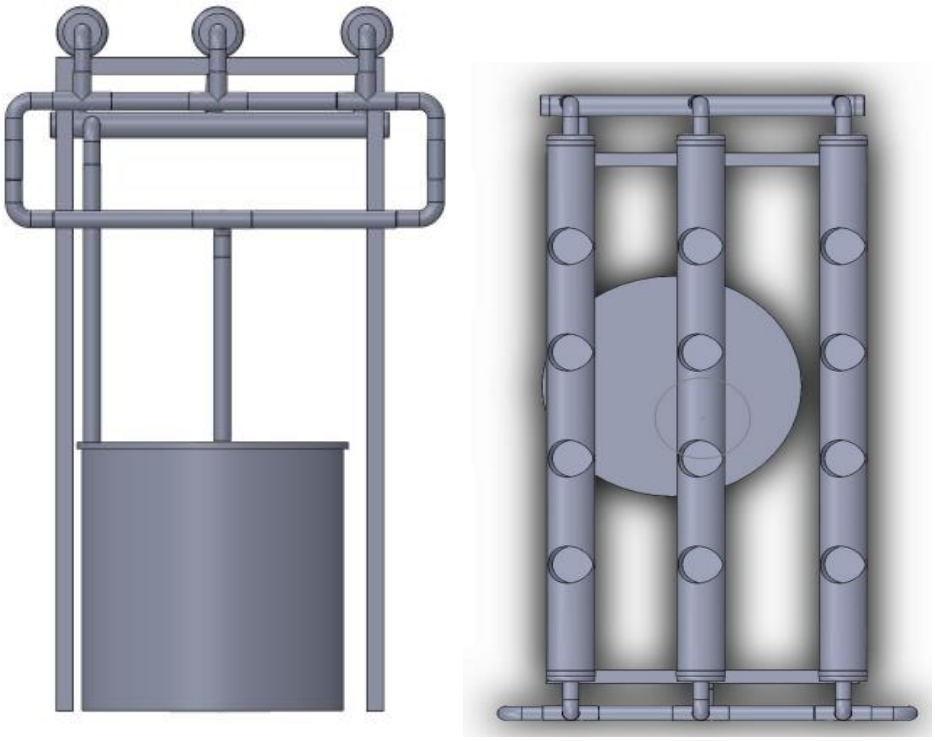


Figura 10. Vista frontal y superior (Diseño original).

6.2. Circuitos de control y adquisición de datos

6.2.1. Comunicación serial

Teniendo en cuenta que la PSOC 5LP es utilizada como tarjeta de adquisición de datos y control de actuadores, es necesario un medio de transmisión entre la Raspberry pi 3b y PSOC 5LP. En este caso se utiliza la comunicación con protocolo RS232, con una velocidad de transmisión de 9600 bps sin paridad, el diagrama de conexión se evidencia en la figura 21.

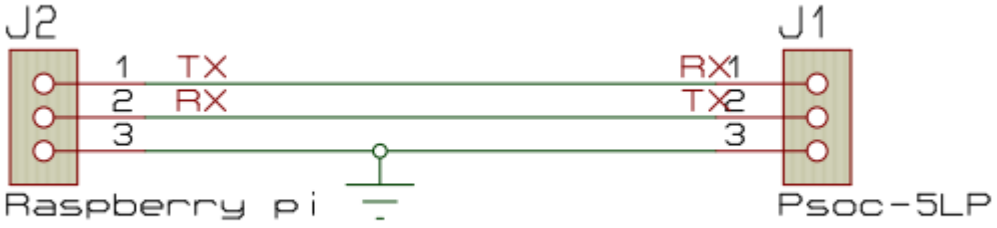


Figura 11. Comunicación serial (Diseño original).

Para esta configuración se tuvo en cuenta la cantidad de Bits a enviar y recibir desde la Psoc hacía la Raspberry. Desde la Psoc5LP hacía la Rapberry la longitud de la trama a enviar es variable, pero siempre menor a 50 bits; mientras que desde la Raspberry se enviarán un total de 7 bits (sin incluir

los bits de inicio, de parada y paridad) hacía la Psoc5LP. Ahora, conociendo que con una velocidad de 9600bps podemos transmitir un total de 9600 bits por segundo, podemos asegurar que esta velocidad de transmisión de datos permite la transmisión bidireccional de información sin presentar pérdidas de información en el proceso.

6.2.2. Sensor PH

Para seleccionar el sensor mas indicado que se empleó en el cultivo se analizan 5 posibles modulos, la siguiente tabla muestra los aspectos a tener en cuenta para cada uno de ellos.

Característica	Tipo de sensor				
	PH-4502C	SEN0249	SEN0169	RK500-02	SEN0161
Tensión de alimentación	5VDC	5VDC	5VDC	12-24 VDC	5VDC
Rango de medición	0-14 PH	0-10 PH	0-14 PH	0-14 PH	0-14 PH
Presión	± 0.1PH	± 0.1PH	± 0.1PH	± 0.1PH	± 0.1PH
Tiempo de estabilidad	60 s	≤120 s	60 s	< 10s(en agua)	60 s
Tipo de sensor	Análogo	Análogo	Análogo	Análogo 0-5 VDC 4-20 mA	Análogo
Comunicación				Rs845	
Sonda	E201	IJ-44A	PE-21	PE-21	E201
Precio	$74.547	$668.113	$375.813	$1.129.889	$132.600

Tabla 8 Analisis de caracteristicas de sensor de pH

Como se observa, el módulo pH-4502C es un sensor de bajo costo con características de medición y conexión bastantes similares a los demás módulos analizados, su precio en contraste a otros modulos no implica una desventaja en las cualidades técnicas. La diferencia entre el costo y las características de los sensores radica principalmente en su construcción y el entorno en el cual se implementarán, siendo algunos de estos diseñados para su uso en un entorno industrial o de fabricación de alimentos, lo que exige el cumplimiento de normas puntuales propias del tipo de industria.

El modulo PH-4502C, permite convertir una variable física de PH a una diferencia de potencial, para ser medida utilizando un módulo de conversión de análogo a digital en la PSOC-5LP, la figura 22 muestra la conexión.



Figura 12. Conexión modulo sensor de Ph (Modulo PH Analogico PH-4502C : Soporte Sawers Bolivia, n.d.).

En la calibración del sensor, se usó como patrón el equipo ST400 OKRUS del laboratorio de química de la facultad tecnológica de la universidad Distrital Francisco José de caldas, se emplearon los buffers de calibración de HANNA INSTRUMENT como referencia de medida, donde se tomaron tres puntos de calibración.

El procedimiento de calibración realizado fue el siguiente:

1. Sin conectar la sonda de medición, se debe hacer un corto en el conector BNC del módulo de pH 4502C
2. Posteriormente, empleando un multímetro, se debe medir en el pin DO del múdlo el valor de voltaje y empleando un perillero debemos ajustar el valor medido en 2.5v
3. Una vez el modulo está ajustado, se puede proceder con la medición del valor de pH con los Buffer del labortatorio y el equipo ST400 OKRUS

Los buffer empleados en este proceso son:

1. Solución de pH Hi7010
2. Solución de pH HI7007
3. Solución de pH HI7004

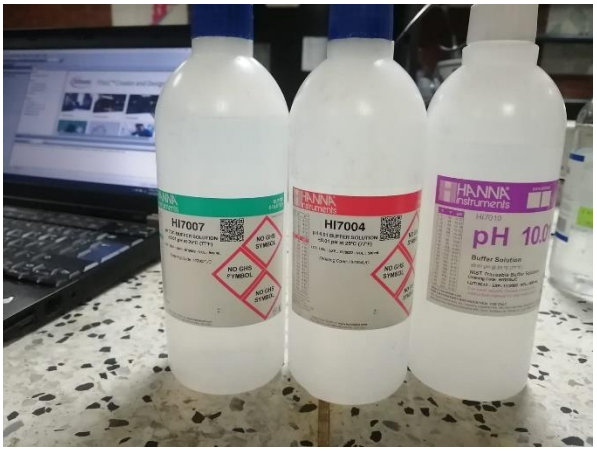


Figura 13 Buffer de pH

4. En tres vasos de precipitados separados se pone una pequeña muestra de cada Buffer para proceder con la prueba de medición en cada uno de ellos sin comprometer la integridad de cada uno de ellos por contaminación del vaso de precipitado.
5. Iniciamos midiendo la sustancia Hi7010 y apuntando el valor medido por el equipo ST400 OKRUS, de la misma manera, se debe apuntar el valor del ADC que se encuentra en la Psoc5LP (Visible en la OLED)



Figura 14 Medicion Buffer Hi7010.

6. Después de medir el primer Buffer, se debe lavar con abundante agua destilada la sonda del módulo pH4502c y del equipo de medición ST400 OKRU, ya que la omisión de este procedimiento puede comprometer la integridad de los Buffer empleados y estropear por completo el procedimiento de medición de pH del resto del laboratorio.
7. Se repite el procedimiento de medición para las dos sustancias restantes. Continuando con la sustancia Hi7007 y por último la sustancia Hi7004
8. Una vez se ha tomado una medición por cada buffer, se repite el procedimiento pero en el orden de soluciones inverso (primero Hi7004, luego la Hi7007 y por ultimo la sustancia Hi7010)

Del procedimiento descrito se obtiene la siguiente tabla de valores de pH y voltaje.

	Medición descendente		Medición ascendente	
Sustancia	Voltaje ADC PSOC	PH sensor patrón	Voltaje ADC PSOC	PH sensor patrón
Hi7010 PH 10.01	2,2	10,86	2,29	10,79
HI 7007 PH 7.03	2,75	8,02	2,74	8,02
HI 7004 PH 4.01	3,28	5,05	3,29	5,04

Tabla 9. Valores de referencia sensor de pH.

Dada la investigación realizada, se conoce que el módulo pH4502C debe tener un comportamiento lineal, dicho comportamiento puede ser corroborado con la información previamente obtenida.

Al graficar la los valores de voltaje del ADC vs pH del sensor patrón, se obtiene la siguiente imagen, en ella se observa una línea de tendencia recta que en efecto obedece al comportamiento esperado por el sensor

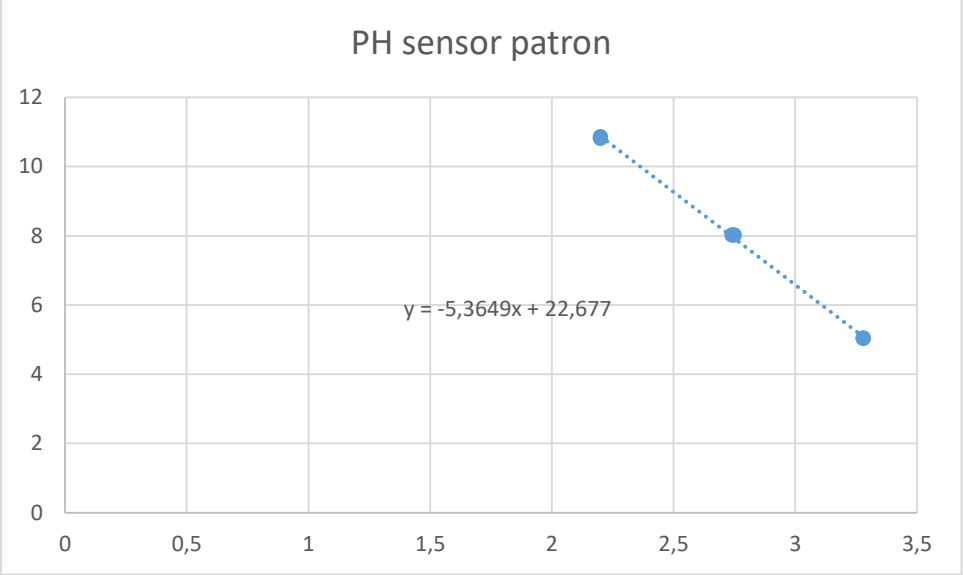


Figura 15. Grafica liberalización del sensor PH

La ecuación de linealización obtenida a través de los datos previamente medidos es la siguiente:

$$y = -5{,}3503x + 22{,}641$$

Con esta ecuación podemos determinar el valor de pH medido durante las pruebas con el modulo pH4502C y el Psoc5LP, obteniendo así los siguientes valores:

	Medición descendente				Medición ascendente			
Sustancia	Voltaje ADC Psoc	PH sensor patrón	pH calculado en la Psoc	Error pH Psoc	Voltaje ADC Psoc	PH sensor patrón	pH calculado en la Psoc	Error pH Psoc
Hi7010 PH 10.01	2,2	10,86	10,87034	0,09%	2,2	10,82	10,87034	0,46%
HI 7007 PH 7.03	2,75	8,02	7,927675	1,16%	2,74	8,02	7,981178	0,48%
HI 7004 PH 4.01	3,28	5,05	5,092016	0,82%	3,28	5,04	5,092016	1,02%

Tabla 10 Error de medicion del módulo pH4502C

El mayor porcentaje de error de estas pruebas corresponde al 1.16%, siendo esto atribuible a las limitaciones propias del módulo de pH 4502C ya que este tiene una exactitud de ± 0.1 en la escala de pH.

Ahora, procedemos con el cálculo de la histéresis de la medición. Para ello se siguió el siguiente análisis:

$$\%histéresis = \frac{max.desviación}{alcance} * 100$$

$$\%histéresis = \frac{2.75 - 2.74}{10.86 - 5.05} * 100$$

$$\%histéresis = \frac{0.1}{5.81} * 100$$

$$\%histéresis = \pm 1.72117\ \%$$

El porcentaje de Histeresis nos muestra que la sucseptibilidad del sensor a una medicion previamente realizada es semejante a al error producido por su exactitud, si bien esta se encuentra dentro del rango de ±0.1 en la escala de pH, puede no ser significativo en cuanto a la ejecución del controlador que se empleó.

Para poder calcular la sensibilidad del sensor unicamente se requieren dos valores de entrada con su respectivo valor de salida, y se realiza la razón entre la señal de entrada con respecto a la salida del sensor.

$$sensibilidad = \frac{variación\ de\ señal\ de\ salida}{variación\ de\ señal\ de\ entrada}$$

$$sensibilidad = \frac{3.28\text{v} - 2.2\text{v}}{10.86 - 5.05}$$

$$sensibilidad = \frac{0.1858\text{v}}{\text{grado pH}}$$

6.2.3. Sensor Electro-conductividad

El módulo TDS V1, permite convertir una variable física de Electro-conductividad del agua a una diferencia de potencial, para ser medida utilizando un módulo de conversión de análogo a digital para su lectura en la PSOC-5LP, la figura 24 muestra la conexión.

