UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS

CONTROL Y MONITOREO DE ELECTRO-CONDUCTIVIDAD Y PH DE UN SISTEMA HIDROPÓNICO EN LA CIUDAD DEL CUSCO

PRESENTADO POR:
Br. JULIO CESAR ESCALANTE MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

ASESOR:
DR. Ing. ROGER JESÚS COAQUIRA CASTILLO

CUSCO – PERÚ

2025

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** ....Roger Jesús Coaguira Castillo..... quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: ...Control y monitoreo de electro-conductividad y pH de un sistema hidropónico en la ciudad del Cusco.....

Presentado por: ....Julio Cesar Escalante Mamani..... DNI N° ...70101584.....;
presentado por: ..... DNI N°: .....
Para optar el título Profesional/Grado Académico de .....Ingeniero electrónico.....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por ...2.... veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de .....9.....**%.**

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, ..11.... de .....septiembre..... de 20...25.....

.....
Firma

Post firma.....Roger Jesús Coaguira Castillo
Nro. de DNI.....01336088.....
ORCID del Asesor...000-0003-3791-110x.....

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** ...27259:494989956.....

Julio Cesar Escalante Mamani

Tesis VF_ OBS_F.pdf

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:494989956

Fecha de entrega
9 sep 2025, 7:39 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
9 sep 2025, 7:52 a.m. GMT-5

Nombre del archivo
Tesis VF_ OBS_F.pdf

Tamaño del archivo
3.3 MB

127 páginas

22.346 palabras

126.989 caracteres

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

5% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
8% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado a mis queridos padres, por ser mi apoyo y motivación, por cada sacrificio silencioso, por cada palabra de aliento, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

Este logro no es solo mío, sino también suyo.

Agradecimientos

Al finalizar esta etapa tan importante de mi vida, quiero expresar la gratitud que llevo dentro a todos quienes han sido parte de este camino.

A mi papá, Juan Escalante, a mi mamá, Sabina Mamani y a mi hermano Jair Escalante, por su apoyo constante y por darme el ejemplo que con esfuerzo y dedicación todo es posible, sin su sacrificio y confianza en mí, este logro no habría sido posible.

A toda mi familia, por su compañía, paciencia y aliento en los momentos más complicados. Su presencia ha sido un pilar fundamental en este proceso.

A mis profesores y asesores, por compartir su tiempo y conocimiento, por su orientación y por motivarme a seguir aprendiendo. Gracias por su dedicación y por inspirarme a dar siempre lo mejor de mí.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un sistema de control difuso para regular el pH y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva en un sistema hidropónico, empleando la técnica de Mamdani y un ESP32 como controlador, junto con instrumentos de bajo costo. El trabajo se centró en demostrar la viabilidad y eficiencia de un sistema automatizado capaz de optimizar la producción hidropónica en la ciudad del Cusco.

Se implementó un prototipo económico que mantiene la conductividad eléctrica y el pH dentro de rangos adecuados para el crecimiento de las plantas, mediante sensores y bombas peristálticas. La supervisión y control del sistema se realizaron a través de la plataforma IoT Blynk, priorizando el uso de sensores de bajo costo disponibles en el mercado y complementándolos con software que compensa sus limitaciones.

En cuanto a los resultados, para el control de pH se obtuvieron: tiempo de subida (Tr) = 55 seg., tiempo pico (Tp) = 65 seg., sobre impulso (Mp) = 0.17, tiempo de establecimiento (Ts) = 80 seg., error en estado estacionario (Ess) = 0.08, error absoluto promedio de 0.2 y error porcentual promedio de 3.31%. En el control de la conductividad eléctrica, los parámetros fueron: Tr = 35 seg., Tp = 48 seg., Mp = 0.03, Ts = 62 seg., Ess = 0.02, error absoluto promedio de 0.1 y error porcentual promedio de 3.33%.

Evidenciando que el sistema propuesto es eficiente y viable para el manejo automatizado de sistemas hidropónicos.

Palabras clave: Sistema hidropónico, control difuso, pH, electro-conductividad.

Abstract

The present work aims to develop a fuzzy control system to regulate the pH and electrical conductivity of the nutrient solution in a hydroponic system, using the Mamdani technique and an ESP32 as the controller, along with low-cost instruments. The study focused on demonstrating the feasibility and efficiency of an automated system capable of optimizing hydroponic production in the city of Cusco.

A low-cost prototype was implemented that maintains electrical conductivity and pH within appropriate ranges for plant growth, through sensors and peristaltic pumps. The monitoring and control of the system were carried out through the IoT platform Blynk, prioritizing the use of low-cost sensors available on the market and complementing them with software to compensate for their limitations.

Regarding the results, for pH control the following parameters were obtained: rise time (Tr) = 55 s, peak time (Tp) = 65 s, overshoot (Mp) = 0.17, settling time (Ts) = 80 s, steady-state error (Ess) = 0.08, average absolute error = 0.2, and average percentage error = 3.31%. For electrical conductivity control, the parameters were: Tr = 35 s, Tp = 48 s, Mp = 0.03, Ts = 62 s, Ess = 0.02, average absolute error = 0.1, and average percentage error = 3.33%.

Demonstrating that the proposed system is efficient and feasible for the automated management of hydroponic systems

Keywords: Hydroponic system, fuzzy control, pH, electro-conductivity.

Contenido

Capítulo I: Generalidades 1
1.1 Descripción del Problema 1
1.1.1 Problema general 3
1.2 Justificación 4
1.3 Objetivos 5
1.3.1 Objetivo general 5
1.3.2 Objetivos específicos 5
Capítulo II: Marco Teórico 6
2.1 Antecedentes 6
2.2 Hidroponía 8
2.2.1 Tipos de sistemas hidropónicos 8
2.2.2 La solución nutritiva 10
2.3 pH en las Plantas 11
2.3.1 El pH y la temperatura 12
2.3.2 Sensores de pH 13
2.4 Conductividad Eléctrica en Hidroponía 18
2.4.1 La conductividad eléctrica y la temperatura 19
2.4.2 Sensores de conductividad eléctrica 19
2.4.3 El controlador 24
2.4.4 Sensor de nivel ultrasónico HC-SR04 30
2.4.5 Modulo RTC 32
2.4.6 Sensor de temperatura- DS18B20 33
2.4.7 LCD 2004 I2C 33
2.4.8 Actuadores 34
2.5 Lógica Difusa 36
2.5.1 Controlador difuso 40
2.6 IoT 41
2.6.1 Tipos de plataformas IoT 42
Capítulo III: Requerimiento y Especificaciones del Equipamiento 43
3.1 Equipamiento Para la Calibración 43

3.2 Selección de Componentes....46
Capítulo IV: Diseño e Implementación....49
4.1 Diseño del Sistema Hidropónico....49
4.2 Control de pH....50
4.2.1 Calibración sensor de pH....51
4.2.2 Correccion del pH según la temperatura....57
4.2.3 Controlador por logica difusa del pH....58
4.3 Control de Conductividad Eléctrica....63
4.3.1 Calibración del sensor de conductividad eléctrica....64
4.3.2 Corrección de la EC según la temperatura....67
4.3.3 Controlador por lógica difusa de la EC....68
4.4 Diagrama de Flujo Para el Sistema Hidropónico....73
4.4.1 Esquema de conexión sistema hidropónico....76
4.5 Interface de Control y Monitoreo....77
4.5.1 Control y monitoreo IoT con Blynk....77
4.5.2 Diseño y desarrollo de la interfaz de control....79
4.6 Construcción del Sistema Hidropónico....80
4.6.1 Diseño y desarrollo de las tarjetas electrónicas....81
Capítulo V: Resultados....85
Capítulo VI: Discusión....89
6.1 Descripción de Hallazgos más Significativos....89
6.2 Comparación Critica con Trabajos Existentes....89
Conclusiones....91
Recomendaciones....93
Bibliografía....94
Anexos....99

Índice de figuras

Figura 1 *Tipo de sistemas hidropónicos* 10

Figura 2 *Modulo sensor S-pH-01 modbus de Seeed Studio* 14

Figura 3 *Sensor Orbipac CPF81D.* 15

Figura 4 *Módulo sensor pH-4502C* 17

Figura 5 *Sensor S-EC-01 de Seeed studio* 20

Figura 6 *Sensor SUP-TDS7001* 22

Figura 7 *Módulo sensor TDS-Electro conductividad DFRobot Gravity* 23

Figura 8 *ESP32* 25

Figura 9 *Arduino uno* 27

Figura 10 *Raspberry pi* 29

Figura 11 *Sensor ultrasónico* 30

Figura 12 *Diagrama de tiempo de un sensor ultrasónico* 31

Figura 13 *Módulo RTC* 32

Figura 14 *Módulo de relés* 35

Figura 15 *Bomba peristáltica* 35

Figura 16 *Diagrama de controlador difuso* 36

Figura 17 *Método del criterio máximo* 38

Figura 18 *Método del centro de gravedad* 39

Figura 19 *Método del promedio ponderado* 40

Figura 20 *Soluciones buffer de pH*..... 43

Figura 21 *Soluciones buffer de electro-conductividad* 44

Figura 22 *Hidróxido de potasio y ácido fosfórico* 44

Figura 23 *Instrumentos de medición de pH y electro-conductividad* 45

Figura 24 *Diseño del sistema hidropónico* 49

Figura 25 *Diagrama de control del pH del sistema hidropónico* 51

Figura 26 *Valor promedio de voltaje para la solución con pH 7* 52

Figura 27 *Relación voltaje – pH* 53

Figura 28 *Funciones de membresía de entrada para el control del pH* 59

Figura 29 *Funciones de membresía de salida para el control del pH*..... 60

Figura 30 *Reglas difusas para el control del pH* 61

Figura 31 *Salida del controlador de pH* 61

Figura 32 *Diagrama de control de EC del sistema hidropónico* 63

Figura 33 *Pruebas de mediciones con soluciones conocidas* 65

Figura 34 *Voltaje correspondiente al buffer de EC* 65

Figura 35 *Relacion voltaje /electro-conductividad*..... 66

Figura 36 *Funciones de membresía de entrada para el control de la EC*..... 69

Figura 37 *Funciones de membresía de salida para el control de la EC*..... 70

Figura 38 *Reglas difusas para el control de la EC*..... 71

Figura 39 *Resultados obtenidos mediante el Toolbox de Matlab* 71

Figura 40 *Diagrama de flujo* 75

Figura 41 *Esquema de conexión del sistema hidropónico* 76

Figura 42 *Esquema de control y monitoreo* 78

Figura 43 *La interfaz en la plataforma iot* 79

Figura 44 *Desarrollo inicial del sistema hidropónico* 80

Figura 45 *Estructura para la ubicación de las plantas* 81

Figura 46 *Esquemático de las tarjetas electrónicas* 82

Figura 47 *Enrutado pistas y diseño de la placa PCB* 82

Figura 48 *Vista superior y posterior 3D de la placa PCB* 83

Figura 49 *Vista superior y posterior de la placa PCB terminada* 83

Figura 50 *Sistema hidropónico finalizado* 84

Figura 51 *Respuesta al escalón del sistema de control de pH* 85

Figura 52 *Respuesta al escalón del sistema de control de electro-conductividad* 86

Índice de tablas

Tabla 1 *Valores de pH en plantas* 12

Tabla 2 *Variación del pH con respecto a la temperatura* 13

Tabla 3 *Parámetros generales del sensor S-pH-01* 14

Tabla 4 *Parámetros generales del sensor de pH Orbipac CPF81D* 16

Tabla 5 *Valores de conductividad eléctrica mínimos* 18

Tabla 6 *Parámetros generales del sensor TDS S-EC-01* 21

Tabla 7 *Parámetros generales del sensor SUP-TDS7001* 22

Tabla 8 *Comparativa de microcontroladores y microprocesadores* 46

Tabla 9 *Comparativa de sensores de pH* 47

Tabla 10 *Comparación de los sensores de conductividad eléctrica* 48

Tabla 11 *Rango de valores para el sistema hidropónico* 50

Tabla 12 *Valores de voltaje obtenidos para cada solución de pH* 52

Tabla 13 *Comparativa de la regresión lineal y exponencial* 57

Tabla 14 *Tabla de rangos de pH* 58

Tabla 15 *Valores de las funciones de membresía para el pH* 59

Tabla 16 *Valores de funciones de membresía del pH para la salida* 60

Tabla 17 *Comportamiento de controlador difuso* 62

Tabla 18 *Valores de TDS medidos con el medidor de EC y los valores en voltaje respectivos* 66

Tabla 19 *Tabla de rangos de electro-conductividad para cada función* 68

Tabla 20 *Rangos de las funciones de entrada de EC del controlador difuso* 69

Tabla 21 *Valores de las funciones de membresía de salida de la EC* 70

Tabla 22 *Comportamiento de controlador de EC* 72

Tabla 23 *Error de la medición del pH* 87

Tabla 24 *Error de la medición de la electro-conductividad* 88

Anexos

Anexo A *Checklist y costos* 99

Anexo B *Desarrollo de las plantas en el sistema hidropónico* 100

Anexo C *Monitoreo del sistema hidropónico por Blynk App* 101

Anexo D *Código del programa* 102

Anexo E *Hojas de datos* 104

Listado de abreviaturas

µC	: Microcontrolador.
µS	: Micro Siemens.
ADC	: Convertidor analógico digital.
AES	: Estándar de cifrado avanzada.
BLE	: Bluetooth de bajo consumo.
BR	: Tasa de bits.
BND	: Bayoneta Neill-Concelman.
C°	: Centígrados.
CAN	: Red de área de control.
DAC	: Convertidor digital a analógico.
DFT	: Técnica de flujo profundo.
DMA	: Acceso directo a memoria.
DMIPS	: Millones de instrucciones por segundo.
Dr.	: Doctor.
EC	: Electro-conductividad.
EEPROM	: ROM programable y borrable eléctricamente.
EDR	: Tasa mejorada de datos.
HTTP	: Protocolo de transferencia de hipertexto.
HVAC	: Heating, ventilation, and air conditioning.
I2C	: Circuito inter-integrado.
IoT	: Internet of things.
L	: Litro.
m	: Metro.
M2M	: Máquina a máquina.
MB	: Mega bites.
mg	: Milígramo.
MHz	: Megahertz.
NFT	: Nutrient film technique.
Nm	: Nanómetros.
NPT	: National pipe thread.

PPM : Partes por millón.

PVC : Policloruro de vinilo.

PWM : Modulación de ancho de pulso.

QSPI : Interfaz periférica serie en cola.

RNG : Generador de números aleatorio.

ROM : Memoria de solo lectura.

RTC : Reloj en tiempo real.

S : Siemens.

SD : Digital segura.

SDIO : Origen del instalador del controlador snappy.

SiP : Sistema en paquete.

SMTP : Protocolo de transferencia de mail simple.

SoC : Sistema en un chip.

SPI : Interface periférica serial.

SRAM : Memoria de acceso aleatorio estático.

UART **:** Transmisor receptor asíncrono universal.

VF : Cultivo vertical.

W : Watts.

WAPI : Infraestructura de privacidad y autenticación WLAN.

WFA : Automatización del flujo de trabajo.

Wi-Fi : Fidelidad inalámbrica.

WLAN : Red de área local inalámbrica.

WPA : Acceso de Wi-Fi protegido.

Introducción

En la ciudad del Cusco la producción de alimentos es básicamente tradicional con poco desarrollo tecnológico dependiendo solamente de las características propias de los terrenos de cultivos, dejando de lado otros tipos de técnicas de cultivo no tradicional, tales como la hidroponía.

La hidroponía, es un conjunto de técnicas las cuales son usadas con el fin de poder cultivar teniendo solo el agua como elemento que sustituye a los suelos. La hidroponía permite que en estructuras complejas o simples se puedan desarrollar y crecer plantas, principalmente de tipo herbáceo (vegetales) aprovechando espacios o áreas donde nada se produce, lugares como terrenos escabrosos, azoteas, suelos infértiles, etc. (Beltrano, 2015).

Capítulo I: Generalidades

1.1 Descripción del Problema

La reducción progresiva de tierras cultivables y el aumento constante en la demanda de productos vegetales han generado la necesidad de adoptar nuevas formas de producción agrícola más eficientes y sostenibles. En este contexto, la hidroponía se presenta como una alternativa viable que puede desempeñar un papel crucial en la seguridad alimentaria futura.

No obstante, a pesar de los beneficios comprobados de la hidroponía, su implementación en Cusco es aún incipiente, principalmente por la falta de conocimiento técnico y la carencia de sistemas que faciliten el control adecuado de los parámetros esenciales para el desarrollo de las plantas, como el pH y la conductividad eléctrica (EC) de la solución nutritiva.

El control manual de estos parámetros, que se realiza mediante el uso de envases para sacar una muestra de la sustancia nutritiva, medir el nivel de pH y electro-conductividad con instrumentación previamente calibrada, luego según se requiera, calcular en base a esta medición cuanto porcentaje de sustancia ácida o base es necesario agregarla para que se encuentre dentro de los niveles adecuados de pH y para el caso de la electro-conductividad agregar, en base a los resultados de la muestra que se obtuvo, sustancia nutritiva o agua pura para aumentar o disminuir este valor respectivamente, esta acción es necesario repetirla hasta que ambos parámetros, tanto el pH como la electro-conductividad estén en el rango adecuado para las plantas.

Este método tradicional, además de demandar tiempo y esfuerzo constante, es altamente propenso a errores de medición y dosificación. Esta situación dificulta mantener los niveles de pH y conductividad eléctrica dentro de los rangos óptimos requeridos para el desarrollo adecuado de los cultivos. Dichos valores varían a lo largo del ciclo de crecimiento y dependen del tipo de planta,

por lo que cualquier desviación ocasionada por un manejo inexacto repercute directamente en la absorción de nutrientes, la salud de los cultivos y la eficiencia del sistema hidropónico.

La falta de control y monitoreo adecuado de estos parámetros puede afectar negativamente la absorción de nutrientes y, en consecuencia, el desarrollo y rendimiento de las plantas.

1.1.1 Problema general

- La medición y regulación de los parámetros de la solución nutritiva del pH y de la electro-conductividad en cultivos hidropónicos se realiza de manera manual, afectando los niveles óptimos para la absorción de nutrientes de las plantas y la eficiencia de la producción.

1.2 Justificación

La hidroponía representa una alternativa sostenible y eficiente frente a los desafíos actuales de la agricultura tradicional, como la reducción de tierras cultivables, el uso intensivo de agua y la dependencia de condiciones climáticas. En particular, su capacidad para producir alimentos en espacios reducidos y con un uso controlado de recursos la convierte en una opción atractiva para regiones como la ciudad del Cusco, donde las condiciones geográficas y urbanas limitan la expansión agrícola convencional.

La automatización del monitoreo y control de estos parámetros permitiría optimizar el manejo de los cultivos hidropónicos, reduciendo riesgos, mejorando la productividad y disminuyendo la necesidad de supervisión constante por parte del productor. Asimismo, el desarrollo de una solución tecnológica adaptada al contexto local podría facilitar la adopción de este tipo de agricultura por pequeños productores, instituciones educativas y emprendedores, fomentando la innovación y la seguridad alimentaria en la región.

Además, el uso de sistemas de control convencionales puede resultar costoso y complejo, limitando su aplicación en contextos de pequeña o mediana producción. La implementación de instrumentación de bajo costo junto con un sistema de control difuso puede representar una solución viable, permitiendo una regulación más precisa y adaptable a las condiciones del entorno.

Ante esta situación, se identifica la necesidad de desarrollar una herramienta que no solo regule automáticamente la CE y el pH, sino que también permita el monitoreo eficiente del sistema hidropónico, contribuyendo así a mejorar la productividad local mediante el uso de tecnologías accesibles.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar e implementar un sistema de control difuso para regular la conductividad eléctrica y el pH de la solución nutritiva, además de monitorear un sistema hidropónico para asegurar los valores óptimos de los nutrientes para las plantas en la ciudad del Cusco.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de monitoreo basado en IoT para supervisar parámetros como el pH y la conductividad eléctrica en un sistema hidropónico garantizando su correcto funcionamiento.
- Diseñar un prototipo capaz de regular la conductividad eléctrica y el pH en un sistema hidropónico, asegurando que la solución nutritiva se mantenga dentro de los valores óptimos.
- Implementar un prototipo con monitoreo IoT que permita controlar y monitorizar los niveles de pH y conductividad eléctrica en un sistema hidropónico.

Capítulo II: Marco Teórico

2.1 Antecedentes

En el trabajo de desarrollado (Amaya y Cruz, 2016) se describen las etapas para el diseño e implementación de un control de pH y electro-conductividad de un sistema hidropónico, se describen en este artículo el tipo de hardware y software utilizados para facilitar el uso del sistema al usuario final, como conclusión de este trabajo se desarrolló el control de pH manteniéndose estable al cabo de un día, y en el caso de la electro-conductividad el sistema era capaz solo de aumentar el nivel de este, por lo que, para futuras mejoras se propuso implementar un sistema para la adición de agua para mitigar el efecto de electro-conductividad alta y también la medición de temperatura para un mejor estudio de estos parámetros.

En el trabajo de investigación (Safira et al., 2022) se desarrolló un sistema de control de la calidad de agua para hidroponía, el cual, controla únicamente los niveles de pH. Se usó una tarjeta Arduino uno como microcontrolador encargado de obtener las lecturas de los sensores, adicionalmente se usó una Raspberry Pi para enviar los datos a la plataforma de Telegram la cual es usada como interface IoT para el monitoreo del sistema.

En el trabajo de investigación (Nasution et al., 2023) se desarrolló un sistema de control de pH y electro-conductividad con la implementación de un controlador lógico difuso, el cual fue implementado en un Arduino y cuya visualización de resultados es mediante una adquisición de datos en tablas desarrolladas con Microsoft Excel, la cual es útil solo para el proceso de estudio e investigación y no tanto así para un usuario final el cual requiere ver los datos de manera visual en tiempo real, ya sea mediante alguna pantalla o mediante el uso de otras alternativas como puede ser el IoT.

Al igual que en la investigación citada previamente, en la investigación (Chen et al., 2022) también se desarrolló un controlador lógico difuso el cual mantiene al pH y a la electro-

conductividad dentro de los valores requeridos en un sistema hidropónico usando una Raspberry Pi 3 como tarjeta de desarrollo y adicionalmente usaron una pantalla LCD para la visualización de los datos obtenidos y también se muestran datos del desarrollo de las lechugas bajo estas condiciones en un sistema hidropónico indoor.

En el trabajo de tesis de (Recalde y Rojas, 2022) se detalla el desarrollo de un sistema de control de la electro-conductividad de la sustancia nutritiva, el cual usa el control difuso para tener la sustancia nutritiva en los rangos de valores deseados, todo esto monitorizado mediante el Internet de las Cosas (IoT) usando Node Red como interfaz, pero dejando parámetros importantes como el pH fuera de lado.

En el trabajo de tesis de (Yate y Zambrano, 2021) se desarrolló un prototipo de monitoreo y control automático para un cultivo hidropónico de hortalizas, parámetros como el pH y la electro-conductividad fueron los que se trabajaron en esta investigación, el cual uso la plataforma IoT Ubidots para la visualización de estos parámetros, pero el valor del setpoint no se puede variar para ningún parámetro, por lo que el sistema se limita a mantener el valor del setpoint constante ya programado siendo este una limitante en su uso práctico.

En el trabajo de tesis de (Freire y Pujos, 2020) se implementó un sistema de monitoreo de pH, electro-conductividad, temperatura y flujo de agua en un sistema hidropónico, verificando que el rango de trabajo del pH este entre 5.5 y 6.5 y para el caso de la electro-conductividad entre 1200 y 2200 mS/cm, concluyendo que el uso de tarjetas de bajo costo como el Arduino son eficientes para la obtención de los datos requeridos en hidroponía, pero este trabajo solo desarrolló el monitoreo de estos parámetros por medio del software de LabVIEW, mas no el control de los mismos.

En los trabajos realizados a nivel nacional como en (Chiara et al., 2017), se muestra en su trabajo la optimización de la producción de la espinaca con el desarrollo del control automático de variables ambientales como temperatura y humedad del aire en un invernadero hidropónico reduciendo en este el tiempo de desarrollo del cultivo, pero no realiza un control de pH o de electro-conductividad

En el trabajo de pregrado (Inca, 2013), que controla los parámetros del agua tales como el pH, conductividad, oxígeno y temperatura, este último parámetro, como era de esperar, en un lugar de clima cálido como es la ciudad de Lima, el problema era las altas temperaturas que podría llegar a estar el agua, por lo que se enfoca en el enfriamiento de dicha agua mediante una máquina frigorífica (chiller), todo esto usando el software LabVIEW.

2.2 Hidroponía

Algunos autores defienden que la hidroponía es una forma de cultivar científicamente, que no utiliza tierra como fuente de nutrientes para el desarrollo de las plantas. Por los orígenes griegos de los vocablos que componen la palabra, ésta puede ser interpretada como "trabajo del agua" (hydro=agua, ponos=trabajo) (Soria, 2012).

2.2.1 Tipos de sistemas hidropónicos

Sistema de raíz flotante. Este sistema es una opción de bajo costo que consiste en un depósito que contiene la solución nutritiva, sobre la cual flota una base, generalmente de espuma, donde se ubican las plantas. Para su correcto funcionamiento, es necesario reemplazar o renovar parcialmente la solución nutritiva cada semana. Asimismo, es fundamental oxigenar el sistema a diario mediante algún método adecuado ya sea con el uso de bombas de aire o difusores para evitar que las raíces se asfixien puesto que estas están sumergidas en agua casi todo el tiempo, puesto que si no hay suficiente oxígeno se pueden pudrir las raíces y las plantas morirán rápidamente,

también, como desventajas de este sistema podemos encontrar la formulación frecuente de la solución nutritiva para añadir y/o renovarla, prever la contaminación por algas del soporte donde se tiene las plantas que se generan por la incidencia de la luz del sol. (Gilsanz, 2007).

Sistema con solución recirculante (NFT). En el sistema NFT la circulación de la solución nutritiva puede ser tanto continua como intermitente. Se emplea en canales de profundidad media o elevada, y debido al constante movimiento de la solución, no requiere un aporte adicional de oxígeno. El sistema más reconocido de este tipo es el NFT, diseñado por Cooper en la década de los setenta. El oxígeno es aportado por el aire que rodea a la gran parte de las raíces y por la solución nutritiva que recircula, dicha oxigenación se ve afectada con el aumento de la temperatura, ya que se duplica el consumo con el aumento de 10ºC (Beltrano, 2015).