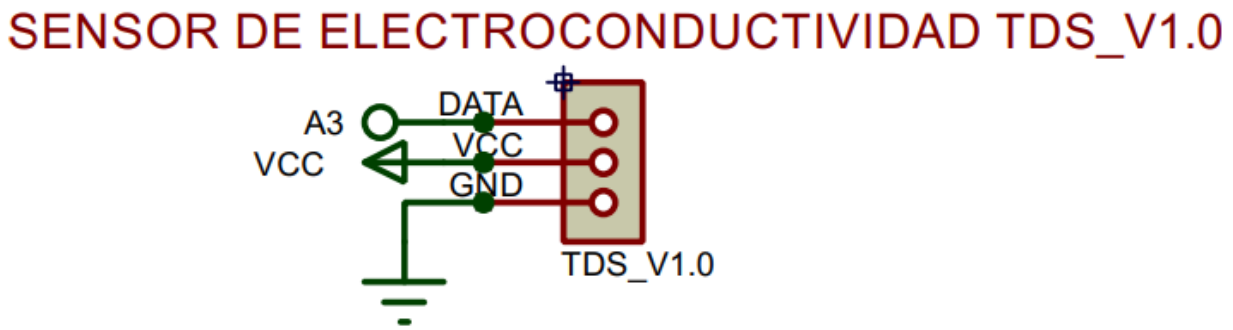


Figura 16. Conexión módulo Electro conductividad (Diseño original).

Las características de este módulo son:

Tensión de alimentación	5 VDC
Tensión de salida	0-2.3 v
Rango de medición	0-1000ppm

Teniendo presente que la solución nutritiva para el cultivo de lechuga empleando hidroponía debe contener una electro conductividad de entre 375ppm a 1000ppm, se puede hacer selección de este sensor ya que su rango de medición se ajusta a la perfección con el rango de electro conductividad deseado para la sustancia de cultivo

6.2.4. Sensor de radiación solar

El módulo DYML8511, permite convertir una variable física de radiación solar, a una diferencia de potencial, para ser medida utilizando un módulo de conversión de análogo a digital para su lectura en la PSOC-5LP, la figura 25 muestra la conexión.

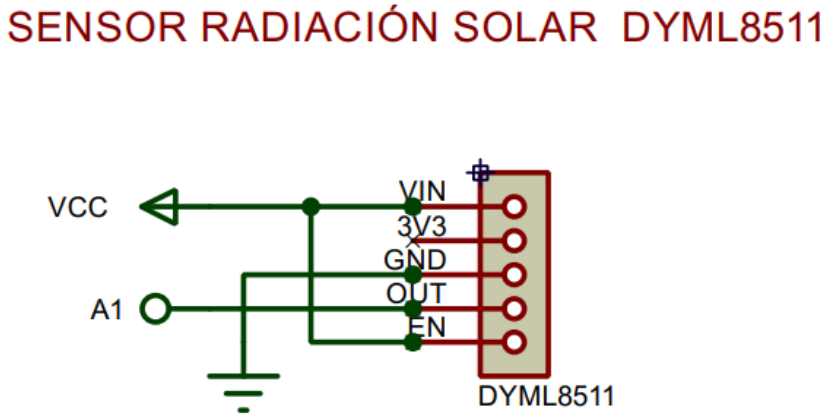


Figura 17 Sensor de radiación solar (Diseño original)

El módulo DYML8511 cuenta con las siguientes características:

Tensión de alimentación	5 VDC
Tensión de salida	1 a 2.8 VDC
Rango de medición	280-390nm
Tiempo de respuesta	1ms

Este sensor permite la lectura de la radiación solar que se encuentra en el rango de 280nm a 390nm de longitud de onda, esta es conocida como radiación UVB y es relevante en la forma de crecimiento de las plantas, sin embargo, su variación es mínima dado que el factor determinante para el aumento o reducción de la radiación UVB es la altura respecto al nivel del mar.

6.2.5. Sensor DTH11

El módulo DTH11, utiliza el protocolo ONEWIRE el cual requiere una interfaz (conexión física) para la comunicación con la PSOC 5LP, la figura 26 muestra la conexión.

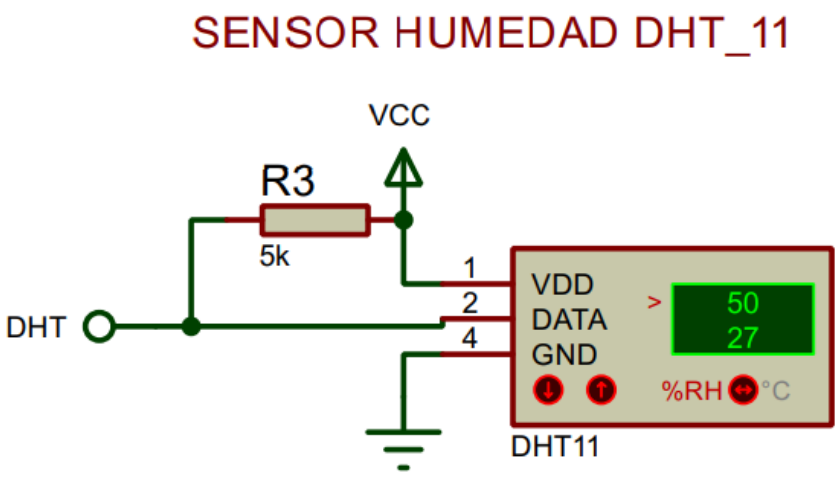


Figura 18 Conexion sensor de humedad (Diseño original)

Este permite la adquisición de ciertos datos ambientales (humedad relativa y temperatura), las características técnicas de este sensor se detallan en la siguiente tabla:

Tensión de alimentación	5 VDC
Resolución	8- bit
Error	±5% RH / ±2 °C
Rango de medición	20%-90% RH / 0°C a 55°C
Protocolo de comunicación	One-wire
Sensibilidad	1 % RH , 1°C
Tiempo de respuesta	30S

6.2.6. Sensor DS18B20

El Sensor DS18B20, utiliza el protocolo ONEWIRE el cual requiere una interfaz (conexión física) para la comunicación con la PSOC 5LP, la figura 27 muestra la conexión.

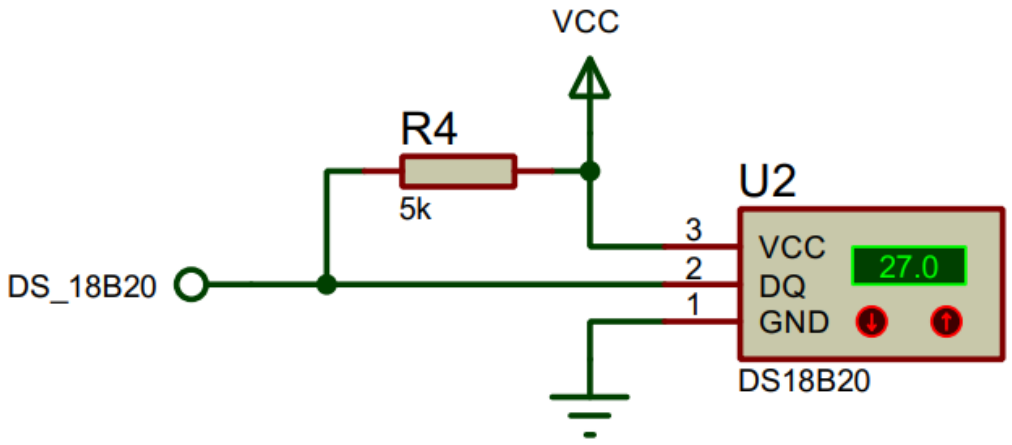


Figura 19. Conexión sensor DS18B20 (Diseño original)

En la siguiente tabla, se describen los datos técnicos de este sensor:

Tension de alimentacion	5vDC
Resolucion	9- bits
Error	±0.5 °C
Rango de medición	-55°c – 125°c
Protocolo de comunicacion	OneWire
Tiempo de respuesta	93.74ms
Sensibilidad	0.5°c

Tabla 11 Ficha técnica del sensor DS18B20

El rango de medición de este sensor es sumamente amplio para la aplicación requerida en este caso, sin embargo, el protocolo de comunicación y su presentación como sonda sumergible, hacen de él un equipo ideal para entornos de trabajo con sustancias líquidas.

6.2.7. Sensores de nivel

Los dos sensores de nivel son empleados para identificar cuando el agua supera el nivel máximo permitido en el almacenamiento del tanque o el nivel de agua es inferior al mínimo requerido para la lectura del PH en la sustancia nutritiva. Consisten en dos switches con un sistema de flotación con una configuración Pull-down y conectados a dos pines de entradas digítales en el Psoc para así poder determinar si el nivel del agua se encuentra dentro del rango necesario, la figura 28 muestra la conexión.

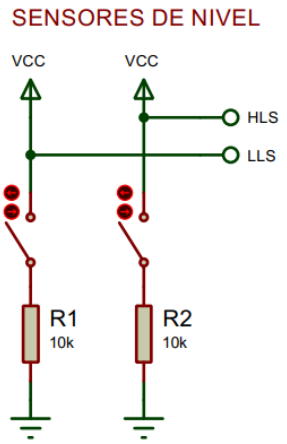


Figura 20. Conexión sensores de nivel (Diseño original)

6.2.8. Motobombas de dosificación

Estas dos bombas de dosificación forman parte del sistema de actuadores primordial para el funcionamiento del controlador, ya que están son las que suministran la sustancia ácida y alcalina necesaria para elevar o reducir el pH según se requiera. Dichas motobombas son controladas usando un módulo de puente H el cual recibe las señales de control desde el Psoc 5LP a través de un par de opto acopladores, los cuales son necesarios para lograr aislar la tierra de la etapa de potencia de la tierra del sistema de transmisión de datos (comunicación RS232). La figura 29 muestra la conexión.

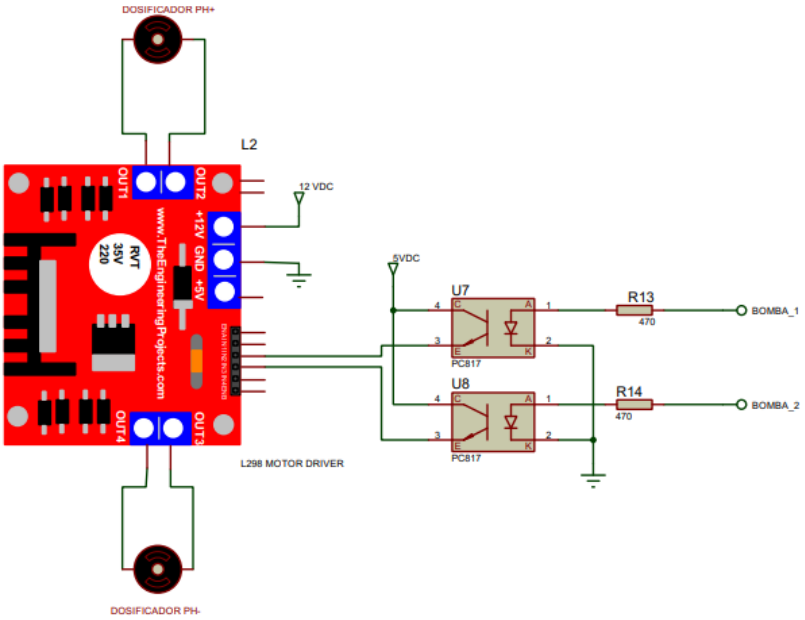


Figura 21. Conexión driver L298N (Diseño original).

6.2.9. Motobomba de recirculación y mezclador

Ambos actuadores funcionan con una diferencia de potencial de 12v los cuales son conmutados con la bobina de un relé, para ello se emplea un módulo de relés de 4 canales, el cual permite controlar la conmutación de voltaje en un actuador a la vez que aísla la tierra de la etapa de potencia de la tierra del microcontrolador. Los dos canales restantes se usan para controlar dos indicadores luminosos que informan al operario del cultivo, si se encuentra encendida o si hay algún inconveniente con ella, estos funcionan a 120v AC.

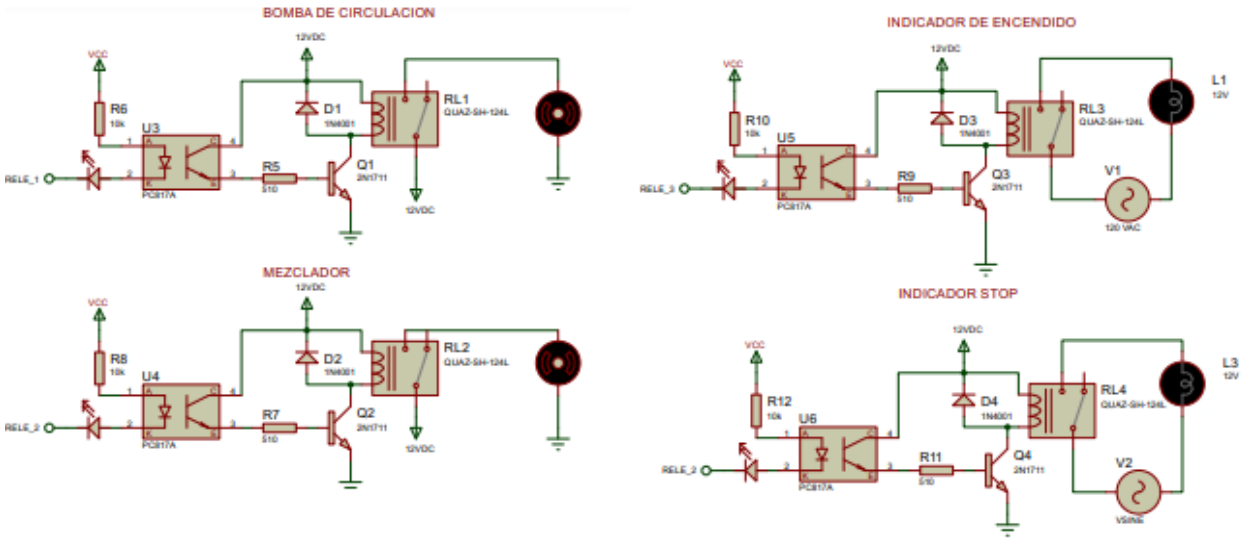


Figura 22. Conexión módulos relés (Diseño original).

Como bomba de circulación de agua se empleó una motobomba de 12v, esta tiene un flujo máximo de 1.8L/min, dado que la circulación de líquido se realiza por 10 minutos a horas específicas, se hace circulación de 18L de agua en cada uno de ellos.
Dada la estructura del cultivo, los 18 litros de agua suministrados por la motobomba son retornados al tanque de almacenamiento de la solución nutritiva.

La presión máxima que alcanza esta bomba es de 0.3Mpa, esto no representa problemas para mantener un flujo constante de fluido durante los periodos de riego, incluso teniendo llevar el agua desde el tanque de almacenamiento (el cual se encuentra sobre el suelo) hasta los tubos de cultivo, que tienen una altura aproximada de 1.1m.

7.1. Control difuso

Para la implementación del controlador difuso es necesario seguir el siguiente diagrama, el cual contempla las etapas de análisis, toma de decisiones y obtención de valores de control.