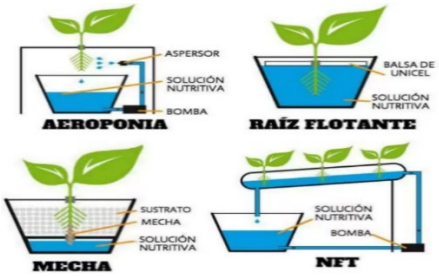
Sistema DFT. El sistema DFT (Deep Flow Technique) se considera un modelo combinado entre los sistemas previamente mencionados. Consiste en una plancha, generalmente de espuma, que se coloca sobre la superficie de la solución nutritiva, compartiendo tanto las ventajas como las desventajas del sistema de raíz flotante. Al igual que en el sistema NFT se tiene presente la recirculación de la solución nutritiva, usando una bomba de agua, eliminando la necesidad de oxigenación, en este sistema pueden ser instalados típicamente los mismos cultivos que en el sistema flotante: plantas de hoja como espinaca y lechuga (Gilsanz, 2007).

Cultivos en aire o aeropónicos. En este tipo de sistema también se emplea una solución recirculante, pero con la diferencia de que las raíces permanecen suspendidas en el aire. La mayoría de estos sistemas utilizan un contenedor aislado donde se desarrollan las raíces, acompañado de una red de aspersores estratégicamente ubicados. Estos aspersores se encargan de mantener la humedad de las raíces mediante la pulverización de la solución nutritiva en intervalos cortos y con una frecuencia ajustable según las condiciones ambientales y las necesidades específicas de cada

tipo de planta. La solución nutritiva sobrante que es recogida es guardada en el tanque de reserva lista para una nueva aspersión ya programada (Beltrano, 2015). La figura 1 muestra algunos de los diferentes sistemas hidropónicos.

Figura 1

Tipo de sistemas hidropónicos



Nota. La figura muestra algunos de los tipos de sistemas hidropónicos más comunes existentes. (Generación verde, 2017).

2.2.2 La solución nutritiva

Se trata de una solución líquida en la que están disueltos los nutrientes minerales esenciales para el adecuado desarrollo del cultivo. El éxito de un sistema hidropónico depende de la composición de esta solución, la proporción entre los distintos iones minerales, así como del control de la conductividad eléctrica y el pH. Conocer la calidad del agua a utilizar para la preparación de la solución nutritiva es sumamente primordial (Beltrano, 2015).

Para las soluciones utilizadas en cultivos sin suelo, la concentración puede expresarse en mg/L. En muchas referencias, la cantidad de nutrientes se indica en función de la superficie (gramos/m^2) o por planta (gramos/planta). En estos casos, es fundamental considerar el aporte de agua al cultivo para determinar con exactitud las concentraciones. Donde la concentración mmol/L ácido es directamente proporcional a la división de mg/l acido entre la masa molecular.

$$\text{mmol/L ácido} = \frac{mg\ /\ l\ acido}{M.\ molecular}$$

2.3 pH en las Plantas

El pH o también conocido como potencial de hidrógeno, representa el grado de acidez o alcalinidad de una solución. Este valor refleja la densidad de iones de hidronio presentes en una sustancia determinada. El valor del pH se establece entre 0 y 14 en disolución acuosa, siendo alcalinas las que tienen pH mayores a 7, se determina soluciones ácidas los que se encuentran con pH menores a 7 y neutro con el valor de pH igual a 7. El pH de la leche por ejemplo es de 6.5, el pH de la sangre esta usualmente entre 7.35 y 7.45, el pH del zumo de limón es de 2 y el pH de detergentes es de 10.5 por citar algunos ejemplos (Soria, 2012).

El pH del sustrato de cultivo regula las reacciones químicas que influyen en la disponibilidad de los nutrientes, ya sea en su forma soluble o insoluble para la absorción de las plantas. Por esta razón, los problemas nutricionales más frecuentes en las plantas suelen presentarse cuando el pH se encuentra fuera de un rango adecuado. El rango óptimo para la mayoría de los cultivos ornamentales es de 5,5 a 6,5. (Beltrano, 2015).

Cuando el pH se mantiene dentro del rango adecuado, los nutrientes alcanzan su máxima solubilidad. Sin embargo, si el pH desciende de este rango, pueden surgir deficiencias de nitrógeno, potasio, calcio y magnesio. Por el contrario, si el pH es demasiado alto, la solubilidad de elementos como hierro, fósforo, manganeso, zinc y cobre puede reducirse. Los óxidos metálicos de hierro, manganeso, cobre y zinc se hacen más solubles al bajar el pH (menor de 5), pudiendo resultar fitotóxicos (Beltrano, 2015). En la tabla 1 se muestran algunos valores de pH para algunas plantas de cultivo.

Tabla 1

Valores de pH en plantas

Planta	pH
Apio	6.5
Cebolla	6 - 6.6
Espinaca	5.9 -7.1
Tomate	5.9 - 6.5
Lechuga	5.5 – 6.5
Repollo	6.5 - 7
Zanahoria	6.3

Nota. En la tabla se muestran algunos valores de pH para la solución nutritiva para algunas plantas. Fuente: (Beltrano, 2015).

2.3.1 El pH y la temperatura

La temperatura influye en la medición del pH, por lo que es necesario aplicar una compensación si se requiere una buena exactitud. Cuando la temperatura aumenta, la viscosidad del líquido disminuye y los iones se mueven con mayor facilidad. Dado que el pH refleja la concentración de protones, cualquier cambio provocado por la temperatura afectará directamente su medición. Cuando la temperatura supera los 25 °C, los valores de pH altos (básicos) tienden a disminuir y los valores bajos (ácidos) aumentan, acercando el resultado a un pH neutro. En cambio, si la temperatura está por debajo de los 25 °C, los valores básicos suben y los ácidos bajan, alejándose del valor neutro. (Quercusblog, 2018). En la tabla 2 se muestra el comportamiento del pH cuando se tiene variaciones en la temperatura.

Tabla 2

Variación del pH con respecto a la temperatura

Rango pH	Temperatura		
	0°C	**25°C**	**60°C**
Acido	pH 0.99	pH 1.00	pH 1.01
Neutro	pH 7.47	pH 7.0	pH 6.51
Básico	pH 14.94	pH 14.0	pH 13.02

Nota. La tabla muestra la variación típica del pH con respecto a la variación de la temperatura en una misma muestra. Fuente: (Quercusblog, 2018).

Para corregir estos efectos, hay dos métodos de compensación. Si la temperatura varía con frecuencia, se recomienda utilizar un compensador automático. Si, por el contrario, la temperatura permanece estable, puede emplearse un compensador manual.

2.3.2 Sensores de pH

Sensor S-pH-01. En la figura 2 se presenta el sensor S-pH-01, diseñado para la medición precisa de la concentración de iones de hidrógeno en soluciones líquidas(pH). Este sensor incorpora un conector de tipo aviación con características impermeables, lo cual lo hace adecuado para entornos exigentes. El diseño se basa en estándares industriales e incluye un dieléctrico sólido de última generación junto con una unión líquida de politetrafluoroetileno de gran tamaño. Esta configuración no solo minimiza la probabilidad de obstrucciones, sino que también simplifica las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo. Además, el encapsulado hermético proporciona una alta resistencia a la humedad, lo que permite su funcionamiento continuo en aplicaciones profesionales de largo plazo.

En cuanto a las características de comunicación, el sensor es compatible con el protocolo MODBUS-RTU a través de una interfaz RS485, y ofrece adicionalmente una salida de voltaje analógica comprendida entre 0 y 2 V. Estas funcionalidades facilitan su integración con diferentes sistemas externos, como registradores de datos, conversores de señal y dispositivos de visualización.

Figura 2

Modulo sensor S-pH-01 modbus de Seeed Studio

Nota. La figura muestra el sensor de pH modulo S-pH-01. Fuente: Mouser Electronics (2023).

Tabla 3

Parámetros generales del sensor S-pH-01

Parámetros generales	
Interfaz de salida	Voltaje analógico 0-2 V (resistencia de salida ~0 ohmios)- RS-485 MODBUS-RTU
Fuente de alimentación	3,9-30 V/CC
El consumo de energía	35 mA a 24 V CC
Medición de pH	Alta impedancia y entrada aislada, Rango: 0 - 14PH; Resolución: 0,01, Exactitud: +/- 0,05PH; Se puede utilizar para una solución o sustrato semisólido.
Medición de temperatura	Rango: - 40~80°C, Resolución: 0,1°C, Exactitud: +/-0,5°C
Clasificación del IP	Electrodo: IP68;

	Transmisor: IP65
Temperatura de funcionamiento	-40 ℃ ~ 85 ℃
Dimensión	Electrodo: Ancho*Diámetro 160*30 mm; Roscas de tornillo de 3/4"NPT; Transmisor: 140 mm * 65 mm * 50 mm

Nota. La tabla muestra las características técnicas del sensor S-pH-01 modbus de Seeed Studio. Fuente: Mouser Electronics(2023).

Sensor Orbipac CPF81D. En la figura 3 se presenta el sensor Orbipac CPF81D, un equipo digital diseñado para aplicaciones industriales que requieren alta robustez y fiabilidad en la medición. Este sensor permite obtener lecturas precisas y estables incluso en medios con alta carga de sólidos, como productos fibrosos o fluidos con velocidades de flujo elevadas. Su diseño incluye un soporte de electrodos integrado, lo que facilita su instalación tanto en configuraciones de flujo continuo como en sistemas de inmersión. Esta versatilidad contribuye a una optimización en el uso del espacio y en la reducción del tiempo de instalación y mantenimiento.

Figura 3

Sensor Orbipac CPF81D.

Nota: La figura muestra el sensor de pH Orbipac CPF81D. Fuente: (Endress + Hauser Group Services AG, 2023).

Orbipac CPF81D es un sensor sencillo para aplicaciones de mucha exigencia. El instrumento registra de forma precisa y confiable en elementos fibrosos y con caudales de corriente rápida. El sensor integrado permite ahorrar espacio durante la ubicación en inmersión. Las cualidades del sensor son:

- Lixiviación y neutralización.
- Una resistente carcasa de polímero brinda protección contra impactos y daños físicos.
- Opción de membrana plana, ideal para productos fibrosos y flujos de alta velocidad.
- Facilita el mantenimiento preventivo al almacenar datos del proceso directamente en el sensor.
- Con puente electrolítico de KNO3 patentado para mejorar la protección de los electrodos.
- Conexión roscada NPT ¾" inferior y superior para una instalación sencilla.

Tabla 4

Parámetros generales del sensor de pH Orbipac CPF81D

Parámetros generales	
Dimensión	22 mm de diámetro, longitud (eje largo): 150 mm. Membrana plana: 140 mm.
Temperatura proceso	De 0 a 110 °C, versión LH. De 0 a 80 °C, versión NN
Presión proceso	De 1 a 10 bar a 80 °C
Sensor temperatura	Pt1000
Conexión	Memosens
Protección	IP68

Nota. La tabla muestra las características de los parámetros generales del sensor de pH Orbipac CPF81D. Fuente: (Endress + Hauser Group Services AG, 2023).

Sensor pH-4502C. El medidor de pH analógico, visto en la figura 4, dispone de un conector BNC que permite una conexión rápida de la sonda, facilitando la obtención de mediciones de pH con una exactitud de ±0.1 a 25 ℃. Este sensor resulta ideal para aplicaciones en sistemas bio-robóticos, monitoreo de calidad del agua y acuicultura, entre otros. Su funcionamiento es sencillo: basta con conectar el sensor de pH mediante el conector BNC y a través de la interfaz PH2.0(conector físico), enlazarlo a una entrada analógica de Arduino. La calibración y ajuste de la ganancia pueden realizarse fácilmente mediante el potenciómetro integrado.

Figura 4

Módulo sensor pH-4502C

Nota: La figura nos enseña una fotografía del sensor de pH-4502C.

Especificación y características:

- Alimentación : 5 V
- Exactitud : 0.1pH(25°C)
- Tiempo de Respuesta : ≤ *1min*
- Rango de detección : 0 ~ 14. (ácido /base)
- Temperatura de trabajo : 0~50°C
- Humedad de trabajo : 95 RH sin condensación

2.4 Conductividad Eléctrica en Hidroponía

La conductividad eléctrica (CE) o electro-conductividad es un indicador de la concentración de sales disueltas en un medio. Para medirla, se emplea un conductímetro y sus unidades de expresión pueden ser mili Siemens por centímetro (mS/cm), deci Siemens por metro (dS/m) o micro Siemens por centímetro (µS/cm), donde 1 mS/cm equivale a 1 dS/m o 1000 µS/cm. Otra forma de representar la conductividad es por medio de ppm (partes por millón), lo que permite estimar la cantidad total de sólidos disueltos (TDS, por sus siglas en inglés: "Total Dissolved Solids"). Ambas formas de expresar la conductividad se relacionan mediante la ecuación: CE (µS/cm) = TDS (ppm) 0,7 En la tabla siguiente (Tabla 5) se indican los límites de CE para algunos cultivos hortícolas sin comprometer el rendimiento (Wallender y Tanji, 2011).

Tabla 5

Valores de conductividad eléctrica mínimos

Especie	CE (mS/cm)
Espinaca	2,0
Frutilla	1,0
Col	1,8
Lechuga	1,6
Melón	2,5
Pimiento	1,5
Brócoli	2,8

Nota. La tabla muestra los valores mínimos requeridos de conductividad eléctrica para algunas plantas. Fuente: (Wallender y Tanji, 2011).

2.4.1 La conductividad eléctrica y la temperatura

La conductividad eléctrica al igual que el pH tiende a tener variaciones en su medición con respecto a la temperatura, cuando la temperatura se incrementa, la viscosidad del fluido disminuye, lo que permite que los iones se desplacen con mayor facilidad. Como resultado, la conductividad del líquido aumenta. Este incremento suele expresarse mediante un coeficiente de temperatura (CT), medido en porcentaje por grado Celsius. En soluciones acuosas, se estima que, por cada grado de temperatura, la conductividad varía aproximadamente un 2 %. Por ello, para comparar correctamente los resultados entre distintos equipos, o entre un sensor y un patrón de referencia, es necesario que las mediciones se realicen a la misma temperatura o que se ajusten a una temperatura estándar. (Bürkert, 2020). Existen diferentes métodos para el cálculo de la compensación de temperatura, métodos tales como: la compensación lineal, compensación no lineal, compensación por agua pura y compensación por agua- NaCl. (Máximo, 2020).

2.4.2 Sensores de conductividad eléctrica

Al igual que el control y monitoreo del pH, la conductividad eléctrica usara el mismo microcontrolador (el ESP32) y los mismos tipos de actuadores (las bombas peristálticas por tratarse del mismo líquido que queremos controlar). Para tener un nivel de electro-conductividad adecuado en el agua es necesaria subir o bajar el nivel según se requiera, y para ello es necesario:

- Agregar agua pura para disminuir la electro-conductividad.
- Agregar agua + sales y minerales (sustancia nutritiva) para aumentar la electro-conductividad.

Para el control y medición de la electro-conductividad es necesaria el sensor adecuado a nuestro proyecto. A continuación, se muestran algunas opciones de sensores disponibles en nuestro mercado actualmente.

Sensor S-EC-01 de Seeed Studio. El sensor S-EC-01(figura 5) mide la conductividad, salinidad y TDS con compensación de temperatura. La señal de salida puede ser RS485 o voltaje analógico, fue diseñado según los estándares de la industria y el sensor EC y TDS (versión B) viene con un conector de aviación impermeable.

Figura 5

Sensor S-EC-01 de Seeed studio

Nota. La figura muestra el sensor S-EC-01. Fuente: Mouser Electronics (2023).

El sensor EC y TDS está construido con compensación automática de temperatura (ATC) que garantiza que los datos sean precisos independientemente de los cambios de temperatura. Este sensor tiene clasificación IP65, es resistente al agua en un sello hermético, cubierta con clasificación IP68 y es capaz de soportar un uso constante a largo plazo en escenarios de aplicaciones profesionales. Las aplicaciones típicas incluyen agricultura, hidroponía y acuaponía, tratamiento de aguas residuales, investigación y monitoreo ambiental.

Especificación y características:

- Rango de medición: 0-20000us/cm.
- Resolución: 0-10000us/cm.
- Exactitud: ±3%.

Tabla 6

Parámetros generales del sensor TDS S-EC-01

Parámetros generales	
Fabricante	Seeed Studio
Categoría de producto	Módulos de sensor de múltiples funciones
Tipo	Industrial EC/TDS Sensor
Tipo de interfaz	RS-485
Voltaje de alimentación	3.9 VDC - 30 VDC
Temperatura de trabajo	Entre + 85 C y - 40 C
Aplicación	Agricultura, hidroponía, acuaponía, tratamiento de aguas residuales, monitoreo ambiental
Estilo de montaje	Screw Mount
Corriente de operación	6 mA

Nota. La tabla muestra las características técnicas del sensor TDS S-EC-01 de Seeed Studio. Fuente: Mouser Electronics (2023).

Sensor SUP-TDS7001. El sensor SUP-TDS-7001, visto en la figura 5, es un analizador químico inteligente utilizado para la medición continua de conductividad eléctrica**,** resistividad **y** temperatura en soluciones líquidas. Su diseño permite un monitoreo preciso y en tiempo real de estos parámetros, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones industriales. Este dispositivo se emplea comúnmente en sectores como la generación de energía térmica, la industria

de fertilizantes químicos, la protección ambiental, la metalurgia, la industria farmacéutica, la bioquímica, la producción de alimentos y bebidas, así como en sistemas de tratamiento de aguas.

Figura 6

Sensor SUP-TDS7001

Nota. Se muestra el sensor de electro-conductividad SUP-TDS-7001. Fuente: Sudmea (2024).

Tabla 7

Parámetros generales del sensor SUP-TDS7001

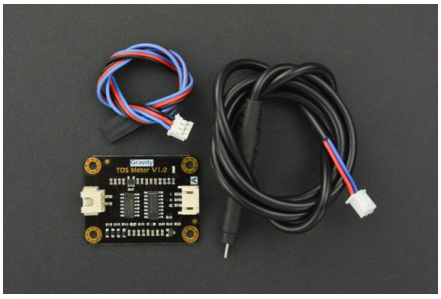
Parámetros generales	
Rangos de medidas	Con electrodo de 0.01 - 20us/cm
	Con electrodo de 0.1 - 200us/cm
Error	±1 %
Presión de trabajo	5 bares
Material	Acero inoxidable 316
Temperatura de trabajo	Entre 0 y 50℃
Exactitud de temperatura	± 3 ℃
Protección	IP68

Nota: Se muestra las características técnicas del sensor SUP-TDS7001. Fuente: Sudmea (2024).

Sensor EC DFRobot Gravity. Para medir el nivel de electro-conductividad del agua de nuestro sistema, usaremos el módulo sensor TDS-Electro conductividad con electrodo para línea, el cual nos permite una medición bastante precisa del nivel de electro-conductividad o TDS según manipulemos el código en el microcontrolador según sea conveniente. Es un módulo de bajo costo y bastante fiable para el proyecto. Dicho sensor lo vemos en la figura 7.

Figura 7

Módulo sensor TDS-Electro conductividad DFRobot Gravity



Nota. La figura muestra al módulo sensor TDS-Electro conductividad DFRobot Gravity. Fuente: DFRobot Gravity (2023).

Este sensor TDS es compatible con Arduino y permite medir la conductividad eléctrica del agua, proporcionando una indicación de su nivel de pureza. Puede utilizarse en aplicaciones como el monitoreo de agua doméstica, sistemas hidropónicos y otros análisis de calidad del agua. El término TDS (Total Dissolved Solids) se refiere a la cantidad de sólidos solubles presentes en agua. Por lo general, un valor más alto de TDS indica una mayor concentración de sólidos disueltos, lo que implica una menor pureza del agua. Por ello, el valor de TDS es una referencia útil para evaluar su grado de pureza.

Características:

- Alimentación: de 3.3 a 5.5V.
- Corriente de trabajo: entre 3 y 6mA.
- Rango de medición: de 0 a 1000ppm(15.6mSiemens).
- Error: ± 10% FS (25 ℃).
- Tamaño: 42 * 32 mm.
- Interfaz de conexión: XH2.54-2P.
- Sonda a prueba de agua.

2.4.3 El controlador

Para poder controlar, medir y monitorizar todos los parámetros propuestos en este trabajo se proponen dos alternativas para cumplir dicho propósito, por un lado, tenemos el uso de un microcontrolador y por otro lado tenemos como alternativa un micro procesador, ambas propuestas pueden ser usadas por su bajo coste económico y sus características que se desarrollan a continuación:

El microcontrolador. El microcontrolador (µC o UC) es un circuito integrado programable diseñado para realizar instrucciones grabadas en su memoria. Está integrado por varios bloques funcionales, cada uno con una tarea diferente y específica.

En su interior, este integra las tres unidades fundamentales de una computadora: unidad central de procesamiento (CPU), memoria y periféricos de entrada y salida, lo que le permite operar de manera autónoma en sistemas embebidos y diversas aplicaciones electrónicas.

ESP32. Creado por Espressif Systems, ESP32 es un sistema de bajo consumo y bajo costo en una serie de chips (SoC) con capacidades tanto de Wi-Fi como de Bluetooth de modo dual. En su interior se encuentra un microprocesador de doble núcleo o de un solo núcleo con una frecuencia de reloj de hasta 240 MHz. El microcontrolador está integrado con interruptores de antena incorporados, también cuenta con un amplificador de potencia, un amplificador de recepción de bajo ruido, filtros y módulos de administración de energía. Generalmente usado en dispositivos móviles, electrónica portátil y aplicaciones de IoT, El ESP32 mostrado en la figura 8 puede trabajar con un consumo de energía ultra bajo a través de funciones de ahorro de energía que incluyen sincronización de reloj de resolución fina, múltiples modos de energía y escalado dinámico de energía. (Espressif,2023).

Figura 8

ESP32

Nota: La figura muestra al ESP32. Fuente: (Espressif,2023).

Características y especificaciones:

- Microprocesador Tensilica Xtensa LX6 de 32 bits.
- Núcleos: 2 o 1 (según variación).
- Frecuencia de reloj: hasta 240 MHz.
- Wi-Fi: 802.11 b/g/n /e/i (802.11n @ 2,4 GHz hasta 150 Mbit/s).
- Bluetooth: v4.2 BR/EDR y Bluetooth de bajo consumo (BLE).
- Memoria interna: ROM: 448 KiB.
- SRAM: 520 KiB. SRAM rápida RTC: 8 KiB SRAM lenta RTC: 8 KiB 256 bits se utilizan para el sistema (dirección MAC y configuración del chip) y los 768 bits restantes se reservan para las aplicaciones del cliente.

Flash externo y SRAM:

- ESP32 admite hasta cuatro flashes QSPI externos de 16 MiB y SRAM con cifrado de hardware basado en AES para proteger los programas y datos de los desarrolladores, también puede acceder al flash QSPI externo y a la SRAM a través de cachés de alta velocidad.

Entrada/salida periférica:

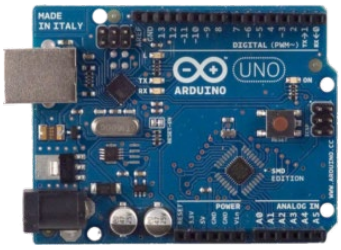
- Soporte para transferencia directa de memoria (DMA), lo que permite una comunicación eficiente entre dispositivos sin sobrecargar la CPU.
- Incorpora entradas táctiles capacitivas, para no usar botones para algunas pruebas.
- ADC (convertidor analógico a digital) de 18 canales de 12 bits.
- DAC (convertidor digital a analógico) de 2 canales de 8 bits.
- I²C (circuito inter integrado).
- UART (receptor/transmisor asíncrono universal).
- CAN 2.0 (red de área de controlador).
- SPI (interfaz periférica en serie).
- I²S (sonido inter-IC integrado).
- RMII (interfaz independiente de medios reducida).
- PWM (modulación de ancho de pulso) y más.

Seguridad: Todas las funciones de seguridad estándar IEEE 802.11 son compatibles, incluidas WFA, WPA/WPA2 y WAPI.

Arduino. Arduino es una compañía mundialmente conocida cuyo principal rubro es el de permitir el uso de la electrónica y programación de sistemas embebidos en proyectos multidisciplinarios a usuarios profesionales y no tan profesionales en la programación de microcontroladores. Los productos que ofrece la compañía son distribuidos como hardware y software libre, permitiendo la manufactura de las placas. Las placas Arduino están disponibles comercialmente en forma de placas ensambladas o también en forma de kits, hazlo tú mismo. (Espressif,2023).

Figura 9

Arduino uno



Nota: La figura muestra la placa de desarrollo Arduino uno. Fuente: (Suárez, 2023).

Arduino Uno, Mega y Nano son tres de las placas más populares en el entorno de Arduino, cada una con características distintas que las hacen adecuadas para diferentes tipos de proyectos.

Arduino Uno. Es la opción más utilizada para iniciarse en la programación y electrónica, ya que cuenta con el microcontrolador ATmega328P que opera a una velocidad de reloj de 16 MHz y trabaja con un voltaje de 5V. Dispone de 14 pines digitales (de los cuales 6 pueden usarse como PWM) y 6 entradas analógicas. En términos de memoria, ofrece 32 KB de memoria Flash (con 2 KB reservados para el bootloader), 2 KB de SRAM y 1 KB de EEPROM. Su conector USB es del tipo B y tiene un solo puerto serie por hardware. Su tamaño es de 68.6 mm × 53.4 mm, lo que lo hace compacto y versátil para la mayoría de los proyectos.

Arduino Mega 2560. El Arduino Mega está diseñado para proyectos más avanzados que requieren más pines y capacidad de procesamiento. Utiliza el microcontrolador ATmega2560 y, al igual que el Uno, opera a 16 MHz y 5V. Su principal ventaja es la cantidad de pines disponibles: 54 digitales (15 de ellos PWM) y 16 entradas analógicas. Además, posee una mayor capacidad de memoria con 256 KB de Flash (8 KB destinados al bootloader), 8 KB de SRAM y 4 KB de EEPROM. Cuenta con cuatro puertos serie por hardware, lo que facilita la comunicación con

múltiples dispositivos simultáneamente. Su tamaño es más grande, con dimensiones de 101.52 mm × 53.3 mm, lo que lo hace menos compacto, pero más potente para proyectos complejos.