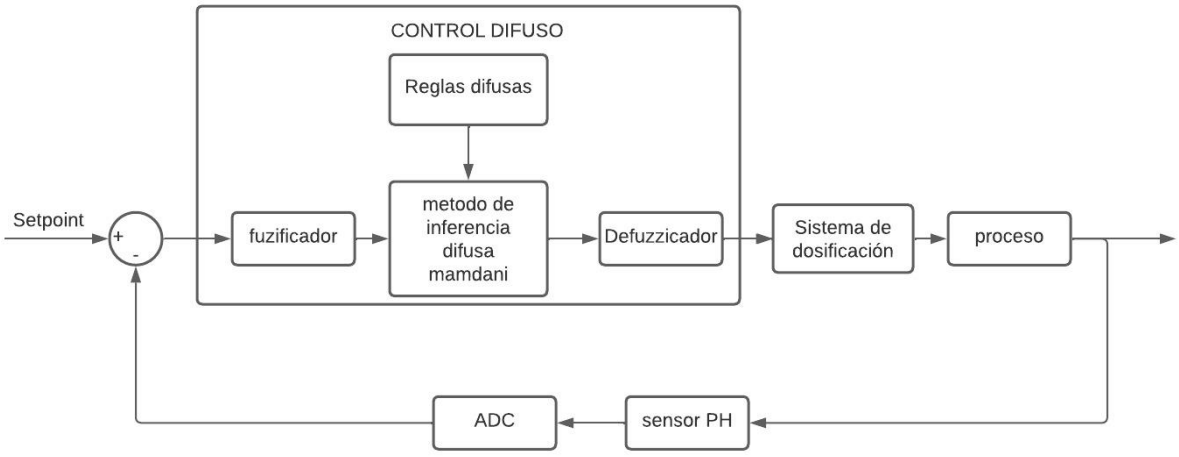


Figura 23 Diagrama de bloques, control difuso

Inicialmente a una señal o valor de entrada se le compara con un valor de referencia o "Setpoint".

Tan pronto como la señal es recibida se procede con la fuzificación de la información, que básicamente consiste en asignar un grado de pertenencia según el valor de la información a determinada variable lingüística.

Enseguida, se emplea el método de inferencia de Mamdani, este se encarga de tomar los grados de pertenencia obtenidos durante la fuzificación junto a las reglas difusas (definidas por el diseñador del controlador), y en base a dicha "Experiencia" que denotan las reglas difusas se asigna un polígono que representa los valores de membresía a los conjuntos difusos de la variable de salida, estos polígonos pueden ser triangulares, trapezoidales, gaussianos, etc.

Finalmente, en la defuzifiación se obtienen los valores de control que se expresan en una magnitud entendible por el controlador, para el control de los actuadores del sistema. Uno de los métodos más usados es el método del centroide, el cual calcula el "centro" del polígono representativo obtenido durante el proceso de inferencia y otorga directamente un valor de salida que se encuentre dentro del grupo difuso de salida asociado a dicho polígono.

Teniendo en cuenta que la escala del pH es de 0-14, que el valor del pH del agua oscila entre 6 a 7 y el rango del pH óptimo para el crecimiento de las lechugas es de 5 a 6, se considera que un rango de error de 6 unidades en la escala de PH serán suficientes para el universo del discurso de entrada.

7.1.1. Universo del discurso

Variable lingüística	Universo del discurso	Unidad
Error de pH	Min=-3 Max=3	Adimensional
Voltaje motor 1	Min=0 Max=100	Dutty PWM
Voltaje motor 2	Min=0 Max=100	Dutty PWM

Tabla 12. Universo del discurso

7.1.2. Determinación de las variables Lingüísticas

Para el diseño del controlador se eligieron las variables lingüísticas relacionadas en tabla 13, ya que fueron estas las que mejor resultado arrojaron a la hora de realizar pruebas de funcionamiento y simulación.

Variable lingüística	Términos lingüísticos	Abreviatura	Función de membresía	Universo de discurso
Error de PH	Error positivo grande Error positivo pequeño Error cero Error negativo pequeño Error negativo grande	EPG EPP EC ENP ENG	Trapezoidal Triangular Triangular Triangular Trapezoidal	2.5, 2.75,3,3 0.25,1.5,2.5 -0.5,0,0.5 -2.5,-1.2,-0.25 -3,-3,-2.75,-2.25
Ciclo útil motor 1	Dutty grande1 Dutty pequeño1 Dutty cero 1	DG1 DP1 DC1	Trapezoidal Triangular Trapezoidal	40,70,100,100 0,30,60 0,0,5,20
Ciclo útil motor 2	Dutty grande2 Dutty pequeño2 Dutty cero 2	DG2 DP2 DC2	Trapezoidal Triangular Trapezoidal	40,70,100,100 0,30,60 0,0,5,20

Tabla 13. Variables Lingüísticas

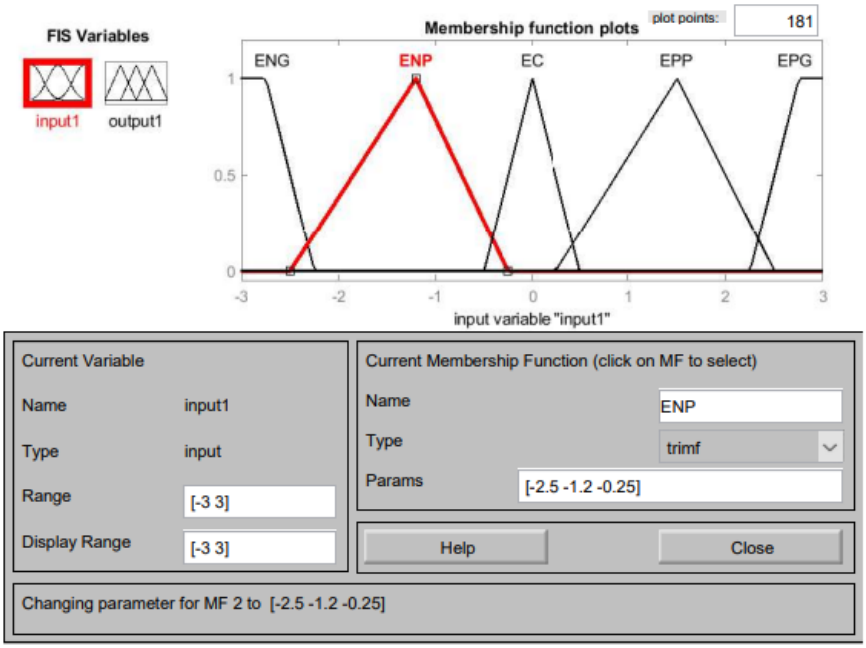


Figura 24. Representación gráfica variables lingüísticas de entrada (Diseño original).

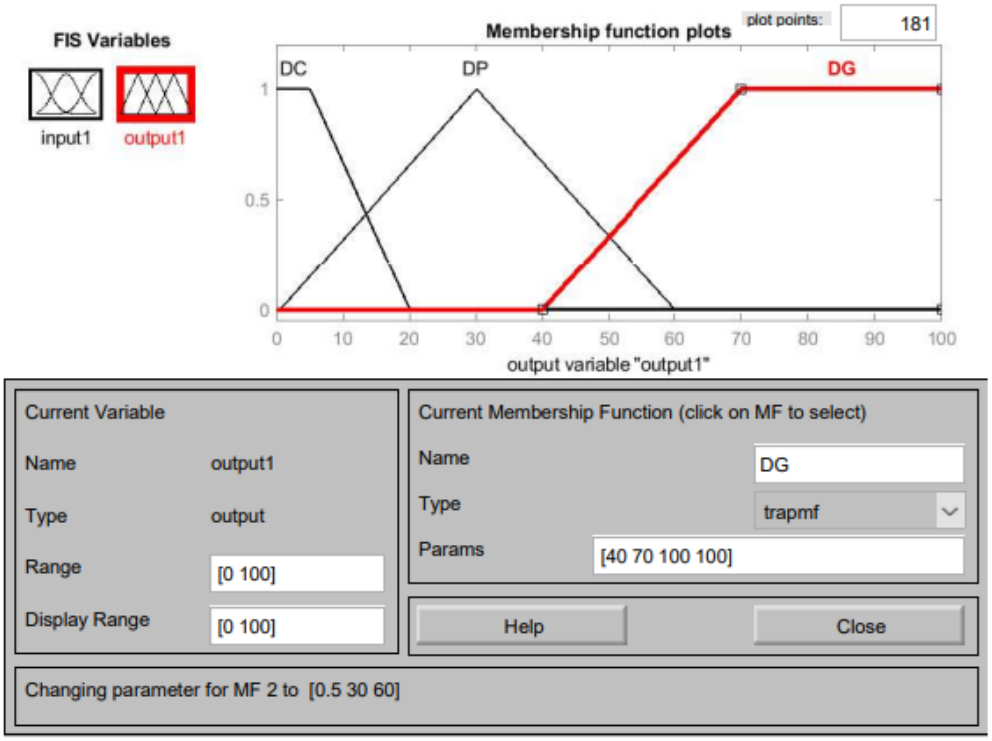


Figura 25. Representación gráfica variables lingüísticas de salida (Diseño original).

7.1.3. Reglas de control

Para la regulación del pH se usan dos dosificadores y que las formas de funcionamiento de estos son inversamente proporcionales, las reglas de control definidas se estable en la tabla 10.

Estado de Error	Motor 1	Motor 2
EPG	DG1	DC2
EPP	DP1	DC2
EC	DC1	DC2
ENP	DC1	DP2
ENG	DC1	DG2

Tabla 14. Reglas del controlador

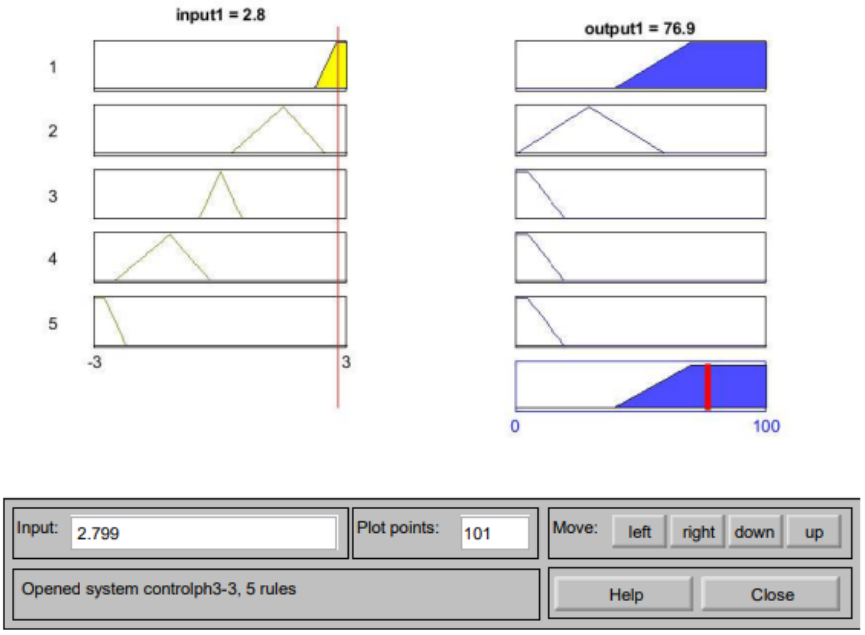


Figura 26. Simulación reglas del controlador Matlab (Diseño original).

Una vez definidas las reglas de control y el universo del discurso, se procede con la simulación del proceso empleado el toolbox Fuzzy Logic de Matlab de esta forma se obtiene la curva de control.

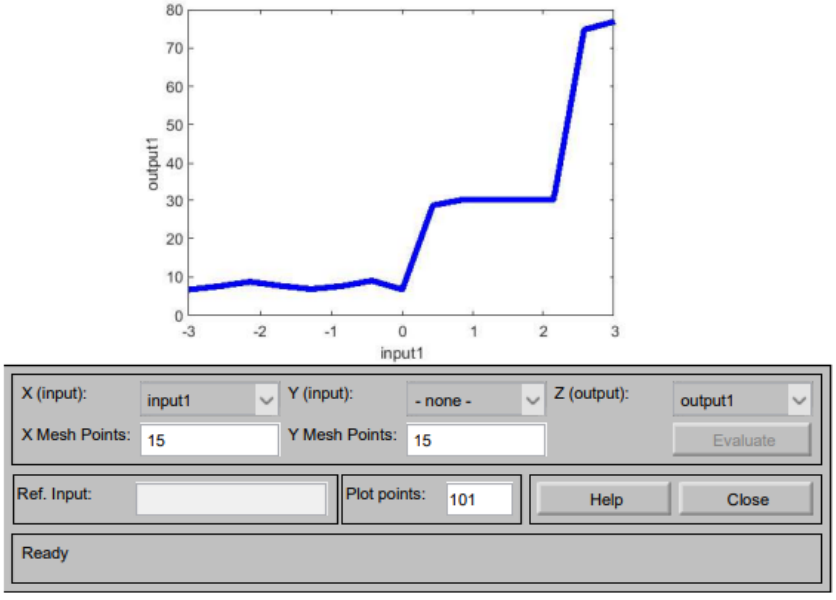


Figura 27. Curva de control simulación Matlab (Diseño original).

7.2. Programación y comunicación

6.2.1 Raspberry Pi3

Esta es la encargada de la recepción y transmisión de datos, así como la ejecución en tiempo real del controlador difuso que asignará valores a las motobombas de dosificación en base a la información previamente adquirida desde la Psoc5LP.

A continuación, se detallan las partes que conforman este código.

Universo del discurso

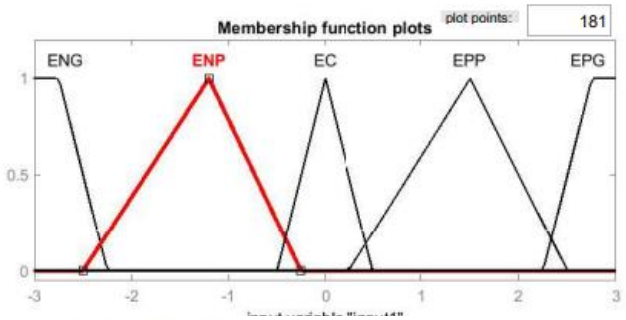
Este define los rangos permitidos de error o diferencia entre el valor medido del pH y el valor del setpoint que se de sea alcanzar.

Mientras que los valores de dutty, definen el rango de las variables de salida que se encargarán de controlar los actuadores del sistema, estos van desde 0 hasta 100 para cada uno de los dosificadores

```
error_ph = np.arange(-3, 3, 1)
dutty_motor_1 = np.arange(0, 100, 1)
dutty_motor_2 = np.arange(0, 100, 1)
```

Funciones de membresía de entrada

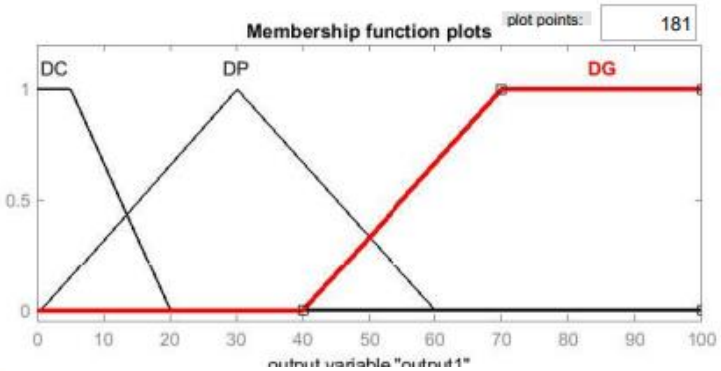
Las funciones de membresía de entrada son la representación poligonal del error o señal de entrada. Para cada función poligonal corresponde un determinado grado de membresía directamente dependiente del valor de la señal de entrada




```
EPG = fuzz.trapmf(error_ph, [2.25, 2.75, 3, 3])
EPP = fuzz.trimf(error_ph, [0.25, 1.5, 2.5])
EC = fuzz.trimf(error_ph, [-0.5, 0, 0.5])
ENP = fuzz.trimf(error_ph, [-2.5, -1.2, -0.25])
ENG = fuzz.trapmf(error_ph, [-3, -3, -2.75, -2.25])
```

Función de membresía de salida

La función de membresía de salida es aquella que, con base en las reglas de control definidas y después del proceso de inferencia, representan el comportamiento o valor de la señal de control ejecutada sobre los actuadores del sistema




```
#output motor1
DG1 = fuzz.trapmf(dutty_motor_1, [40, 70, 100, 100])
DP1 = fuzz.trimf(dutty_motor_1, [0, 30, 60])
DC1 = fuzz.trapmf(dutty_motor_1, [0, 0, 5, 20])
#output motor2
DG2 = fuzz.trapmf(dutty_motor_2, [40, 70, 100, 100])
DP2 = fuzz.trimf(dutty_motor_2, [0, 30, 60])
DC2 = fuzz.trapmf(dutty_motor_1, [0, 0, 5, 20])
```

Fuzificación

En este proceso se asigna un grado de membresía para cada función de membresía definida anteriormente, esta etapa del controlador es aquella que permite cambiar una representación matemática de una señal por una representación difusa.

```
#fuzificación
EPG_F = fuzz.interp_membership(error_ph, EPG, error)
EPP_F = fuzz.interp_membership(error_ph, EPP, error)
EC_F = fuzz.interp_membership(error_ph, EC, error)
ENP_F = fuzz.interp_membership(error_ph, ENP, error)
ENG_F = fuzz.interp_membership(error_ph, ENG, error)
```

Reglas de control

Esta es la base de datos entregada por el programador al controlador, estas reglas operan bajo la lógica de “Si-Entonces” y se pueden entender como la asociación directa entre un valor de entrada y un valor de salida. Para ello se emplea la T-norma, que consiste en hallar los valores mínimos de cada función para posteriormente proceder con el proceso de agregación

```
#REGLAS DE CONTROL
#EPG
RULE_1 = np.fmin(EPG_F, DG1)
RULE_1_1 = np.fmin(EPG_F, DC2)
#EPPP
RULE_2 = np.fmin(EPP_F, DP1)
RULE_2_1 = np.fmin(EPP_F, DC2)
#EC
RULE_3 = np.fmin(EC_F, DC1)
RULE_3_1= np.fmin(EC_F, DC2)
#ENP
RULE_4 = np.fmin(ENP_F, DC1)
RULE_4_1 = np.fmin(ENP_F, DP2)
#ENG
RULE_5 = np.fmin(ENG_F, DC1)
RULE_5_1 = np.fmin(ENG_F, DP2)
```

Inferencia de las reglas difusas

Antes de proceder con la defuzificación se debe aplicar la inferencia de las reglas, por medio de un proceso conocido como agregación, se calculan los valores máximos de un conjunto difuso para definir el comportamiento o curva de respuesta para cada valor de entrada.

```
UNION1 = np.fmax(RULE_1, np.fmax(RULE_2, np.fmax(RULE_3,np.fmax(RULE_4,RULE_5))))
UNION2 = np.fmax(RULE_1_1, np.fmax(RULE_2_1, np.fmax(RULE_3_1,np.fmax(RULE_4_1,RULE_5_1))))
```

Defuzificación

Finalmente, la defuzificación es la obtención de un valor de control con baso en la agregación hecha durante la inferencia, en este caso la librería Skfuzzy emplea el método del centroide para calcular este valor de controls.

```
#DEFUZIFICAACIóN
#MOTOR1
control_value = int(fuzz.defuzz(dutty_motor_1, UNION1, 'centroid'))
#MOTOR2
control_value1 = int(fuzz.defuzz(dutty_motor_2, UNION2, 'centroid'))
```

Comunicación serial

```
if __name__ == '__main__':
    ser=serial.Serial('/dev/ttyACM2', 9600, timeout=1)
    serph=serial.Serial('/dev/ttyACM2', 9600, timeout=1)
    ser.reset_input_buffer()
    serph.reset_input_buffer()
```

```
if ser.in_waiting>0 and serph.in_waiting>0:
    line=ser.readline().decode('utf-8').rstrip()
    lineph=serph.readline().decode('utf-8').rstrip()
```

Se define la comunicación a 9600 bps sin paridad y se identifica conexión por el puerto com ttyACM2, a este puerto se le conceden permisos de lectura y escritura en Raspbian para evitar problemas de comunicación con la Psoc5LP por negación de permisos al puerto que se emplea.
Análisis de las cadenas de caracteres recibidas vía RS232

```
for i in range (len(line)):
    if line[i]=="*":
        pos[acu]=i
        acu=acu+1
acu=0
ph=line[0:pos[0]:1]
ec=line[pos[0]+1:pos[1]:1]
uv=line[pos[1]+1:pos[2]:1]
humedad=line[pos[2]+1:pos[3]:1]
temperatural=line[pos[3]+1:pos[4]:1]
temperaturads18b20=line[pos[4]+1:pos[5]:1]
Contador=line[pos[5]+1:len(line):1]
print(line,"\n",ph,ec,uv,humedad,temperatural,temperaturads18b20,Contador)
```

El método de concatenación de los valores de los sensores leídos con la Psoc5LP se describirá en el siguiente capítulo del documento, sin embargo, acá tenemos un ejemplo de una trama recibida por la Raspberry Pi desde la Psoc5LP.

Bit No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Valor	1	6	.	7	6	1	*	4	6	8	.	9	3	6	*	0	.	9	6	8	*	6	6	*	1	1	*	1	7	.	0	6	*	4	5	1

Esta trama sigue la estructura:
“Valor PH”+’*’+”Valor EC”+’*’+”Valor UV”+’*’+”% Humedad”+’*’+”Temperatura ambiente”+’*’+”Temperatura de los tubos”+’*’+”Contador de eventos”

Lo primero es identificar las posiciones del símbolo ‘*’ en la trama recibida, si bien la longitud de la trama es variable (en función de los valores de cada sensor enviados desde la PSOC), la cantidad de ‘*’ siempre será la misma, este carácter se utilizó como delimitador entre los valores de los distintos sensores. Esto se realiza recorriendo la cadena de caracteres y almacenando en un vector los valores de las posiciones del carácter (el vector en este caso es llamado “pos[]”).

Una vez que las posiciones de los ‘*’ son identificadas, se realiza la segmentación en cadenas de caracteres independientes para el valor de cada sensor.

Realizando una prueba de escritorio breve, se obtiene el siguiente vector de posiciones para esta cadena de caracteres.
Pos[6,14,20,23,26,32]

Y finalmente se realizan las siguientes asignaciones de valores para cada variable:

- Ph=Cadena de caracteres recibida desde la posición inicial (índex 0 del vector) hasta pos[0] (el cual tiene el valor de 6) y comprende la cadena de caracteres "16.761"
- Ec= Cadena de caracteres recibida desde la posición pos[0]+1 (se adiciona 1 posición para omitir el '*' de la trama) hasta pos[1] (el cual tiene el valor de 14) y comprende la cadena de caracteres "468.936"
- Uv= Cadena de caracteres recibida desde la posición pos[1]+1 (se adiciona 1 posición para omitir el '*' de la trama) hasta pos[2] (el cual tiene el valor de 20) y comprende la cadena de caracteres "0.968"
- Humedad= Uv= Cadena de caracteres recibida desde la posición pos[2]+1 (se adiciona 1 posición para omitir el '*' de la trama) hasta pos[3] (el cual tiene el valor de 23) y comprende la cadena de caracteres "66"
- Temperatura1= Cadena de caracteres recibida desde la posición pos[3]+1 (se adiciona 1 posición para omitir el '*' de la trama) hasta pos[4] (el cual tiene el valor de 26) y comprende la cadena de caracteres "11"
- Temperaturads18b20= Cadena de caracteres recibida desde la posición pos[4]+1 (se adiciona 1 posición para omitir el '*' de la trama) hasta pos[5] (el cual tiene el valor de 32) y comprende la cadena de caracteres "17.06"
- Contador= Cadena de caracteres recibida desde la posición pos[5]+1 (se adiciona 1 posición para omitir el '*' de la trama) hasta el valor final de la cadena de caracteres.
-

Envío de señal de control a la PSOC a horarios de riego programados

```
if (x.minute>=40 and x.minute<50) and (x.hour==6 or x.hour==12 or x.hour==20):
    esbom=1
if x.minute>=50:
    esbom=0

if (x.minute>=20 and x.minute<40) and (x.hour==6 or x.hour==12 or x.hour==20):
    flag=1
if x.minute>=40:
    flag=0
if flag==1:
    mspsoc=vd1+vd2+str(esbom)+'kk'


if flag==0:
    mspsoc='10'+'10'+str(esbom)+'kk'
```

Empleando la librería DateTime de Python es posible conocer la hora hora y fecha actual y de esta manera poder trabajar sin la necesidad de emplear un RTC conectado a la Raspberry. Esta librería es empleada para hacer el envío de los Dutty de las motobombas de dosificación y el estado de la bomba de recirculación de fluido hacia la Psoc5LP.

En el primer IF se define que el estado de la bomba "esbom" tenga el valor de 1 en caso de que la hora del día sea 6, 12 o 20 entre los minutos 40 y 49, en todos los demás instantes tendrá el valor de 0 (para desactivar el riego fuera de horario programado).

En el IF 3 y 4, se activa la bandera “flag” que habilita la regulación del pH 20 minutos antes de la circulación de fluido.

En el IF 5 y 6 se analiza el valor de la bandera para enviar el valor correspondiente del dutty de la motobomba de dosificación de la sustancia alcalina (vd1), junto al dutty de la motobomba de dosificación de la sustancia ácida (vd2) y el valor de la motobomba de recirculación (esbom) junto a los caracteres “KK” que indican a la Psoc el fin de la recepción de la trama desde la Raspberry.

Un ejemplo de transmisión sería “12901kk” que se analizaría como:

- Dutty dosificador 1 =12
- Dutty dosificador 2 =90
- Bomba de recirculación =1
- Bits de fin de trama = “kk”

Comunicación con el Device de Azure

Li primero que se debe realizar es definir el device ID, su respectivo Scope junto a la llave primaria para la autenticación de la conexión contra Azure IoT

```
#Insert your device details

DEVICE_ID = "DHTmonitor1"
DEVICE_ID_SCOPE ="0ne0070DF"
DEVICE_KEY = "AcFEFLqdGsfmgdFCbGZonuWIOXN7N0yA4mV7QquU="    #Primary Key

#copy and paste your interface id from your device template
model_id = "dtmi:rpitozure:RPiDHT_24a;1"

#Type your device template component name
sensorName1 = "DHTsensor"
```

La conexión a IoT central se hace por medio de DPS, este protocolo requiere que el dispositivo que intenta establecer la conexión informe cuales son las credenciales de autenticación correspondientes a una instancia de IoT en particular. El protocolo DPS es particular de Azure, no es posible emplearlo para conexión a ningún otro proveedor de IoT.

```
async def main():

    global phard
    switch = "DPS"
    if switch == "DPS":
        provisioning_host = (
            "global.azure-devices-provisioning.net"
        )
        id_scope = DEVICE_ID_SCOPE
        registration_id = DEVICE_ID
        symmetric_key = DEVICE_KEY

        registration_result = await provision_device(
            provisioning_host, id_scope, registration_id, symmetric_key, model_id
        )

        if registration_result.status == "assigned":
            print("Device was assigned")
            print(registration_result.registration_state.assigned_hub)
            print(registration_result.registration_state.device_id)
            device_client = IoTHubDeviceClient.create_from_symmetric_key(
                symmetric_key=symmetric_key,
                hostname=registration_result.registration_state.assigned_hub,
                device_id=registration_result.registration_state.device_id,
                product_info=model_id,
            )
        else:
            raise RuntimeError(
                "Could not provision device. Aborting Plug and Play device connection."
            )
    else:
        raise RuntimeError(
            "At least one choice needs to be made for complete functioning of this sample."
        )

    # Connect the client.
    await device_client.connect()
```

Envío de datos a Azure

La funcion send_telemetry_from_temp_controller es la encargada de envíar el mensaje de telemetría desde el microcomputador hacía el IoT central.

```
async def send_telemetry_from_temp_controller(device_client, telemetry_msg, component_name=None):
    msg = pnp_helper.create_telemetry(telemetry_msg, component_name)
    await device_client.send_message(msg)
    print("Sent message")
    print(msg)
    await asyncio.sleep(1)
```

Orden y formato de envío de datos a Azure

Para realizar el envío de datos, es necesario que estos se encuentren en el formato requerido por IoT central, de modo que se da formato JSON a la información para su posterior envío.

```
async def send_telemetry():
    print("Sending telemetry from various components")


    while True:



        msg = {"Temperature":float(temperatural),
               "Humidity":float(humedad),"Uv":float(uv),
               "Ec":float(ec),"TemperatureDs":float(temperaturads18b20),
               "Ph":float(phard)}

        await send_telemetry_from_temp_controller(
            device_client, msg, sensorName1
        )

send_telemetry_task = asyncio.ensure_future(send_telemetry())
```

La información inicialmente deber ser organizada para posteriormente ser enviada, la organización de la información se realiza en formato Json, de la siguiente manera:

{
“Nombre sensor”: “Valor sensor”
}

Un ejemplo de recepción de datos en Azure, con el formato Json organziado en la Raspberry Pi es el siguiente:

Marca de tiempo ↓	Tipo de mensaje
21/2/2023, 20:19:58	Telemetría


```
{
    "cultivohidroponico": {
        "Temperature": 11,
        "Humidity": 47,
        "Uv": 1.542,
        "Ec": 483.275,
        "TemperatureDs": 15.94,
        "Ph": 3.49
    },
    "_eventtype": "Telemetría",
```

6.2.2 PSOC 5LP

Módulos de entrada y salida

Sensor DS18B20

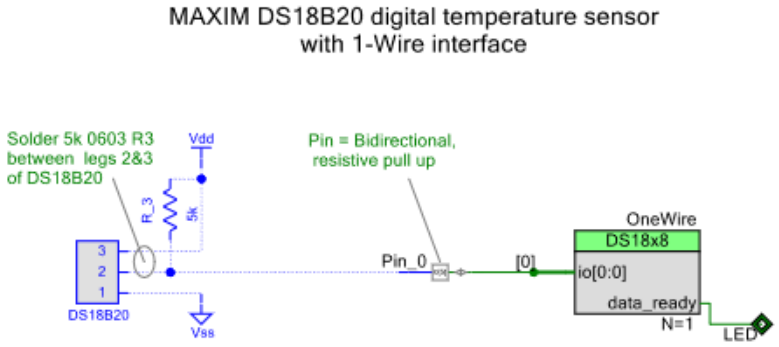


Figura 28. Conexión lógica Psoc Creator sensor DS18b20 (Diseño original).