Arduino Nano. El Arduino Nano es una versión reducida del Uno, manteniendo el mismo microcontrolador ATmega328P y la misma velocidad de reloj de 16 MHz. Su principal ventaja es su pequeño tamaño, de solo 45 mm × 18 mm, lo que lo hace ideal para proyectos en los que el espacio es una limitación. Funciona con 5V y puede recibir entre 7 y 12V de entrada. Dispone de 14 pines digitales (6 PWM) y 8 entradas analógicas. Su capacidad de memoria es la misma que la del Uno: 32 KB de Flash (2 KB reservados para el bootloader), 2 KB de SRAM y 1 KB de EEPROM. A diferencia del Uno y el Mega, el Nano utiliza un conector Mini USB para la programación y comunicación.

En resumen, Arduino Uno es perfecto para principiantes y proyectos estándar, el Mega es ideal para aplicaciones que requieren más pines y memoria, mientras que el Nano ofrece las funcionalidades del Uno en un formato compacto, ideal para proyectos portátiles o con restricciones de espacio.

El microprocesador. El microprocesador o micro ordenador es, tal como su nombre lo indica, una minicomputadora capaz de realizar diversas tareas programadas, tales como recibir datos de diferentes tipos de sensores, realizar cálculos y controlar diferentes tipos de actuadores, etc. Es un dispositivo que realiza las funciones de una PC a menor escala en un único circuito integrado. Se encarga de activar los programas y el sistema operativo.

Raspberry Pi. La Raspberry Pi mostrado como ejemplo en la figura 10 es un microprocesador del tamaño de una tarjeta de crédito, esta placa se ha vuelto muy popular debido a su precio accesible y sus amplias posibilidades, ganando rápidamente millones de seguidores. En su compacto PCB, se integran un procesador de cuatro núcleos, memoria RAM, puertos USB,

Ethernet y HDMI. Además, la versión más reciente (utilizada en este curso) incluye conectividad Wi-Fi y Bluetooth.

Figura 10

Raspberry pi

Nota: La figura muestra una Raspberry pi modelo B. Fuente: (Raspberry pi Foundation, 2023).

Raspberry Pi 2 Modelo B. Lanzada en 2014, esta versión fue la primera en incorporar un procesador distinto a sus predecesores, reemplazándolo por el BCM2836 de la misma marca. Mejoró significativamente su rendimiento al pasar de un procesador de un núcleo a uno de cuatro núcleos, con una frecuencia de 700 MHz a 900 MHz. Sin embargo, mantuvo la gráfica VideoCore IV. También duplicó la memoria RAM, pasando de 512 MB a 1 GB, aunque esta sigue siendo compartida con la GPU. Además, incluye 40 pines GPIO, conserva los cuatro puertos USB, pero elimina la conexión RCA.

Raspberry Pi 3 Modelo B. Lanzada en 2016, esta versión presentó un nuevo procesador Quad-Core de Broadcom, aumentando su velocidad de 900 MHz a 1.2 GHz. La memoria RAM se mantuvo en 1 GB, pero su gran innovación fue la incorporación de Wi-Fi y Bluetooth (4.1 Low Energy) de forma nativa, eliminando la necesidad de adaptadores externos.

Raspberry Pi 4 Modelo B. Esta versión introdujo varias mejoras clave. Se reemplazaron los puertos HDMI por dos puertos micro HDMI, lo que permite soportar una o dos pantallas 4K a 60 Hz o 30 Hz respectivamente. También se añadió como novedad un conector USB 3.0,

mejorando la velocidad de transferencia de datos, y el puerto Ethernet superaba la velocidad de 300 Mbps. Además, incorpora un nuevo procesador Broadcom, que es mucho más eficiente que su predecesor. Se ofrece en tres modelos con diferentes capacidades de memoria RAM desde 2 GB hasta 8 GB.

2.4.4 Sensor de nivel ultrasónico HC-SR04

Teniendo la gran cantidad de tipos de sensores disponibles en el mercado, para nuestro sistema hidropónico optamos por la utilización del sensor ultrasónico HC-SR04 por su bajo coste y que no tenga contacto directo con la sustancia nutritiva y así evitar la contaminación de esta misma.

El sensor HC-SR04 es un dispositivo de bajo costo que emplea ultrasonido para calcular la distancia de un objeto con respecto al mismo dentro de un rango de 2 a 450 cm. Se caracteriza por su tamaño pequeño, bajo consumo de energía, buena precisión y accesibilidad económica.

Es uno de los sensores ultrasónicos más populares, especialmente por la abundante información y proyectos disponibles en la web. Su uso es común en robótica, así como en proyectos de control y automatización y como en sistemas de medición de nivel o distancia. Este dispositivo lo podemos ver en la figura 11.

Figura 11

Sensor ultrasónico

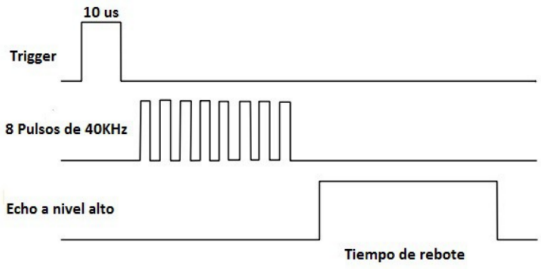
Nota. La figura muestra el sensor ultrasónico HC-SR04 el cual será utilizado en nuestro sistema hidropónico. Fuente: (Morgan, 2014).

El sensor HC-SR04 posee dos transductores: un emisor y un receptor piezoeléctricos, además de la electrónica necesaria para su operación. El sensor funciona de la siguiente manera: cuando recibe una señal en el pin TRIG, el emisor piezoeléctrico genera 8 pulsos de ultrasonido a 40 kHz. Estas ondas viajan a través del aire y, al encontrar un obstáculo, se reflejan de vuelta. (Morgan, 2014).

El receptor piezoeléctrico detecta el eco de la señal reflejada y en respuesta, el pin ECHO cambia a un estado alto durante un tiempo que es directamente proporcional al recorrido de la onda desde su emisión hasta su detección. El microcontrolador mide este tiempo y con base en él, calcula la distancia al objeto el cual se quiere saber la distancia que existe. Como una cualidad a destacar, el rendimiento del sensor no se ve alterado por la incidencia de la luz solar u otro tipo de luz, ni por superficies de color negro, lo que lo hace confiable en diversas condiciones ambientales. (Morgan, 2014). Este funcionamiento lo podemos ver en la figura 12 para entenderlo mejor.

Figura 12

Diagrama de tiempo de un sensor ultrasónico



Nota. Se muestra el diagrama de tiempo del funcionamiento del sensor Fuente: (Morgan, 2014).

La distancia calculada se obtiene:

Distancia(m) = [(Tiempo del pulso ECO) * (Velocidad del sonido=340m/s)]/2

2.4.5 Modulo RTC

El módulo DS3231 es un reloj en tiempo real (RTC) con interfaz I2C, altamente preciso y de bajo costo. Incorpora un oscilador de cristal compensado por temperatura (TCXO) y un cristal integrado, lo que garantiza una medición exacta del tiempo. Este dispositivo cuenta con una entrada para batería, permitiendo mantener la hora incluso cuando se interrumpe la alimentación principal. La integración del resonador de cristal mejora su precisión a largo plazo y optimiza el diseño al reducir la cantidad de componentes necesarios en una línea de fabricación.

El DS3231 también ofrece alarmas programables y una salida de onda cuadrada ajustable. Tanto la dirección como los datos se transmiten en serie a través de un bus I2C bidireccional. Además, incluye una referencia de voltaje de precisión y un circuito comparador que supervisa el estado de VCC para detectar fallos de energía, generar una señal de reinicio y cambiar automáticamente a la fuente de respaldo cuando sea necesario.

En el mercado existen diferentes tipos de módulos RTC (Real Time Clock) como lo podemos ver en la figura 13. Los cuales nos brindan la hora y fecha actual o programada, dicho parámetro es esencial para poder programar el modo de trabajo requerido en nuestro sistema hidropónico, como la hora de prendido y apagado del sistema, la hora de riego o recirculación de la sustancia nutritiva, etc.

Figura 13

Módulo RTC

Nota. La figura muestra el módulo RTC DS3231 usado en el sistema hidropónico.

2.4.6 Sensor de temperatura- DS18B20

El sensor DS18B20, es un sensor digital a prueba de agua, es un dispositivo fácil de usar con cualquier tipo de microcontroladores. Lleva en el internamente toda la electrónica necesaria, incluyendo el censado, acondicionamiento de señal, conversión analógica a digital.

Este sensor emplea el protocolo 1-Wire, lo que permite obtener la temperatura utilizando solo un cable para datos. Además, es posible conectar múltiples sensores en el mismo bus, ya que cada uno cuenta con un identificador único de fábrica.

Características:

- Voltaje operación : de 3 a 5.5V DC.
- Rango medición : de -55 a +125°C.
- Resolución : 9-12 bits.
- Protocolo : 1-Wire.
- Disposición de cables : Rojo (+VCC), Blanco (DATA), Negro (GND).
- Identificación única de 64 bits.

2.4.7 LCD 2004 I2C

Este es el módulo de pantalla LCD 20x4 con interfaz I2C, un nuevo módulo LCD de 4 líneas y 20 caracteres de alta calidad con placa ajuste de control de contraste, retroiluminación con una interfaz de comunicación. LA ventaja principal del uso de este tipo de pantalla LCD es la utilización del bus serie de comunicación I2C el cual simplifica y hace más sencilla la interconexión del circuito, también este protocolo permite que se pueda guardar o ahorrar algunos pines de E/S en la placa Arduino o cualquier otra placa que se utilice.

Como otra ventaja del uso de esta pantalla es el desarrollo de código de manera simple y fácil gracias a que tiene a disposición una amplia biblioteca de código abierto.

Características.

- Tipo de pantalla: Negro sobre retroiluminación.
- Dirección I2C: 0x38-0x3F (0x3F predeterminado).
- Tensión de alimentación: 5V.
- Interfaz: I2C a líneas de control y datos LCD de 4 bits.
- Ajuste de contraste: potenciómetro incorporado.
- Control de retroiluminación: firmware o cable de puente.

2.4.8 Actuadores

En cuanto a los actuadores, se optó por el uso de los módulos de relés y de bombas peristálticas porque nos brindan mayor precisión frente a otros tipos de bombas de agua en el mercado y son fácil de controlar con bajos voltajes de alimentación.

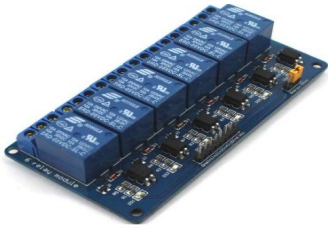
Relés. El módulo de relevadores (relés) está diseñado para la conmutación de cargas de potencia. Sus contactos permiten conmutar cargas de hasta 10A y 250V en corriente alterna (30V en corriente continua), aunque por lo común se operan por debajo de estos valores para mayor seguridad y durabilidad.

Las entradas de control están aisladas mediante optoacopladores, lo que ayuda a reducir el ruido en el circuito de control durante el proceso de conmutación. Además, la señal de control puede generarse a partir de cualquier circuito basado en TTL o CMOS, como un microcontrolador.

Es ampliamente usado en la conmutación de cargas de corriente alterna que están conectadas a la red eléctrica, dependiendo del número de relés que se tenga, este módulo es capaz de controlar varios equipamientos de alta corriente durante un tiempo largo o corto según se requiera. Este módulo que fue usado en el sistema lo podemos ver en la figura 14.

Figura 14

Módulo de relés



Bomba peristáltica. La acción de la bomba peristáltica es suave y adecuada para fluidos que no son resistentes al cizallamiento. La estructura simple y confiable de esta bomba también es ideal para bombear fluidos abrasivos, frágiles y corrosivos de flujo medio y de no muy alta presión. La bomba peristáltica funciona utilizando un tubo de elastómero blando que resiste la deformación y vuelve a su forma original. La bomba peristáltica funciona de manera similar a presionar una manguera con un dedo lleno de fluido; a medida que el dedo se desliza, el líquido dentro del tubo avanza. En este tipo de bomba, el mismo principio se aplica, pero en lugar de un dedo, se utilizan rodillos que comprimen y liberan alternativamente una manguera flexible, permitiendo el bombeo continuo del fluido. Esta la podemos ver en la figura 15.

Figura 15

Bomba peristáltica

Nota. La figura muestra una bomba peristáltica, los cuales son usados para aumentar y disminuir tanto el pH como la electro-conductividad.

Especificación y características:

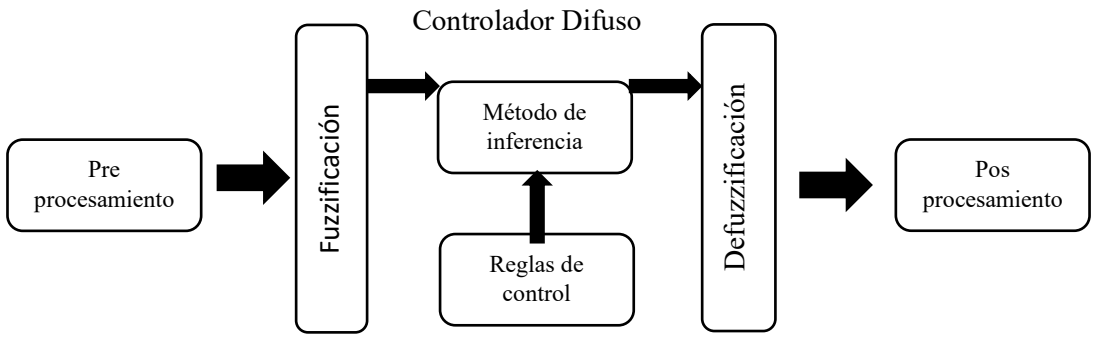
- Rango de flujo: Entre 10 ml/min y 90 ml/min.
- Motor : 12V. DC.
- Caudal :> 80 ml/min.
- Tamaño : Longitud Total: aprox. 6,5 cm/2; Diámetro lateral: aprox. 2,7 cm.

2.5 Lógica Difusa

El control por lógica difusa o control difuso, permite un control más preciso en comparación a otros, al utilizar variables lingüísticas y funciones de membresía, en lugar de un modelo matemático. Esto se logra mediante un sistema de inferencia basado en reglas que relacionan las entradas y salidas del sistema. La lógica difusa ofrece una amplia gama de posibilidades y se adapta mejor a las expresiones humanas, permitiendo una variedad de opciones y valores numéricos y lingüísticos. La comparación entre lógica difusa y lógica clásica es la asignación de valores y combinaciones, la lógica difusa permite asignar valores a variables lingüísticas a partir de funciones de membresía, facilitando la representación de situaciones imprecisas. Esto contrasta con la lógica clásica, que utiliza valores discretos como 0 y 1. Este proceso de desarrollo se puede subdividir en: fuzzificación, métodos de inferencia y defuzzificación ver figura 16.

Figura 16

Diagrama de controlador difuso



Pre - procesamiento. En el primer paso del desarrollo del controlador difuso es el de la definición de las variables de entrada (error de temperatura, error de voltaje, valor deseado, etc.), estas variables de entrada es necesaria definirlas como variables lingüísticas definidas en un universo discurso que son los que definimos según se requiera.

Fuzzificación. En el proceso de la fuzzificación se convierte un valor convencional de una variable que son ingresados al controlador en valores difusos también conocidos como variables lingüísticas. Una variable lingüística se utiliza para representar situaciones en las que los valores no son numéricos, sino expresados en términos de palabras o etiquetas. Estas variables son comunes en sistemas de lógica difusa y pueden describir conceptos como temperatura (fría, templada, caliente), velocidad (lenta, media, rápida) o niveles de riesgo (bajo, medio, alto).

El escalón inicial para el desarrollo de este proceso consiste en adquirir lo valores de las entradas y establecer el grado en el que se asocian uno por uno los conjuntos difusos correspondientes, es decir, para desarrollar esta acción es necesario haber establecido anteriormente las funciones de pertenencia asociadas a las variables.

Métodos de inferencia. Los métodos o mecanismos de inferencia, también conocidas como las funciones de pertenencia, simbolizan las coordenadas difusas asociadas al atributo en sí, estas son funciones continuas que pueden ser de los siguientes tipos:

- Exponenciales: También conocidas como de distribución normal, no representan discontinuidad en la derivada y muestran un comportamiento aproximado al deseado.
- Triangulares y trapezoidales: Ambas funciones son representadas en una manera discontinua en la primera derivada que hereda la acción de control, es decir son lineales por tramos.

- Polinómicas: Son funciones con una similitud a las funciones de densidad normal y son generalmente sencillas de calcular.

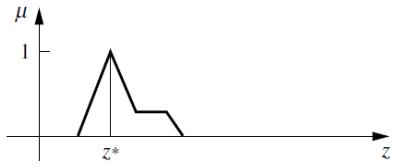
Defuzzificación. El proceso contrario a la fuzzificación es la defuzzificación que convierte un grupo de variables lingüísticas en sus equivalentes niveles de pertenencia, en otras palabras, es el proceso mediante el cual un sistema de lógica difusa convierte una salida difusa en un valor numérico preciso. Es el paso final en un sistema de control difuso, permitiendo obtener una respuesta concreta después de haber procesado reglas borrosas.

En sistemas de control, la entrada se fuzzifica en conjuntos difusos, se procesan reglas difusas y finalmente se requiere un valor numérico que pueda ser aplicado a un actuador o sistema físico (por ejemplo, ajustar una válvula, modificar la velocidad de un motor, o dosificar un corrector de pH en hidroponía). Son diferentes los métodos usados para la defuzzificación, métodos tales como:

El criterio máximo o máximo central. Selecciona el punto en el que la función deducida alcanza su nivel máximo de entre todas las reglas inferidas (figura 17). La expresión algebraica de este método es el siguiente: $\mu_{\tilde{C}}(z^*) \geq \mu_{\tilde{C}}(z)$

Figura 17

Método del criterio máximo



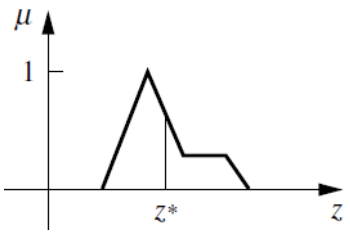
Nota. La figura muestra la representación gráfica del método del criterio máximo, donde Z* es el valor defuzzificado. (Ross, 2010).

Centro de gravedad o centroide. Se escoge el punto medio a partir de la combinación de cada una de las reglas deducidas. La expresión algebraica de este método es el siguiente:

$$z^* = \frac{\int \mu_{\tilde{C}}(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_{\tilde{C}}(z) \, dz}$$

Figura 18

Método del centro de gravedad



Nota. La figura muestra la representación gráfica del método de defuzzificación, donde Z* es el valor defuzzificado. (Ross, 2010).

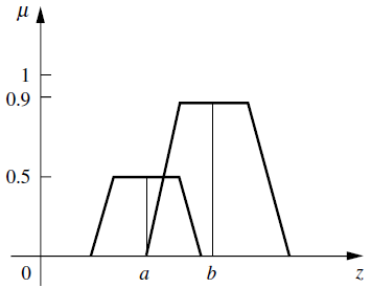
Método del promedio ponderado. La expresión algebraica de este modelo es:

$$z^* = \frac{\sum \mu_{\tilde{C}}(\bar{z}) \cdot \bar{z}}{\sum \mu_{\tilde{C}}(\bar{z})}$$

Dónde, podemos ver la suma algebraica y donde $\bar{z}$ es el centroide de cada función de membresía simétrica. Esto lo podemos ver en la figura 19. El método del promedio ponderado se forma ponderando a cada una de las funciones de membresía en la salida por su respectivo valor máximo de membresía. Como ejemplo, vemos las dos funciones en la figura siguiente:

Figura 19

Método del promedio ponderado



Nota. La figura muestra la representación gráfica del método de defuzzificación. (Ross, 2010).

Donde, como resultado tendremos la siguiente forma general para el valor defuzzificado:

$$z^* = \frac{a(0.5) + b(0.9)}{0.5 + 0.9}$$

2.5.1 Controlador difuso

El controlador está formado por reglas lingüísticas, cuyas condiciones corresponden a posibles valores de las variables de entrada y que determinan el nivel de variación en la acción de control que se expresa inicialmente mediante términos lingüísticos, los cuales representan diferentes grados de ajuste o respuesta. Posteriormente, estos valores lingüísticos se convierten en un valor determinista mediante un proceso de defuzzificación, permitiendo su aplicación en el sistema de control.

Además, para evaluar el impacto de cada regla en la acción que ejecuta el controlador, es fundamental cuantificar su valor. Esto se puede lograr mediante el desarrollo de una matriz de inferencia o de valoración, la cual permite asignar pesos o grados de influencia a cada regla dentro del sistema de control. Esto concluye con cada una de las reglas en un conjunto difuso al que se le determinó adecuadamente un peso, de tal modo que el resultado obtenido por la utilización de la

totalidad de las reglas que constituyen otro conjunto difuso, cada una con sus correspondientes funciones de pertenencia. (Wang,1997)

Los modelos de controladores difusos se tienen:

- Mamdani, Takagi-Sugeno-Kang y Tsukamoto entre los más conocidos.

La diferencia que mantienen estos tipos de controlador difuso es en la consecuencia de las reglas: en el primero, la consecuencia es un conjunto difuso, para el segundo es una función lineal de las entradas y para el tercero es una función monótona a partir de los niveles de activación de las reglas. El modelo Mamdani es sencillo de implementar ya que emplea etiquetas lingüísticas en el consecuente, también es importante considerar que para el diseño de un controlador Takagi-Sugeno se necesita un conocimiento cuantitativo de la planta, en cambio para el tipo Mamdani se necesita un conocimiento mucho más empírico. (Wang,1997).

2.6 IoT

En la actualidad, la arquitectura de la información basada en Internet, conocida como IoT (Internet de las Cosas), facilita el proceso de intercambio de bienes y servicios entre todos los dispositivos, equipos y objetos conectados a la red. La IoT se refiere a la interconexión de objetos cotidianos, los cuales suelen contar con algún nivel de inteligencia.

Internet también funciona como una plataforma para dispositivos que se comunican electrónicamente y comparten información con su entorno. De esta manera, la IoT representa una evolución de Internet al incorporar una interconectividad más amplia, una mejor percepción de la información y servicios inteligentes más avanzados.

Tradicionalmente, Internet se utilizaba principalmente para protocolos de comunicación orientados a aplicaciones muy conocidas tales como HTTP (Protocolo de Transferencia de Hipertexto) y SMTP (Protocolo Simple de Transferencia de Correo). No obstante, en la actualidad,

una gran cantidad de dispositivos algo inteligentes interactúan entre sí y con otros sistemas de control, dando lugar al concepto de M2M (comunicación de máquina a máquina).

2.6.1 Tipos de plataformas IoT

Actualmente, existen múltiples plataformas IoT en el mercado, cada una con características específicas. A continuación, se mencionan algunas de ellas:

ThingSpeak. Es una plataforma intuitiva y adecuada para quienes están comenzando en el mundo del IoT. Para utilizarla, es necesario contar con una cuenta en MathWorks, ya que Matlab es su propietaria. Dispone de amplia documentación en línea y es compatible con diversos dispositivos, incluido el ESP32.

Blynk. Se caracteriza por su facilidad de uso y versatilidad, adecuada tanto para principiantes como para proyectos más avanzados. Es una plataforma de código abierto (open source) y también ofrece una opción de pago. Su documentación es más extensa en comparación con otras plataformas y es compatible con múltiples dispositivos, incluido el ESP32.

Carriots. Está más enfocada en soluciones empresariales que en el desarrollo de prototipos. Su documentación es más limitada en comparación con otras plataformas, pero sigue siendo compatible con diversos dispositivos, incluido el ESP32.

Spark. Es una opción sencilla para iniciarse en el IoT, con una versión de código abierto y otra de pago. Cuenta con una documentación extensa y es compatible con ciertos dispositivos de hardware.

Arduino IoT Cloud. Lanzada recientemente por Arduino, es una plataforma de código abierto en crecimiento. Aunque su documentación aún es limitada, está en constante expansión, convirtiéndose en una alternativa interesante para proyectos basados en Arduino.

Capítulo III: Requerimiento y Especificaciones del Equipamiento

3.1 Equipamiento Para la Calibración

Para la verificación de la exactitud y confiabilidad de las mediciones tanto del pH como de la electro-conductividad, se necesitaron calibrar ambos parámetros con soluciones estándar, soluciones que tienen un valor ya definido, estas soluciones también son conocidas como buffers.

Para la calibración del pH se usaron 3 buffers, estas son de la empresa internacional Hanna Instruments, soluciones que tienen valores de 10.01, 7.007 y 4.01 de pH. La figura 20 nos muestra las soluciones usadas para la calibración de nuestro sensor.

Figura 20

Soluciones buffer de pH

Nota: La figura muestra las soluciones de pH 4.01, 7.007 y 10.01 respectivamente, para calibración del sensor de pH.

Para la calibración de la electro-conductividad se usaron 2 buffers, estas son de una empresa internacional China, soluciones que tienen valores de 1.413mS/cm y 12.88mS/cm. La figura 7 nos muestra las soluciones usadas para la calibración de nuestro sensor de electro-conductividad.

Figura 21

Soluciones buffer de electro-conductividad

Nota. La figura muestra las soluciones de 12.88 mS/cm y 1413 uS/cm para calibración del sensor de electro-conductividad.

Para aumentar y/o disminuir el valor del pH y de la electro-conductividad según sea necesario por parte del sistema de control y así mantener el valor dentro de los rangos aceptables definidos para el sistema hidropónico, se usaron hidróxido de potasio para aumentar el valor del pH y ácido fosfórico para disminuirlo los que se visualizan en la figura 22.

Figura 22

Hidróxido de potasio y ácido fosfórico

Nota. La figura muestra hidróxido de potasio y ácido fosfórico para aumentar y disminuir el pH respectivamente.

Finalmente, los instrumentos que nos garanticen la lectura correcta de los valores de pH y electro-conductividad son instrumentos certificados por empresas internacionales dedicadas a este rubro. Dichos instrumentos fueron usados para cotejar los valores medidos por nuestros sensores después de las calibraciones con los buffers, para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema completo, dichos instrumentos los observamos en la figura 23.

Figura 23

Instrumentos de medición de pH y electro-conductividad

Nota. La figura muestra los instrumentos de medición de pH y electro-conductividad respectivamente.

El medidor de electro-conductividad es el modelo TDS-3 cuyas características son:

- Rango de medición : 0- 9990 ppm.
- Exactitud : +/-2%.
- Tamaño : 2x 1.5v.
- Peso : 40g.