Entradas y salidas analógicas

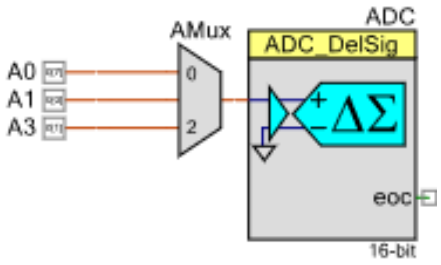


Figura 29. Multiplexor entradas análogas (Diseño original).

Para la adquisición de datos de los módulos análogos empleados se utilizó multiplexor análogo en conjunto a un ADC Delta-Sigma. Según cual sea el sensor que se desea leer, se hará la respectiva seleccione del multiplexor y posteriormente se hará su lectura con el ADC.

Comunicación serial

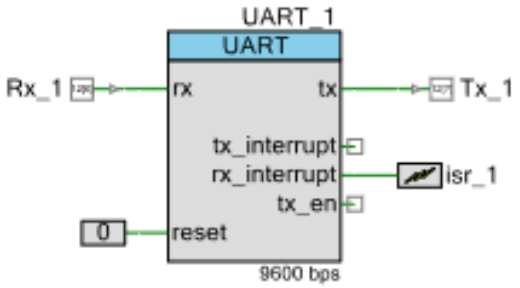


Figura 30. Conexión lógica Psoc Creator comunicación serial (Diseño original).

Esta UART fue configurada exactamente igual que la interfaz serial de la Raspberry Pi, a 9600bps sin paridad, de lo contrario la comunicación no podría ser establecida entre dispositivos. También se empleó la interrupción ISR_1 la cual se ejecutará cada vez que haya un evento en el pin rx de este bloque.

Entradas y salidas digitales



Figura 31. Conexión lógica Psoc Creator pines digitales (Diseño original)

En las entradas y salidas digitales se toma el valor de los sensores de nivel HLS y LLS, y se asignan los pines del GPIO de la Psoc a las variables de salida empleadas para controlar las motobombas del sistema.

Inicialización de variables

```
void Initialize(void)
{
    I2COLED_Start();
    display_init(DISPLAY_ADDRESS);
    gfx_setTextSize(1);
    gfx_setTextColor(WHITE);
    CyGlobalIntEnable;  // Uncomment this line to enable global interrupts.

    UART_1_Start();
    CyDelay(100);// waiting for clear start after power on
    UART_1_PutCRLF(' ');
    UART_1_PutString("Arranca \r\n");

    OneWire_Start();
    AMux_Start();

    Rele_1_Write(1);
    Rele_2_Write(1);
    Rele_3_Write(0);
    Rele_4_Write(0);
    Bomba_1_Write(0);
    Bomba_2_Write(0);
}
```

En esta sección damos valores iniciales a la OLED de prueba, a la interfaz serial, iniciamos el funcionamiento del multiplexor y del sensor ds18b20 y nos aseguramos que ninguna motobomba se active mientras no se haya recibido una trama de control desde la Raspberry Pi.

Interrupción de recepción de datos de control desde la Raspberry Pi

```
CY_ISR(ax){//recepcion de datos
    a=UART_1_GetChar();

    if((a!='k') && (a>47 && a<58)){
        test[j]=a;
        j++;

        valor_convertido=atoi(test);
        while(valor_convertido>99999){
        valor_convertido=valor_convertido/10;
        }

        x1=valor_convertido/10000;
        x2=(valor_convertido-x1*10000)/1000;
        x3=(valor_convertido-x1*10000-x2*1000)/100;
        x4=(valor_convertido-x1*10000-x2*1000-x3*100)/10;
        x5=(valor_convertido-x1*10000-x2*1000-x3*100-x4*10);
        dutty1=x1*10+x2;
        dutty2=x3*10+x4;
        if (x5==1){
            Rele_1_Write(0);
        }
        else{
            Rele_1_Write(1);
        }
    }
    else {
        j=0;
    }
}
```

En el capítulo anterior se describió la trama que envía la Raspberry Pi a la Psoc por medio de la interfaz serial. En este caso se utilizará como ejemplo la trama:

Bit No.	0	1	2	3	4	5	6
Valor	1	2	9	0	1	k	k

A diferencia de la información enviada desde la Psoc5LP hacía la Raspberry Pi, la trama de recibida desde la Raspberry Pi si tiene una longitud definida, un total de 7 caracteres son recibidos como trama de control. La estructura de esta trama es “Dutty motobomba 1”+“Dutty motobomba 2”+”estado motobomba recirculación”+”kk”

Dado que esta interrupción se ejecuta con cada evento del puerto rx de la psoc, se hará recepción bit por bit de la trama enviada por la Raspberry Pi, y estos serán almacenados en la variable “Test” si y solo si el valor recibido es un número entre 0 y 9, y además el carácter recibido no es ‘k’. Dado que la información recibida es de tipo String, se emplea la función “atoi” para obtener su valor numérico en tipo Integer.

Cuando la cadena de caracteres es recibida se analiza si el valor numérico es mayor a 99999 (esto ya que la Raspberry Pi en algunas ocasiones adiciona un ‘0’ a la trama). Una vez que la trama tiene la estructura y el rango numérico esperado, se analiza matemáticamente para poder asignar los

valores de dutty para cada motobomba y así mismo determinar si la bomba de circulación debe estar encendida o apagada.
Inicialmente se convierte la cadena de caracteres “12901”a una variable Integer y se analiza de la siguiente manera:
X1=12901/10000=1
X2=(12901-X1*10000)/1000=2901/1000=2
Estos dos valores corresponden al valor del dutty de la motobomba de dosificación 1, y se asigna así:
Bomba1=X1*10+X2=12

El razonamiento para la obtención del dutty de la bomba 2 obedece el mismo principio:
X3=(12901-x1*10000-x2*1000)/100=9
X4=(12901-x1*10000-x2*1000-x3*100)/10=0
Estos dos valores corresponden al valor del dutty de la motobomba de dosificación 2, y se asigna así:
Bomba1=X3*10+X4=90

Y finalmente se obtiene el valor que se debe asignar a la motobomba de circulación, este es el último carácter no alfabético recibido en la trama.
Y se obtiene de la siguiente manera:
X5=(valor_convertido-x1*10000-x2*1000-x3*100-x4*10)=1

Posterior al análisis de la información recibida, los caracteres “k” sirven como llave de reset de buffer, y con ello se prepara el index del vector donde se almacenan los valores recibidos por la interfaz para reescribir el vector con la próxima recepción de datos.

Lectura de sensores
Las siguientes secciones se ejecutan de forma cíclica dentro de nuestra función While(True)

Llamado a la función de lectura de humedad

```
OneWire_ReadTemperature(); // Leer el sensor DS18B20
DHTread();//Leer el sensor de humedad
```

Lectura del valor del sensor análogo de PH

```
//Sensor PH
AMux_FastSelect(0);
ADC_StartConvert();//inicia la lectura del ADC
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
volts_ph=ADC_GetResult32();
ADC_StopConvert();
vout_PH = ADC_CountsTo_Volts(volts_ph);
PH=-5.3783*vout_PH + 22.731;
//sprintf(Result_PH,"%.6f",PH);
sprintf(Result_PH,"%.3f",PH);

//Fin Sensor PH
```

Lectura del valor del sensor de radiación UV

```
//Sensor UV
AMux_FastSelect(1);
ADC_StartConvert();//inicia la lectura del ADC
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
volts_uv=ADC_GetResult32();
ADC_StopConvert();
vout_UV = ADC_CountsTo_Volts(volts_uv);
mWuv=(vout_UV-0.99)/0.1207;
sprintf(Result_UV,"%.3f",mWuv);
//Fin sensor UV
```

Lectura del valor del sensor de electro conductividad

```
//Sensor TDS
AMux_FastSelect(2);
ADC_StartConvert();//inicia la lectura del ADC
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
volts_TDS=ADC_GetResult32();
ADC_StopConvert();
vout_TDS=ADC_CountsTo_Volts(volts_TDS);
PPM=400*vout_TDS-16;
sprintf(Result_TDS,"%.3f",PPM);
//Fin sensor TDS
```

Lectura de sensores de nivel y envío de datos a la Raspberry Pi por medio de la función “Publish”

```
//HLS
level_hls=HLS_Read();
//Fin HLS

//LLS
level_lls=LLS_Read();
//Fin LLS


Publish();
```

Hasta este punto, Psoc5LP ha hecho la lectura de cada sensor conectado. En los casos del sensor de temperatura DS18B20 y del sensor de humedad DHT11, la lectura de información es por medio de sus respectivas librerías. Ambos emplean el protocolo OneWire, el cual es un protocolo de comunicación serial que emplea un solo bus de datos junto a la conexión a tierra para el envío y recepción de datos.

La lectura de los sensores de pH, radiación UV y de electroconductividad son hechas siguiendo la misma secuencia

- Selección del canal correspondiente para cada sensor en el multiplexor

    - Canal 0 – Sensor de pH

    - Canal 1 – Sensor de radiación UV
    - Canal 2 – Sensor de Electroconductividad
- Inicio de lectura del ADC
- Almacenamiento del valor del ADC a su respectiva variable de tipo integer (valor entre 0 y 65536)
- Conversion del valor del ADC a un valor de voltaje
- Conversión del valor de voltaje a el valor real del sensor medido
- Asignación del valor real del sensor a variable String para ser concatenada

Control de motobombas según la información recibida desde la Raspberry Pi

```
//Inicio controlador
if(dutty1>20){
    Bomba_1_Write(1);
    CyDelay(2000);
    Bomba_1_Write(0);
    CyDelay(50000);

}
else{
    Bomba_1_Write(0);
}
if(dutty2>20){
    Bomba_2_Write(1);
    CyDelay(2000);
    Bomba_2_Write(0);
    CyDelay(50000);

}
else{
    Bomba_2_Write(0);
}

if (dutty1>20 || dutty2>20 || x5==1){
    Rele_2_Write(0);
}
else{
    Rele_2_Write(1);
}
//Fin controlador
```

En esta etapa, se analizan los dutty recibidos desde la Raspberry Pi, cuando un dutty tiene un valor inferior a 20, la motobomba no logra vencer la incercia requeria para llevar el regulador de pH desde el tanque del regulador hasta el tanque de la sustancia nutritiva, por lo tanto se desactiva por completo para evitar averías en la misma.

Función de envío de información hacia la Raspberry Pi y publicación en la Oled

```
void Publish(void)
{
    //char strMsg[80]={};         // output UART buffer
    counter++;

    double temper=0;
    if (OneWire_GetTemperatureAsFloat(0)>0){
        temper=OneWire_GetTemperatureAsFloat(0);
    }

    sprintf(strMsg,"%s*%s*%s*%s*%u*%u*%0.2f*%u \n\r",Result_PH,Result_TDS,Result_UV,humidity,temperature-6,temper-2,counter);
    //sprintf(strMsg,"%u",duttyl);
    UART_1_PutString(strMsg);
    gfx_setCursor(0,0);
    sprintf(test," %u %u \n \r ",duttyl,dutty2);
    gfx_println(test);
    display_update();
```

Por último, en esta función Publish, se realiza el envío de la información obtenida de los sensores hacía la Raspberry Pi, la forma de hacerlo es organizando toda la información en una sola cadena de caracteres y delimitando los diferentes datos con el carácter '*', esto será analizado por la Raspberry para su análisis y tratamiento.

La cadena de caracteres contempla la estructura "Valor PH"+'*'+"Valor EC"+'*'+"Valor UV"+'*'+"% Humedad"+'*'+"Temperatura ambiente"+'*'+"Temperatura de los tubos"+'*'+"Contador de eventos"

En este caso la información publicada en la Oled no tiene una estructura fija, ya que se empleó como herramienta para conocer el valor de ciertas variables sin necesidad de enviarlas a través de la interfaz serial hacía la Raspberry pi y poder comprometer el funcionamiento del programa en Python.

6.2.3. Conexión MongoDB

Se implementó una base de datos no-sql, por medio de la librería pymongo la cual establece conexión con la base de datos alojada en la nube de Atlas-MongoDB y la rasberry pi.

Inicialmente, se define un cliente para la instancia programada en Mongo DB. Teniendo presente que la base de datos se aloja en Atlas, se debe emplear la URL proporcionada por el sistema para la conexión a al servidor indicado junto a la contraseña definida por el usuario.

Después, es necesario establecer conexión con la base de datos y la colección que deseamos editar.

```
client = pymongo.MongoClient("mongodb+srv://Cultivo1:controldifuso@hidroponia.yz7bldn.mongodb.net/?retryWrites=true&w=majority")

db = client['base_datos']

collection = db['sensoreshidroponia']
```

Posteriormente se crea la clase llamada “cultivo” en la cual se definen las variables a almacenar en la base de datos.

```
class cultivo:

        def __init__(self, ph , uv , humedad, temperaturads18b20, temperaturadl, ec,fecha,hora):
            self.ph = ph
            self.uv = uv
            self.humedad = humedad
            self.temperaturads18b20 = temperaturads18b20
            self.temperatural = temperatural
            self.ec= ec
            self.fecha=fecha
            self.hora=hora
```

Con la siguiente función se asegura que el tipo de variable a exportar para los valores de cada sensor se encuentre en tipo String

```
def __str__(self):
    return "ph: %s - uv: %s - humedad: %s - temperaturads18b20: %s - temperaturads18b20: %s -ec %s -fecha %s -hora %s" \
          %(self.ph, self.uv, self.humedad, self.temperaturads18b20, self.temperatural,self.ec,self.fecha,self.hora)
```

Ahora, para poder almacenar los datos de la Raspberry en MongoDB es indispensable darle formato de “<Clave,valor>” y esto se hace creando diccionarios en Python ya que estos emplean el mismo formato de “<Clave,valor>” requerido por MongoDB

```
def toDBCollection (self):
    return {
        "ph":self.ph,
        "uv":self.uv,
        "humedad":self.humedad,
        "temperaturads18b20": self.temperaturads18b20,
        "temperatural":self.temperatural,
        "ec":self.ec,
        "fecha":self.fecha,
        "hora":self.hora
    }
```

Enseguida, se crea una lista de objetos asociada a la clase “cultivo”

```
variables = [cultivo(phard,uv,humedad,temperaturads18b20,temperatural,ec,fecha,hora),
]
```

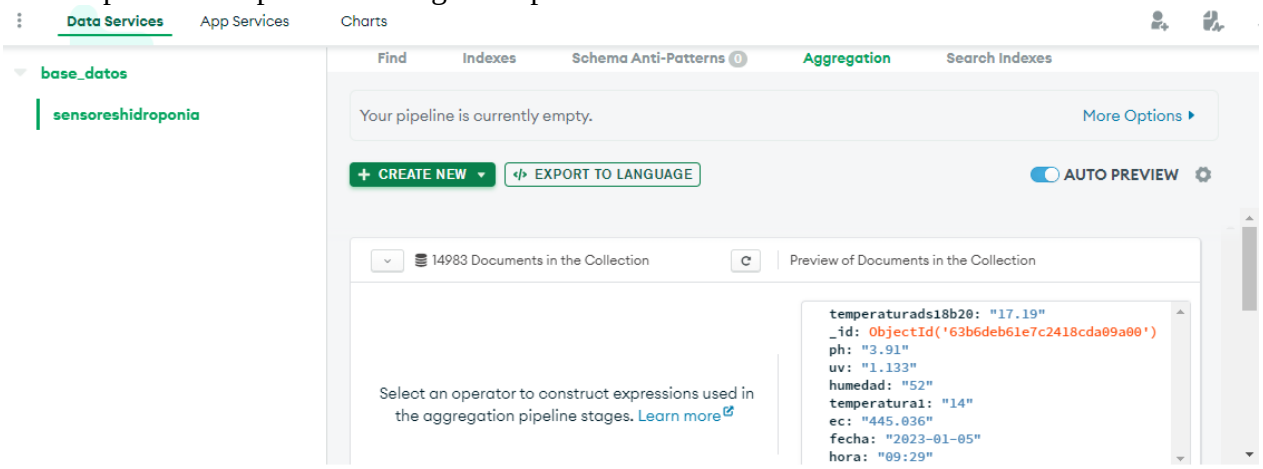
Por ultimo, al haberle dado formato BSON a la información, se procede con la inserción de los objetos cultivo en la colleccción “sensoreshidroponia”

```
    for cultivo in variables:
        collection.insert_one(cultivo.toDBCollection())
```

Un ejemplo de inserción de información desde las Raspberry Pi es:

{'_id': ObjectId('63b6deb61e7c2418cda09a00'), 'ph': '3.91', 'uv': '1.133', 'humedad': '52', 'temperaturads18b20': '17.19', 'temperatura1': '14', 'ec': '445.036', 'fecha': '2023-01-05', 'hora': '09:29'}

Y la respectiva recepción en mongo se representa así:



8. Resultados

8.1. Estructura cultivo hidropónico

Como se observa en la figura 37, la estructura fue diseñada para un cultivo hidropónico NFT, el cual puede realizar producción simultanea de 12 lechugas, adicionalmente en esta estructura se encuentra instalada tanto la sensorica como los controladores del proceso.