El medidor de pH es modelo de ATC

- Rango de medición : 0 – 14. pH.
- Resolución : 0.1.
- Exactitud : +/-0.1(20°C), +/-0.2
- Temperatura de funcionamiento : 0 – 50 °C.

3.2 Selección de Componentes

En esta sección mostramos los componentes importantes seleccionados para el desarrollo del trabajo. En la tabla 8, mostramos la comparativa de los microcontroladores y microprocesadores vistos en la recopilación de datos, teniendo en cuenta el precio, velocidad de procesamiento y la factibilidad de uso con el internet. Parámetros necesarios para el desarrollo del presente trabajo.

Tabla 8

Comparativa de microcontroladores y microprocesadores

Microcontrolador/ microprocesador	Memoria RAM	Precio (dólares)	GPIOs	USO IoT
ESP32	520kB	4-10	Hasta 36	si
Arduino Uno	2kB	10-20	14 digitales/6 analógicas	no
Raspberry Pi	2-8 GB	35-75	26 (Dependiendo el modelo)	si

Nota: La tabla muestra la comparativa entre microcontroladores y microprocesadores evaluados en la parte teórica.

En el mercado existen diversos tipos de microcontroladores que pueden trabajar como el cerebro de nuestro sistema hidropónico de control y monitoreo, pero en un análisis de mercado y de factibilidad económica para que nuestro trabajo final no resulte sumamente costoso, se decidió trabajar con el microcontrolador ESP32 ya que se tiene una amplia experiencia en el manejo de este dispositivo en proyectos anteriores, además, que es sumamente versátil para el uso con diferentes tipos de sensores, es de bajo costo y sobre todo tiene conectividad web, la cual es un factor ponderable para la elección y uso de este dispositivo.

A continuación, en la tabla 9, se muestra la comparativa de los sensores de pH vistos en la recopilación de información, teniendo en cuenta el precio, la compatibilidad de uso con los microcontroladores y la exactitud. Parámetros necesarios para el desarrollo del presente trabajo.

Tabla 9

Comparativa de sensores de pH

Sensor	Precio	Compatibilidad con microcontrolador	Tipo	Rango de medición	Temperatura de trabajo	Exactitud
S-ph-01 modbus	Medio	si	Analógico	0-14	-40 a 80°C	+/-0.05
Orbipac CPF81D	Alto	No	Digital	0-14	0 a 110°C	+/-0.1
Ph-4502C	Bajo	si	Analógico	0-14	0 a 50°C	+/-0.1

Nota. La tabla muestra la comparación de precio, compatibilidad con microcontroladores y la exactitud, de los sensores revisados en este trabajo.

- Teniendo en cuenta la tabla comparativa 9, se elegirá el sensor de pH -4502C por su bajo costo y por sus características que son suficientemente útiles al proyecto, además, se quiere

verifica la factibilidad de trabajar con este tipo de sensores y las condiciones que se necesitan para un funcionamiento adecuado.

A continuación, en la tabla 10, mostramos la comparativa de los sensores de electro-conductividad vistos en este trabajo, teniendo en cuenta el precio, la compatibilidad de uso con los microcontroladores y la exactitud. Parámetros necesarios para el desarrollo del presente trabajo.

Tabla 10

Comparación de los sensores de conductividad eléctrica

Sensor	Precio	Compatibilidad con microcontrolador	Tipo	Rango de medición	Temperatura de trabajo	Exactitud
TDS S-EC-01	Medio	si	Analógico	0 a 20mS/cm	-40 a 85°C	3%
SUP-TDS7001	Alto	no	Analógico	0.1 a 200us/cm	0 a 50°C	1%
Dfrobot Gravity	Bajo	si	Analógico	0 a 15.6mS/cm	0 a 50°C	10%

Nota. La tabla muestra la comparación de precio, compatibilidad con microcontroladores y la exactitud, de los sensores revisados en este trabajo.

Teniendo en cuenta la tabla anterior donde comparamos los sensores de electro-conductividad, se eligió el sensor DFRobot Gravity por ser el más económico del mercado, al igual que para el pH, y así evaluar la factibilidad de usar este tipo de sensores en este tipo de trabajos además que, como se pueden ver en sus características, estas son suficientes para el cumplimiento del trabajo.

Capítulo IV: Diseño e Implementación

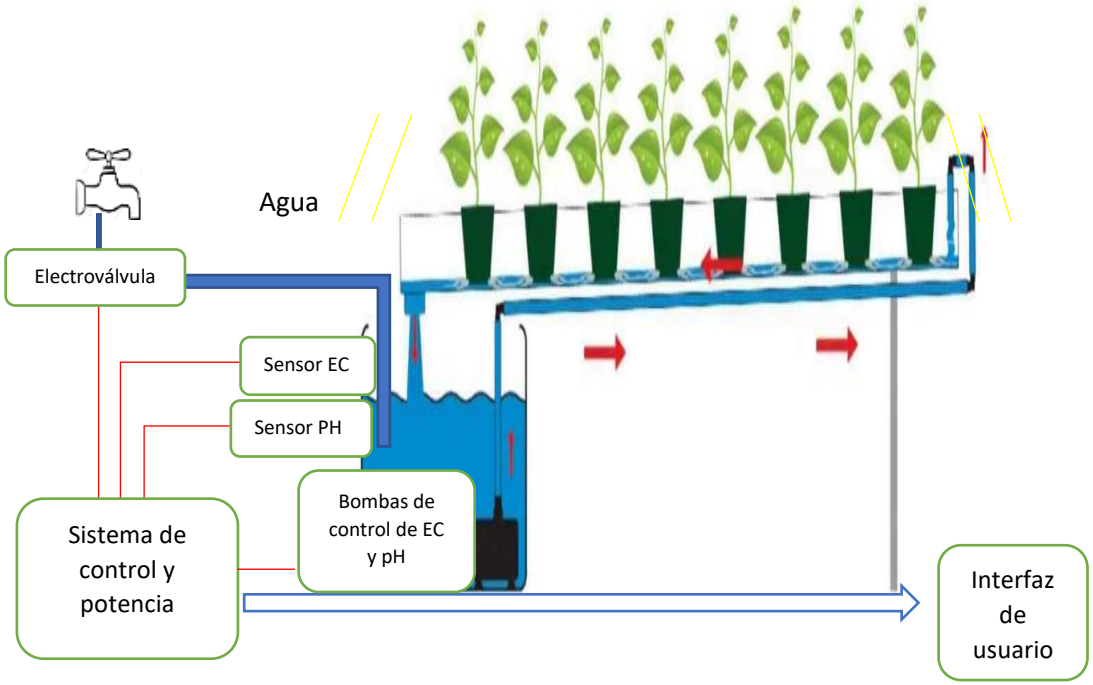
4.1 Diseño del Sistema Hidropónico

En este capítulo presentaremos las distintas metodologías que se emplearan en el desarrollo para las diferentes partes que componen en su totalidad el sistema de control y monitoreo de un sistema hidropónico. Se muestra los diferentes instrumentos a usarse en el proyecto, la realización del código de programación, los sensores a utilizarse, el microcontrolador elegido, etc.

A continuación, se muestra en la figura 24 el diseño de la estructura del sistema hidropónico, como se dispuso la colocación de los diferentes sensores y los actuadores en general.

Figura 24

Diseño del sistema hidropónico



Nota. La figura muestra el diseño para nuestro sistema hidropónico.

Control de pH el cual contará de los siguientes elementos:

- Bomba peristáltica de sustancia ácida para aumentar el pH.
- Bomba peristáltica de sustancia básica para disminuir el pH.

A continuación, en la tabla 11, se detallan los parámetros técnicos recomendados para la producción de hortalizas de hoja como la lechuga, dichos parámetros fueron tomados del marco teórico de nuestra investigación.

Tabla 11

Rango de valores para el sistema hidropónico

Rango de valores	
pH	Entre 5.6 y 6.2
Electro-conductividad	Entre 1,5 a 2.2 mS/cm.

Nota. La tabla muestra el rango de valores de pH y EC considerados para el sistema hidropónico.

Para el control y monitoreo del pH es necesario 4 elementos fundamentales que son el microcontrolador, que es el encargado de la toma de decisiones del sistema en conjunto, los sensores, que son los encargados de la toma de datos, en muchos casos se necesita de un módulo conversor de datos entre el sensor y el microcontrolador, el actuador, que es el que genera la respuesta por parte del sistema que es controlado por el microcontrolador para tener, es este caso, el valor deseado de pH en el agua y por último una visualización de resultados, que pueden ser desde una pantalla led, un celular, un monitor, etc.

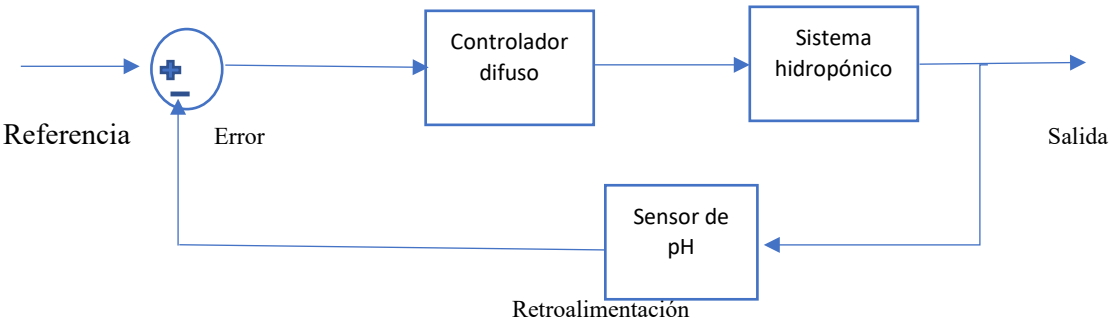
4.2 Control de pH

El controlador utilizado en el presente trabajo fue el controlador difuso donde su diagrama la observamos en la figura 25. Este controlador sirve para activar y desactivar los relés que gobiernan el funcionamiento de las bombas que, para el caso del pH de la sustancia nutritiva,

aumenta el valor con la activación del relé que hace accionar la bomba peristáltica que dispensa sustancia básica y disminuye el valor del pH con la activación del relé que hace accionar la bomba peristáltica que dispensa sustancia ácida.

Figura 25

Diagrama de control del pH del sistema hidropónico



Nota. La figura muestra el diagrama de control del sistema hidropónico para el control del nivel del pH.

4.2.1 Calibración sensor de pH

Para tener un nivel de pH adecuado en el agua es necesaria subir o bajar el pH según se requiera, y para ello es necesario:

- Agregar agua + solución ácida para disminuir el pH.
- Agregar agua + solución básica para aumentar el pH del agua.

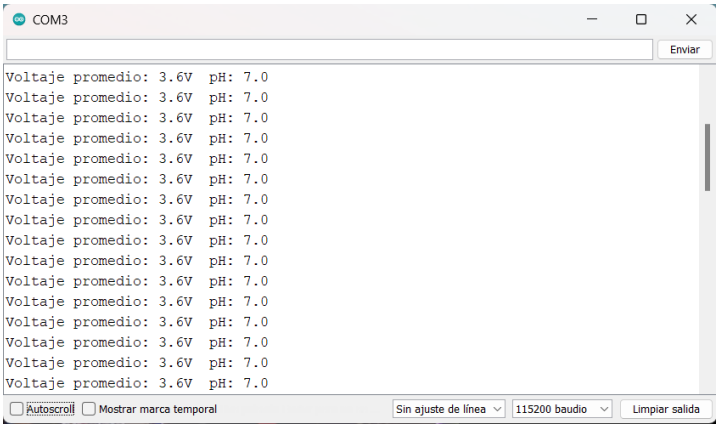
Un punto importante en el uso de sensores de pH es la de calibración, los cuales que sin los instrumentos y/o materiales adecuados, podemos obtener resultados erróneos en la obtención de datos. Por lo que en nuestro caso se optó la calibración con muestras conocidas, para tener nuestro sensor calibrado.

Para la correcta calibración del sensor de pH es necesario obtener un valor de voltaje el cual pueda ser usado por nuestro controlador, este valor se obtuvo usando muestras estándar con un valor de pH conocido. Colocamos el sensor de pH a cada muestra y cada una de ellas nos da un

valor de voltaje correspondiente a cada una de las muestras de referencia. En la figura 26 tenemos el valor de voltaje que se obtuvo con el software de Arduino con la solución de pH 7.007 y en la tabla 12 tenemos los valores correspondientes en voltaje de cada una de las muestras conocidas de pH.

Figura 26

Valor promedio de voltaje para la solución con pH 7



Nota. La figura muestra los valores de voltaje obtenido con la solución pH 7.007 para calibración del sensor de pH.