En la parte superior de la estructura se encuentra los sensores que miden condiciones ambientales como son la radiación solar, humedad, temperatura. Para monitorizar las características de la solución nutritiva se instaló un sensor de temperatura al interior del tubo de PVC con el fin de medir la temperatura del agua, se utilizaron sensores de pH y electroconductividad, estos dos últimos están ubicados al interior del tanque de almacenamiento.



Figura 32. Estructura cultivo hidropónico (Fotografía original).

8.2. Tablero de control

Dentro de este se alojan todos los circuitos, fuentes, módulos y microcontroladores que conforman el sistema de adquisición de datos y procesamiento del cultivo. Dicho tablero se encuentra anclado en la parte frontal del cultivo y se encuentra al interior de una caja metálica con doble fondo para su fácil anclaje.

Así mismo, cuenta con dos indicadores luminosos de encendido, alarma y una muletilla de apagado general en caso de requerirlo.

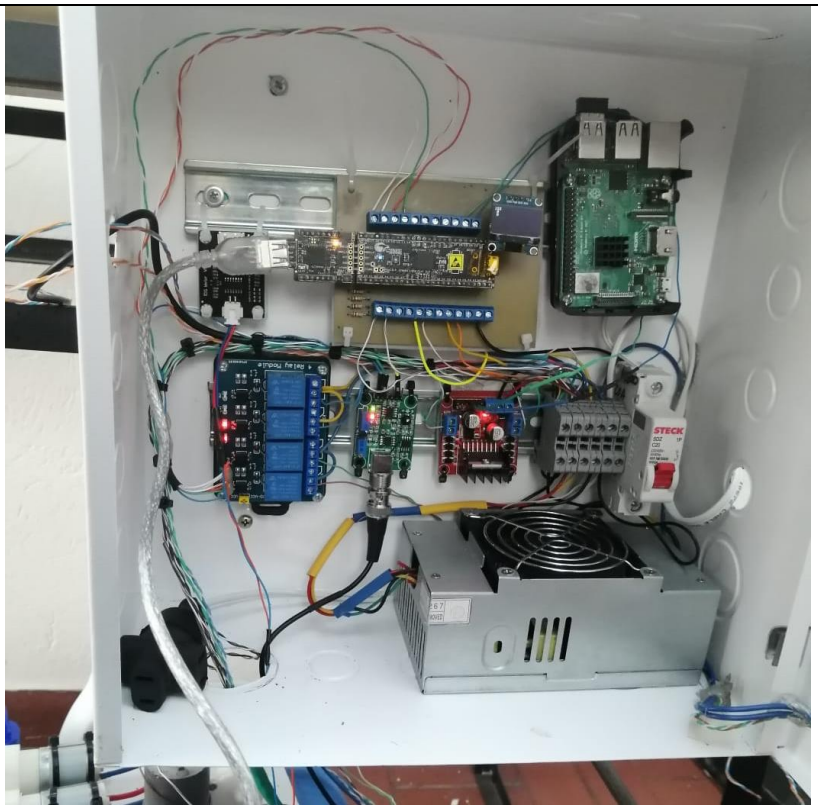


Figura 33.Interior tablero de control (Fotografía original).



Figura 34. Exterior tablero de control (Fotografía original).

8.3. Interfaz grafica

Esta fue diseñada empleando la librería PyQt5 en Python 3.7.8. En particular esta librería cuenta con toolbox de diseño de interfaces llamado QtDesigner, el cual simplifica de forma eficiente el diseño de la interfaz y de esta manera se optimiza el diseño y el tiempo de desarrollo de la misma. Un aspecto a tener en cuenta es que el refresco de las variables mostradas en los TextBox de la interfaz no se realiza de forma automática, de modo que se debe implementar un hilo (propio de la librería PyQt5) que realice esta tarea de forma cíclica y de esta manera el refresco se logre ver cada 500ms.

El resultado de la interfaz es el mostrado a continuación:

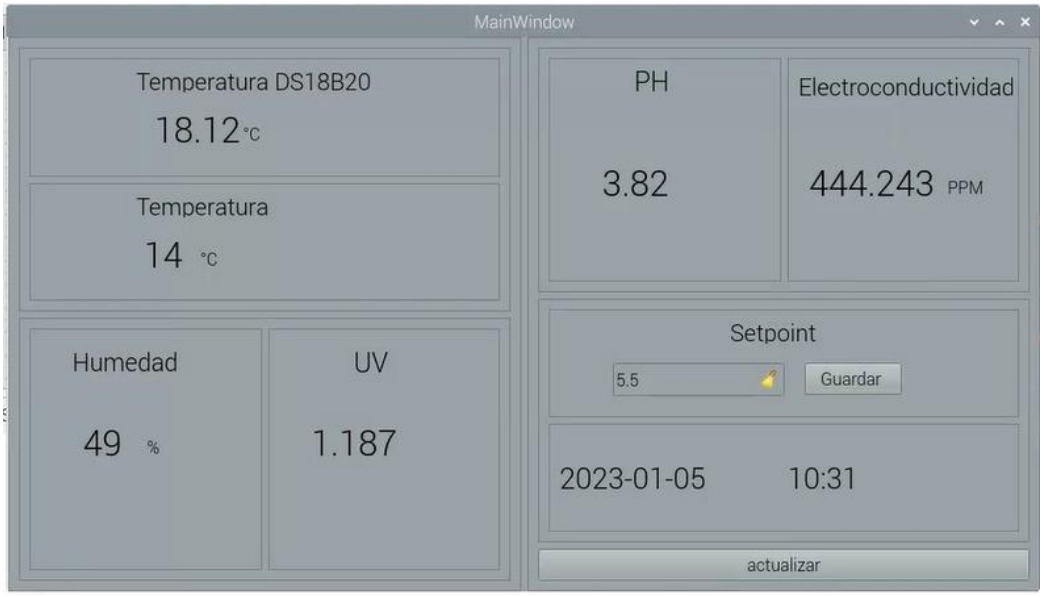


Figura 35. Interfaz Gráfica (Fotografía original).

En esta ventana se observan en tiempo real los valores medidos por los diferentes sensores que se encuentran instalados en el sistema, estos son: Sensor de temperatura DS18B20 usado para la medición de la temperatura interna de los tubos de cultivo, Temperatura corresponde a un sensor DHT11 que mide la temperatura y humedad ambiental, la radiación UV es medida empleando el sensor ML8511, el valor del PH es obtenido con el módulo análogo PH4502C y la electro conductividad de la sustancia nutritiva se mide empleando el módulo análogo TDS-Meter v1.0.

El valor del SetPoint del PH es parametrizable según la necesidad del usuario.

Adicionalmente, para un usuario que no puede monitorear la interfaz local, se puede hacer la consulta de las variables del proceso consultando la información enviada hacia Azure, ya que esta es sencilla de verificar y observar su comportamiento.

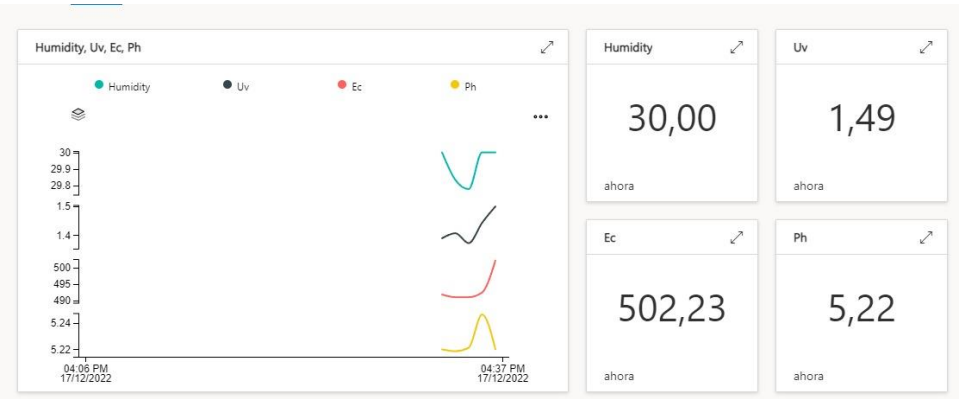


Figura 36. Interfaz Azure (Fotografía original).

8.4. Medición de las variables de proceso

La información mostrada en la ventana previa fue enviada desde la Raspberry Pi 3B+ hacía una base de datos no relacional en la nube, puntualmente, nos referimos a MongoDB. Esta base de datos puede ser fácilmente exportada a un archivo local en formato CSV y posteriormente la información de la misma puede ser analizada a conformidad del usuario para conocer el comportamiento del controlador en cualquier instante del día ya que el envío de información se hace cada 1 minuto durante todo el día.

La siguiente gráfica representa el comportamiento del PH según pasa el tiempo y se ejecuta la regulación del PH mediante el controlador difuso diseñado:

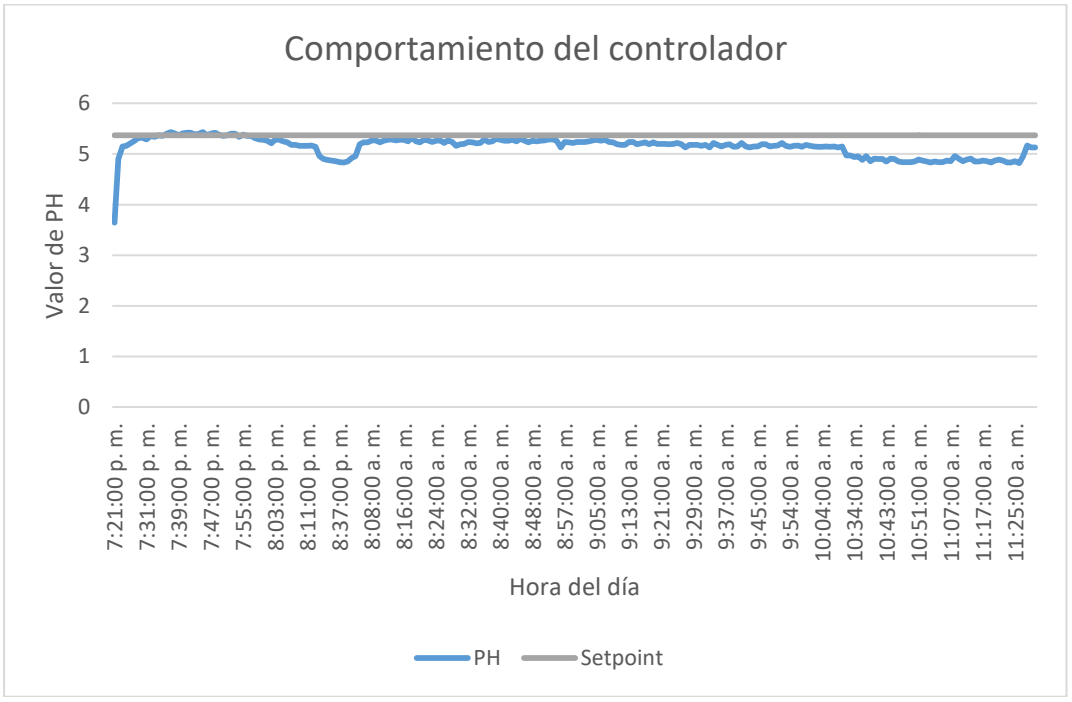


Figura 37. Grafica PH

Esta gráfica es sumamente diciente respecto al comportamiento del controlador, ya que como se puede ver, la regulación se realiza hasta alcanzar el setpoint de pH deseado, luego de esto el nivel del pH baja gracias a la circulación de la solución nutritiva a los tubos de cultivo y nuevamente es trabajo del controlador alcanzar el nivel indicado de pH para poder estar preparado a una próxima circulación de la sustancia.

Ahora, de la misma forma que se evalúa la oscilación del pH para determinar el comportamiento del controlador, es posible hacer un comparativo entre las demás variables ambientales del entorno de cultivo.

La siguiente gráfica representa la relación de la temperatura frente al nivel del pH en la sustancia nutritiva. Y aunque es un poco difícil de percibir, se puede determinar que a mayor temperatura, es más fácil alcanzar niveles elevados de pH, ya que los niveles mínimos de pH se observan cuanto la temperatura es más baja.

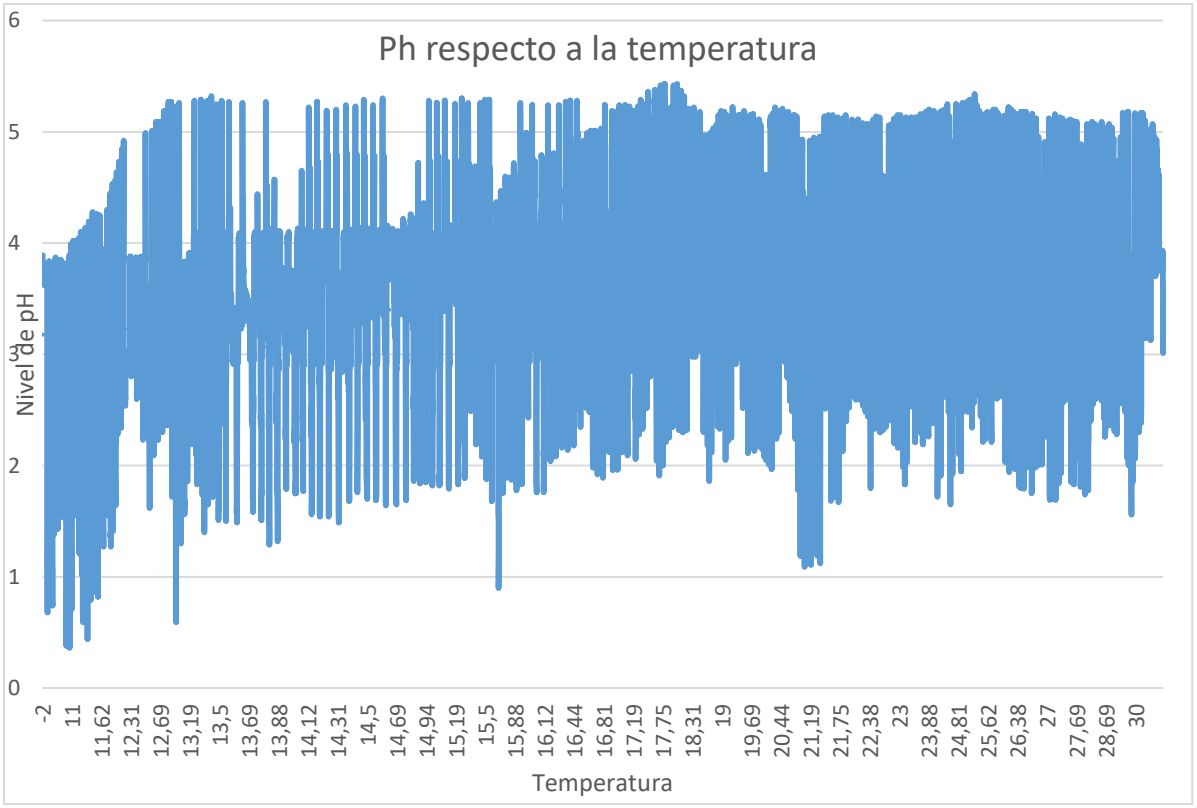


Figura 38. PH vs Temperatura

El siguiente gráfico nos indica el comportamiento de la temperatura ambiente en el transcurso del día.

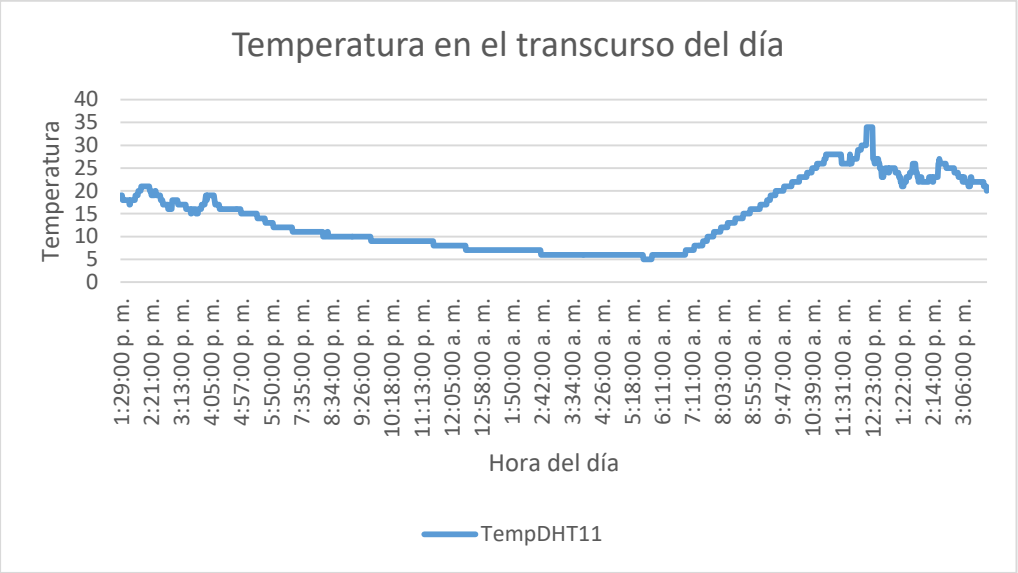


Figura 39. Grafica de temperatura

Con la información obtenida de los dos últimos gráficos, se puede asegurar que es más complejo elevar los niveles de pH entre la media noche y la madrugada (aproximadamente las 6 a.m.) ya que en este periodo de tiempo se registran los momentos más fríos del día y por ende los niveles de pH suelen ser más bajos en la sustancia nutritiva.

Lo anterior implica que en las horas de la noche no se realiza circulación de la sustancia en los tubos de cultivo e intentar realizar la regulación del nivel del pH es ineficiente dado que la temperatura es un factor en contra de esta nivelación de pH.

Por último, la electro conductividad y el pH parecen no tener una correlación directa ya que esta gráfica nos muestra que no hay un patrón que se puede seguir para determinar cómo influye la electro conductividad frente al nivel del pH

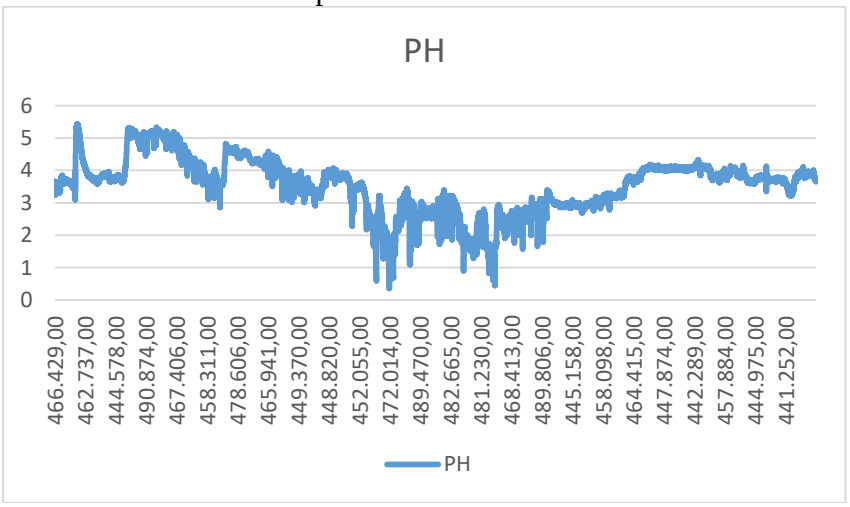


Figura 40. Grafica EC vs PH

8.5. Producto final

Teniendo presente que lo que se buscaba con el controlador es mantener las condiciones más óptimas para el desarrollo de la lechuga, el producto final consiste en una lechuga saludable y sin el uso de pesticidas, tierra para cultivo ni mayor intervención del agricultor.

En seguida se muestran las fotos del proceso de crecimiento y del producto obtenido.



Figura 41. Plántula de lechuga (Fotografía original).

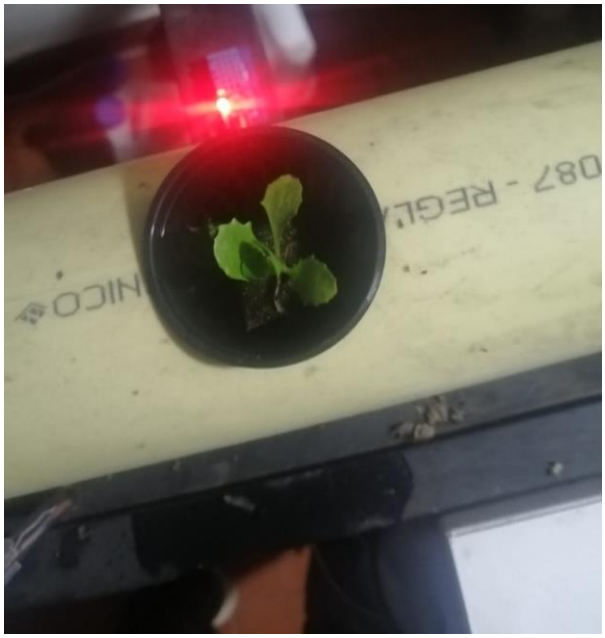


Figura 42. Primeras Hojas de lechuga (Fotografía original).



Figura 43. Crecimiento de las diferentes plantas. (Fotografía original).



Figura 44. Variación del crecimiento (Fotografía original).



Figura 45. Variación 2 del crecimiento (Fotografía original).



Figura 46. Lechuga saludable (Fotografía original).

Este cultivo puede considerarse como exitoso, dado que la lechuga presento un crecimiento sin inconvenientes desde sus primeras etapas (posteriores al cultivo de la plántula) y son notoriamente saludables, sin mordeduras de insectos ni degradación del color de la hoja por quemadura de sol o deshidratación de la planta.

Por último, también se contamos con el resultado de un cultivo fallido, producto de algas en el sistema de cultivo que imposibilitaron la absorción de nutrientes por parte de las lechugas, ocasionando así su deterioro y posterior pérdida.



Figura 47. Plantas en estado de deterioro (Fotografía original).



Figura 48. Raíz afectada por algas (Fotografía original).

9. Conclusiones y Recomendaciones

Una vez que se culminó el primer proceso de cultivo, el cual no fue exitoso, se evidenció la suma importancia de impedir el crecimiento de algas dentro del sistema de cultivo, ya que esta impide el aumento del nivel del pH de la sustancia nutritiva y dificulta de sobremanera la regulación del mismo y la correcta absorción de nutrientes por parte de la lechuga que se encuentra en proceso de cultivo.

Posteriormente, al realizar limpiezas periódicas de algas en los tubos y mangueras del proyecto durante una segunda prueba de cultivo, se logró evitar el crecimiento de estas y el impacto positivo sobre las plantas cultivadas fue bastante notorio, de esta manera las lechugas lograron tener un crecimiento sin contratiempos ni deterioros en su salud, de modo que, si bien no se requieren pesticidas, aún se deben tener ciertos cuidados para prevenir fallas en el proceso del cultivo que afecten la calidad de la lechuga a cosechar.

En cuanto a la regulación del nivel de pH en la sustancia nutritiva se identificaron múltiples factores (propios del proceso de regulación, como factores ambientales) que pueden tener implicaciones directas en esta labor. Principalmente hablando del proceso de regulación resalta la gran lentitud que se requiere para que los reguladores de pH (ácido nítrico e hidróxido de potasio) se homogenicen con la sustancia nutritiva y después de esto el sensor de pH registre el cambio del nivel en la escala de pH en la solución a recircular por el sistema, esta lentitud en el cambio del pH implicó que el controlador no podría dosificar de forma continua los reguladores al tanque de almacenamiento hasta alcanzar el valor de pH deseado, sino que se debían aplicar pequeñas dosis del regulador correspondiente y luego es necesario esperar unos minutos a que el mezclador homogenizara la sustancia nutritiva para que el controlador evaluara si se requería una nueva

dosificación o si el valor del pH medido era tolerable según las reglas de control programadas. En adición, factores como la temperatura ambiental representan un problema al querer regular el pH ya que, según los datos analizados, durante las temperaturas más frías la tendencia del nivel de pH es a permanecer bajo, y dado que estos valores mínimos de temperatura se registran entre las horas de la media noche y la madrugada (11 pm – 5 am) se considera que esta es la franja horaria menos recomendada para regular el nivel del pH y recircular la solución nutritiva.

La tecnificación de este tipo de cultivos brinda, además de la regulación de determinadas variables de proceso, la posibilidad de consultar o monitorear el estado del cultivo ya que la información de los diferentes sensores puede ser consultada desde cualquier parte del mundo por medio de Azure usando las herramientas propias del servicio (Dashboard Central IoT). Pero esta convergencia hacía las tecnologías web no solo llega hasta aquí, ya que empleando MongoDB es posible almacenar todos los datos en tiempo real dentro de una base de datos no relacional almacenada en la nube, esto elimina por completo limitantes de hardware y los riesgos que esto implica, ya que en caso que el micro-computador encargado del procesamiento de la información (en este caso una Raspberry Pi 3B+) sufra alguna avería o daño total, la información de la base de datos aun podrá ser consultada ya que no se encontraba alojada de forma local dentro del micro computador dañado, sino en un servidor de almacenamiento en la nube, el cual es de fácil acceso desde cualquier otro dispositivo.

Aunque la tendencia actual es trasladar la mayoría de los servicios y funcionalidades de un producto a la nube, no se puede pasar desapercibida una herramienta que permita al usuario interactuar directamente con el sistema de cultivo, y para esto se creó una interfaz HMI que no solo muestra en tiempo real los valores de los sensores, sino que permite al usuario "Setear" un valor de setpoint para el nivel del pH que desea alcanzar con el controlador. Esta permite validar si el controlador se encuentra ejecutándose correctamente dentro del micro-computador o si algún evento inesperado (falla eléctrica o de red LAN) impidió el funcionamiento del programa.

Para un trabajo futuro, se propone la implementación de un sistema de suministro automático de agua potable al sistema, lo anterior dado que durante el proceso de cultivo se observó una pérdida del nivel del agua dentro del tanque de almacenamiento de la sustancia (por evaporación del líquido y demás factores ambientales), esta pérdida debía ser controlada manualmente suministrando agua cada cierta cantidad de días, y si bien el tanque de almacenamiento cuenta con los sensores que registran el nivel mínimo y máximo de agua para el funcionamiento del sistema, no contaba con una válvula que se encargara de mantener el nivel de agua más óptimo dentro del tanque de almacenamiento.

10.Referencias

Aceh, kue tradisional khas, & kue tradisional khas Aceh. (2020). *SIMULACIÓN SISTEMA DE IRRIGACIÓN EN CULTIVO HIDROPÓNICO*. *2507*(February), 1–9.

Alonso Melo, H. J., Espitia Acevedo, A. M., & others. (2020). Implementación de un prototipo de oxigenador accionado por energía eólica en un cultivo hidropónico de raíz flotante. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 90. https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/28203

Amaya, A., & Cruz, L. (2016). Diseño e implementación de un control de pH, conductividad y monitoreo del nivel de agua para el cuidado cultivos hidropónicos de uso doméstico. 14.

Ávila, E. P. (2015). Manual Lechuga. *Cámara de Comercio de Bogotá*, 2–54. http://hdl.handle.net/11520/14316

Bacalla, A. C., & Vinluan, A. A. (2019). Hydroponics Farm Monitoring Using Data Fusion and Fuzzy Logic Algorithm. *Journal of Advanced Agricultural Technologies*, *6*(2), 101–107. https://doi.org/10.18178/joaat.6.2.101-107

Beltrano, J., & Gimenez, O. (2020). Cultivo en hidroponía. *Cultivo En Hidroponía*. https://doi.org/10.35537/10915/46752

Cómo producir lechuga hidroponica en Sistema NFT - InfoAgronomo. (n.d.). Retrieved January 6, 2023, from https://infoagronomo.net/como-producir-lechuga-hidroponica-en-sistema-nft/

Cultivo hidropónico: qué es y cuáles son sus beneficios | Discovery Latinoamérica. (n.d.). Retrieved January 6, 2023, from https://www.tudiscovery.com/articulo/cultivo-hidroponico-que-es-y-cuales-son-sus-beneficios

Escala del pH - Experimentoscientificos.es. (n.d.). Retrieved January 6, 2023, from https://www.experimentoscientificos.es/ph/escala-del-ph/

Esquema básico de un sistema de control difuso. | Download Scientific Diagram. (n.d.). Retrieved January 6, 2023, from https://www.researchgate.net/figure/Esquema-basico-de-un-sistema-de-control-difuso_fig1_339203965

Ferentinos, K. P., Albright, L. D., & Scott, N. R. (2000). Modeling pH and Electrical Conductivity in Hydroponics using Artificial Neural Networks. *IFAC Proceedings Volumes*, *33*(19), 173–178. https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)40908-6

Fitria. (2013). DISEÑO DEL SISTEMA NFT PARA LA UNIDAD PRODUCTIVA DE LECHUGA HIDROPÓNICA DE LA ASOCIACIÓN EL TRÉBOL EN MADRID CUNDINAMARCA Autor. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 1689–1699.

Gasc, A., B, A. N., B, S. S., Fr, T., Steven, D., Moreira, S. D. S. L. S., França, A. C., Rocha, W. W., Tibães, E. S. R., Júnior, E. N., Martins, S. C. V. C. V., Araújo, W. L., Tohge, T., Fernie, A. R., DaMatta, F. M. F. F. M. F. M. F. M., Hibberd, J. M., Weber, A. P. M., Tokumura, M., Ohta, A., … Suleria, R. (2018a). ANÁLISIS TÉCNICO FINANCIERO DE SISTEMAS PRODUCTIVOS DE LECHUGA HIDROPÓNICA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN INVERNADEROS, EDIFICACIONES, Y TERRAZAS EN BOGOTÁ Y SUS CERCANÍAS. *Photosynthetica*, *2*(1), 1–13. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-76887-8%0Ahttp://link.springer.com/10.1007/978-3-319-93594-2%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00007-3%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.018%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/s41559-019-0877-3%0Aht

Gasc, A., B, A. N., B, S. S., Fr, T., Steven, D., Moreira, S. D. S. L. S., França, A. C., Rocha, W. W., Tibães, E. S. R., Júnior, E. N., Martins, S. C. V. C. V., Araújo, W. L., Tohge, T., Fernie, A. R.,

DaMatta, F. M. F. F. M. F. M. F. M. F. M. F. M., Hibberd, J. M., Weber, A. P. M., Tokumura, M., Ohta, A., … Suleria, R. (2018b). Metodología para la implementación de IoT. *Photosynthetica*, *2*(1), 1–13. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-76887-8%0Ahttp://link.springer.com/10.1007/978-3-319-93594-2%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00007-3%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.018%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/s41559-019-0877-3%0Aht

Gyulyev, N., Lobashov, O., Prasolenko, O., & Burko, D. (2018). Fuzzy ponics: A fuzzy based system to control temperature, relative humidity, electrical conductivity and PH of hydroponics. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, *7*(4.3 Special Issue 3), 308–314.

Herman, & Surantha, N. (2020). Smart hydroculture control system based on IoT and fuzzy logic. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, *16*(1), 207–221. https://doi.org/10.24507/ijicic.16.01.207

Kassir, E. E. (2019). Sistemas De Control Difuso. *Revista Javeriana*.

LA HIDROPONIA COMO PROYECTOS EMPRENDEDORES.pdf. (n.d.).

La influencia del pH en el cultivo - Anthura. (n.d.). Retrieved June 20, 2021, from https://www.anthura.nl/growing-advise/la-influencia-del-ph-en-el-cultivo/?lang=es

Logica Difusa e Inteligencia Artificial. (n.d.). Retrieved January 6, 2023, from https://es.slideshare.net/CCamaleon5/logica-difusa-e-inteligencia-artificial

Modulo PH analogico PH-4502C : Soporte Sawers Bolivia. (n.d.). Retrieved February 19, 2023, from https://sawerssrl.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000164678-modulo-ph-analogico-ph-4502c

Modulo Sensor TDS Electroconductividad con electrodo para linea – e-LABShop. (n.d.). Retrieved January 6, 2023, from https://e-labshop.com/shop/arduino/modulos/sensores/modulo-sensor-tds-electroconductividad-con-electrodo-para-linea/

Rodriguez Moncada, L. M. (2020). Control de las soluciones y variables ambientales de un cultivo hidropónico de lechuga mediante un sistema embebido conectado a Internet. In *instname:Universidad Santo Tomás*. https://repository.usta.edu.co/handle/11634/29810#.YEbwoyd-JUQ.mendeley

Rossum, G. van. (n.d.). *Tutorial Python Documentation*. Retrieved June 20, 2021, from https://tutorial.python.org.ar/_/downloads/en/latest/pdf/

Sanahuja, S. D. (2017). Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK). *UniversitatJaume*, 73.

Shewale, M. V, & Chaudhari, D. S. (2018). Internet of Things Based Plant Monitoring System for Hydroponics Agriculture. 5(8), 242–249.

Silva, G. A. rozo, Ramirez, J. carlos R., Gomez, J. D. P., & Diaz, H. O. L. (n.d.). Sistema de supervision y alertas de un cultivo hidropónico NFT de lechuga a través del internet de las cosas.

Singgeta, R. L., Chang, Y.-H., & Lin, H.-W. (2018). *Raspberry Pi based pH Control for Nutrient Film Hydroponic System*. https://doi.org/10.31219/osf.io/t8baw

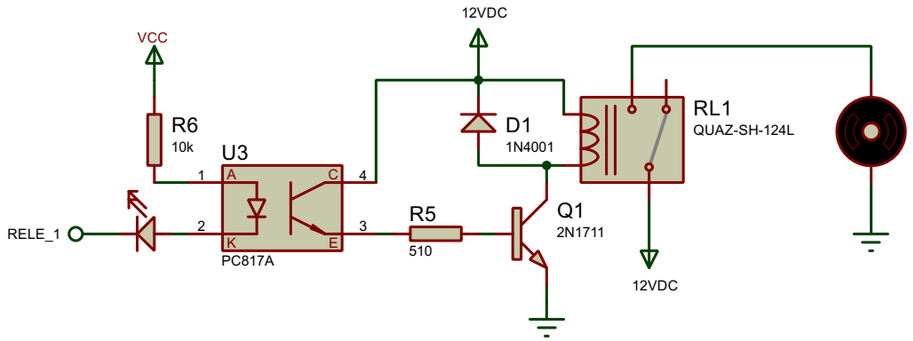
Suhardiyanto, H., Seminar, K. B., Chadirin, Y., & Setiawan, B. I. (2001). Development of a ph Control System for nutrient solution in EBB and Flow Hydroponic Culture Based on Fuzzy Logic. *IFAC Proceedings Volumes*, *34*(11), 87–90. https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)34111-3

Tao, W., & Burkhardt, H. (1994). Application of fuzzy logic and neural network to the control of a flame process. *IEE Conference Publication*, *395*, 235–240. https://doi.org/10.1049/cp:19940631

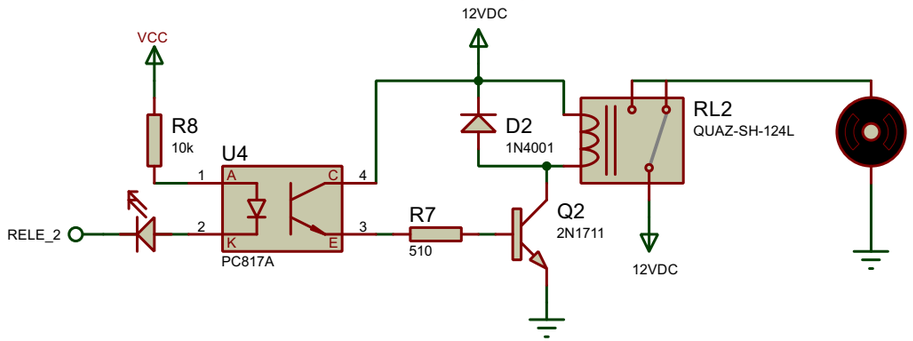
Utama, aditia edy. (2017). Efectos de una red fotoselectiva de rayos UV-B, sobre la respuesta de variables fisiológicas y de crecimiento en plantas de lechuga Crespa verde. 40, 1–14.
Yolanda, D., Hindersah, H., Hadiatna, F., & Triawan, M. A. (2017). Implementation of real-time fuzzy logic control for NFT-based hydroponic system on Internet of Things environment. *Proceedings of the 2016 6th International Conference on System Engineering and Technology, ICSET 2016*, 153–159. https://doi.org/10.1109/FIT.2016.7857556
Zamai, C. A., Bavoso, D., Rodrigues, A. A., & Barbosa, J. A. S. (2016). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL DISEÑO Y MONTAJE DE SISTEMAS DE CULTIVOS HIDROPONICOS DE LECHUGA EN CONJUNTO RESIDENCIAL OKAPI II EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ. DAYANN. *Resma*, *3*(2), 13–22.

DIAGRAMA ESQUEMATICO CULTIVO HIDROPÓNICO

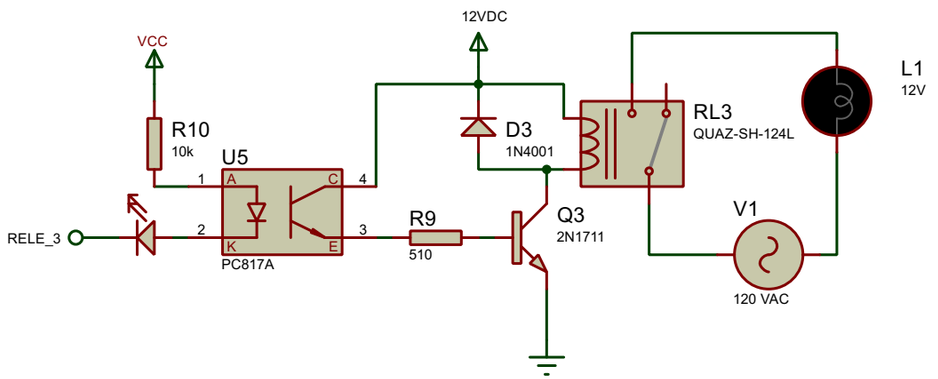
BOMBA DE CIRCULACIÓN



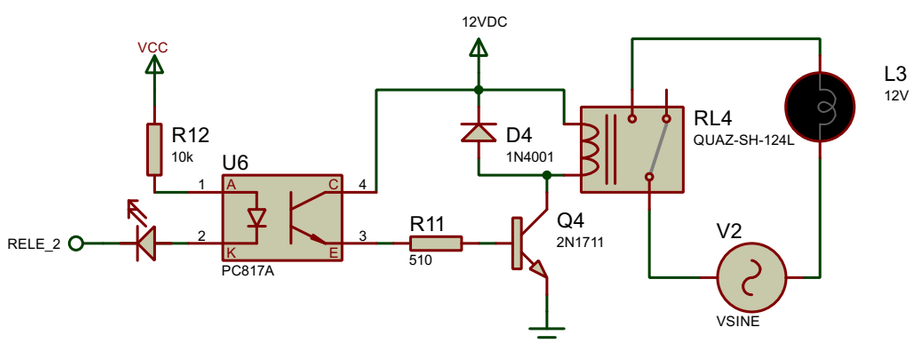
MEZCLADOR



INDICADOR DE ENCENDIDO



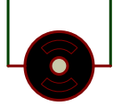
INDICADOR STOP

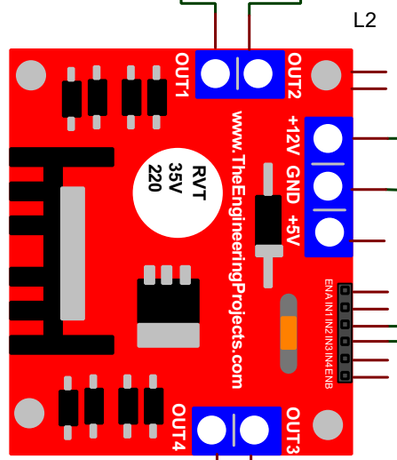


DOSIFICADOR PH+

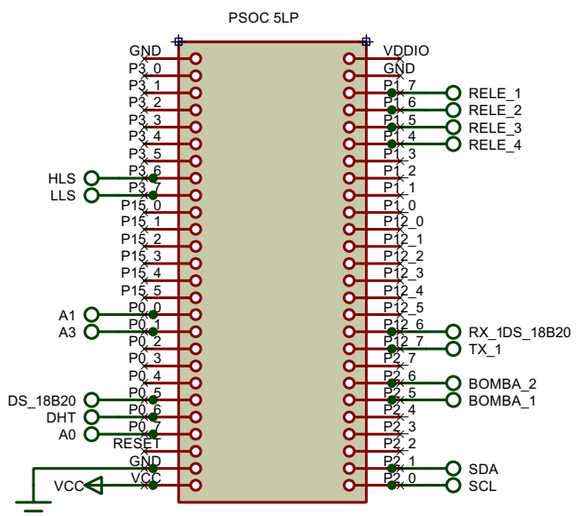


DOSIFICADOR PH-

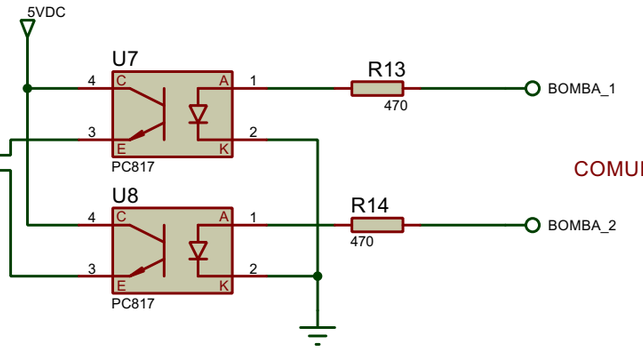




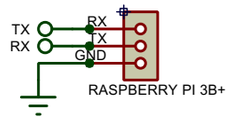
PSOC 5LP



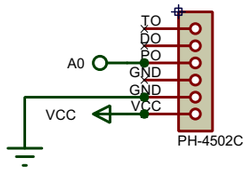
5VDC



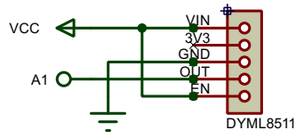
COMUNICACIÓN SERIAL RASPBERRY PI



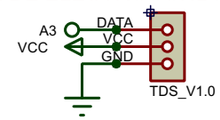
SENSOR DE PH 4502C



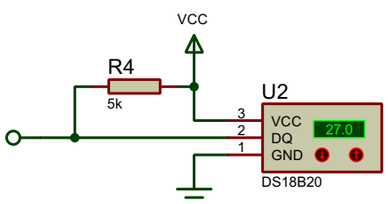
SENSOR RADIACIÓN SOLAR DYML8511



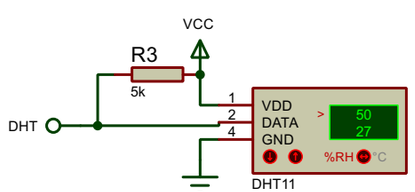
SENSOR DE ELECTROCONDUCTIVIDAD TDS_V1.0



SENSOR DE TEMPERATURA DS18B20



SENSOR HUMEDAD DHT_11



SENSORES DE NIVEL