Tabla 12

Valores de voltaje obtenidos para cada solución de pH

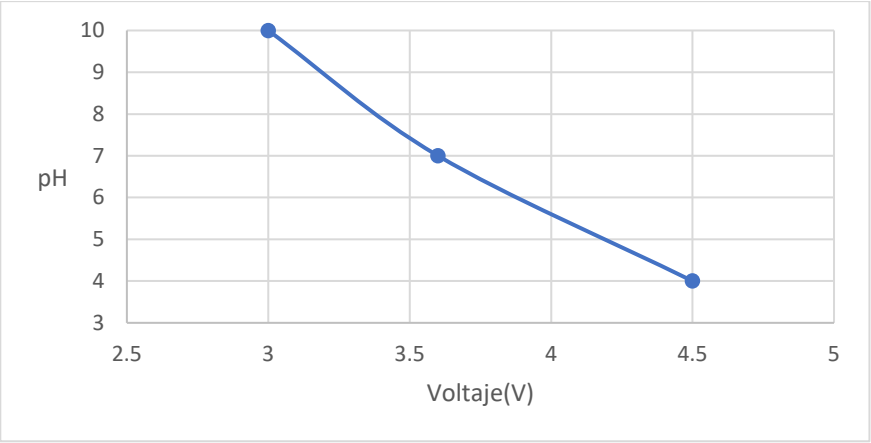
Solución Buffer usada	Valor obtenido (Voltaje)
pH 4	4.5 v
pH 7	3.6 v
pH 10	3 v

Nota. La tabla muestra los valores de voltaje obtenidos para cada solución, con los cuales se realizará la calibración del sensor.

Con los valores obtenidos de la tabla anterior podemos obtener la expresión matemática la cual gobierne estos valores, es decir, la expresión matemática para nuestro sensor de pH. Usando estos valores y un software podemos analizar gráficamente los datos en la figura 27.

Figura 27

Relación Voltaje – pH



Nota. La figura muestra la relación pH – voltaje de las soluciones de pH 4.01, 7.007 y 10.01 respectivamente, para calibración del sensor de pH.

Analizando la distribución de datos de la figura 27 podemos ver que se aproximan a una forma exponencial, por lo que procedemos a realizar una regresión exponencial para la obtención de la expresión matemática que requerimos para la calibración del sensor. Adicionalmente se hizo a manera de prueba una regresión lineal ambas regresiones se muestran a continuación:

Asumimos que los datos tienen la siguiente relación de la forma:

$$y(1) = a * e^{b*x}$$

Donde:

- y es la variable dependiente, x es la variable independiente.
- $a\ y\ b$ son los parámetros a determinar.

Para la realización de regresión exponencial de manera matemática seguiremos los siguientes pasos:

Transformación logarítmica de la ecuación exponencial. Se aplica el algoritmo natural a ambos lados de la ecuación:

$$\ln(y) = \ln(y = a * e^{b*x})$$

La ecuación se puede simplificar a: $\ln(y) = \ln(a) + b * x$

Esto convierte la relación exponencial original en una relación lineal entre $\ln(y)$ y x. Ahora podemos usar técnicas de regresión lineal para estimar los parámetros $\ln(a)$, b

Reescribir la ecuación como una regresión lineal. Es decir, si definimos $z = \ln(y)$, la ecuación se vuelve: $z = \ln(a) + b * x$

Lo que es una ecuación de una recta: $z = m * x + c$

Donde:

- m = b (la pendiente), $c = \ln(a)$(la intersección)

Calcular los coeficientes. Utiliza la fórmula de regresión lineal para calcular los coeficientes m y c. Las formulas de regresión lineal simple para m(la pendiente y c (la intersección) son:

$$m = \frac{n \cdot \sum(x_i \cdot z_i) - \sum x_i \cdot \sum z_i}{n \cdot \sum(x_i^2) - (\sum x_i)^2}$$

$$c = \frac{\sum z_i \cdot \sum(x_i^2) - \sum(x_i \cdot z_i) \cdot \sum x_i}{n \cdot \sum(x_i^2) - (\sum x_i)^2}$$

Donde:

- x_i son los valores de x.
- $z_i = \ln(y_i)$ son los valores transformados de la variable dependiente.
- n = número de datos.

Procedemos al cálculo de la ecuación exponencial con nuestros datos:

	x	y	x*y	z	x*z	x*x
	Voltaje	**pH**		**Ln(y)**		
	4.5	4	18	1.386294	6.238325	20.25
	3.6	7	25.2	1.94591	7.005277	12.96
	3	10	30	2.302585	6.907755	9
Sumatoria→	11.1	21	73.2	5.63479	20.15136	42.21

$$m = \frac{3(20.15136) - (11.1)(5.63479)}{3(42.21) - 11.1^2}$$

$$m = 0.61172$$

$$c = \frac{5.63479(42.21) - (20.15136)(11.1)}{3(42.21) - 11.1^2}$$

c =4.14164

Determinar los parámetros a y b. Una vez definido m (que es el valor de b) y c (que es ln(a)), se procede a determinar los valores de la ecuación exponencial: $b = m$, $a = e^c$.

Tenemos asi la ecuación de la regresion exponencial para la obtención del pH :

$$y(1) = \mathrm{e}^{4.14164} * \mathrm{e}^{-0.61172x}$$

$$y(1) = 62.90527 * \mathrm{e}^{-0.61172x}$$

De manera similar se realizó una regresión lineal para ver cuál de estas dos regresiones genera la mejor aproximación para la representación de los valores de la relación pH – voltaje de las soluciones pH 4.01, 7.007 y 10.01 respectivamente, para calibración del sensor de pH.

$y(2) = ax+b$

Donde:

- $y(2)$: conductividad eléctrica
- x: voltaje
- a: pendiente
- b: intersección

$$a = \frac{n\sum(xy) - \sum x \sum y}{n\sum(x^2) - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum y - a\sum x}{n}$$

$a = \frac{3(73.2)-(11.1)(21)}{3(42.21)-11.1^2}$ → a = -3.95

$b = \frac{21+3.95(11.1)}{3}$ → $b = 21.615$

Tenemos asi la ecuación de la regresión lineal para la obtención del pH:

$y(2) = -3.95+21.615*x$

A continuación, mostramos la comparación de ambas regresiones obtenidas:

Tabla 13

Comparativa de la regresión lineal y exponencial

X Voltaje[v]	y(1) Reg. Exp.	y(2) Reg. Lineal	Valor referencia	Error y(1)	Error y(2)
3	10.09	9.76	10	0.09	0.24
3.6	6.99	7.39	7	0.01	0.39
4.5	4.04	3.84	4	0.04	0.16

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos por ambas regresiones.

Como conclusión, podemos ver en la tabla 13 que los resultados de ambas regresiones se aproximan al valor referencial de pH deseado, en este caso el valor de referencia es el valor de los buffers que se muestran en la figura 20. En comparativa, tenemos que el error para la regresión exponencial es menor al error obtenido en la regresión lineal, por lo que la ecuación Y(1) será la utilizada para la obtención de los valores de pH en el sistema hidropónico.

4.2.2 Correccion del pH según la temperatura

Para el caso de la correccion de las mediciones de la solución nutritiva se decidió usar un factor de corrección que haga variar la medición del pH según varie la temperatura, este factor lo podemos hallar mediante la siguiente relación:

pH(compensado)=pH medido + (temperatura actual - 25) * factor de corrección

Donde la temperatura actual es determinada por el sensor DS18B20 instalada en el sistema hidropónico y tomamos de referencia la temperatura de 25 °C puesto que esta es la temperatura estandar vista ya en las bases teóricas.(Westlab, 2015).

Para hallar el factor de correccion se usó el buffer de pH 7, para este proceso se tomó la medición de la muestra a unos 14 °C, teniendo un pH medido de 6.81. Con todas estas mediciones se procede a hallar el factor de correccion.

$$7=7.19+(14 - 25)*\text{factor de correción}$$

$$\text{Factor de corrección} = 0.017$$

Con este factor se logra compensar el valor medido del pH ante las variaciones de la temperatura de la sustancia nutritiva del sistema hidropónico, por lo que tenemos la ecuación final para la compensacion de temperatura para el cálculo del pH.

$$pH(\text{compensado})=pH\ \text{medido} + (\text{temperatura actual} - 25) *0.017$$

4.2.3 Controlador por logica difusa del pH

Para el desarrollo del controlador del pH mediante lógica difusa de la solución nutritiva de un sistema hidropónico es necesaria primero generar las funciones de membresía para la fuzzificación en el controlador. En la tabla 14 se muestra los rangos de pH que se usaron para el control difuso a base de trabajos previos:

Tabla 14

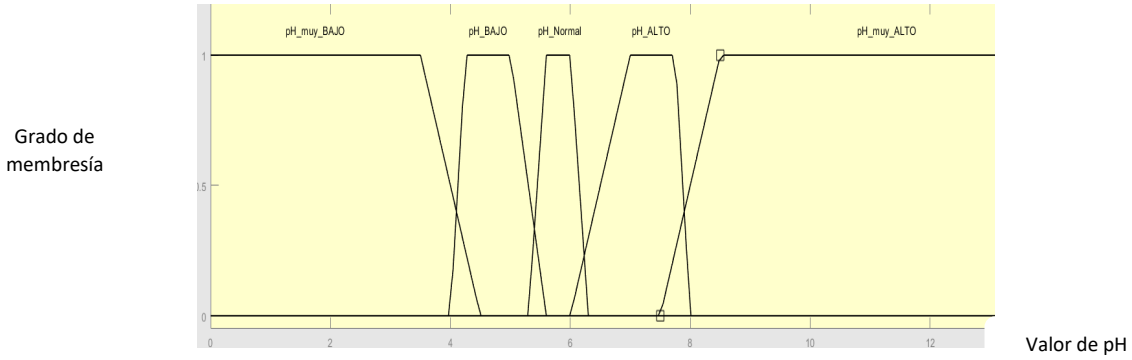
Tabla de rangos de pH

Nivel de pH	Rango
Muy bajo	0 - 4.5
bajo	4.25 – 5.75
Normal	5.6 – 6.2
Alto	6.25 – 7.75
Muy alto	7.5 - 14

Teniendo la base de trabajos previos revisados en la parte teórica y realizando ajustes en base a pruebas y errores, se desarrolló las funciones de membresía de entrada para el control del pH, las cuales fueron desarrolladas para su simulación y evaluación en el software MatLab. Se muestran en la figura 28, donde en el eje *Y* se tiene el grado de membresía y en el eje *X* el valor de pH entre 0 y 14, en la tabla 15 se tienen los valores de dichas funciones de entrada.

Figura 28

Funciones de membresía de entrada para el control del pH



Nota. La figura muestra las funciones de membresía de entrada en el software MatLab para el control del pH.

Tabla 15

Valores de las funciones de membresía para el pH

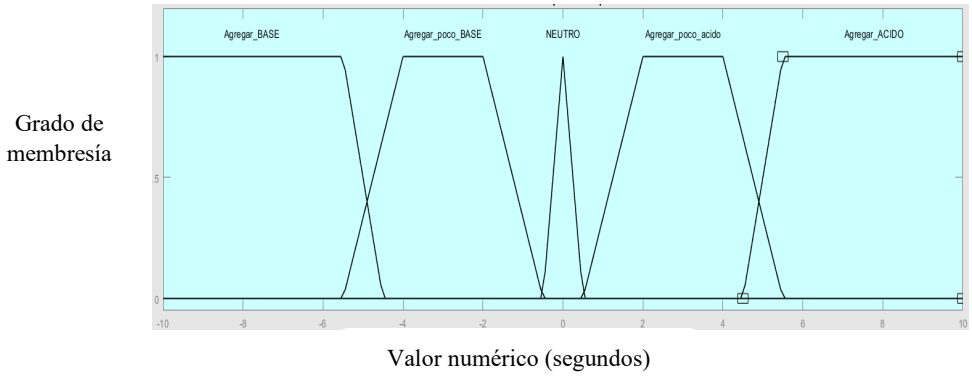
Nivel de pH	Rango (valor pH)
pH muy bajo	[0 0 3.5 4.5]
pH bajo	[4 4.25 5 5.6]
pH Normal	[5.2 5.6 6 6.2]
pH Alto	[6 7 7.75 8]
pH muy alto	[7.5 8.5 14 14]

Nota. La tabla muestra los rangos definidos para las funciones de membresía de entrada utilizados en el control difuso de pH.

Las funciones de membresía de salida se muestran en la figura 29, donde en el eje *Y* se tienen el grado de membresía de las funciones y en el eje *X* valores numéricos los cuales representan el tiempo de activación de las válvulas peristálticas, tanto para el incremento del pH como para el decremento y en la tabla 16 se tienen los valores de dichas funciones de salida. Con estas funciones de membresía tanto de la entrada como de la salida procedemos a la elaboración de las reglas difusas que se pueden ver en la figura 30.

Figura 29

Funciones de membresía de salida para el control del pH



Nota. Se muestra las funciones de membresía de salida en el software MatLab para el pH.

Tabla 16

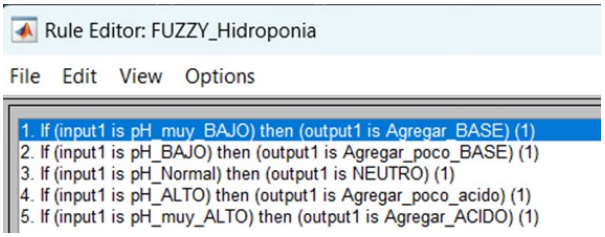
Valores de funciones de membresía del pH para la salida

Nivel de pH	Rango
Agregar base	[-10 -10 -5.5 -4.5]
Agregar poca base	[-5.5 -4 -2 -0.5]
Neutro	[-0.5 0 0 0.5]
Agregar poco acido	[0.5 2 4 5.5]
Agregar ácido	[4.5 5.5 10 10]

Nota. La tabla muestra los rangos definidos para las funciones de membresía de salida utilizados en el control difuso de pH.

Figura 30

Reglas difusas para el control del pH

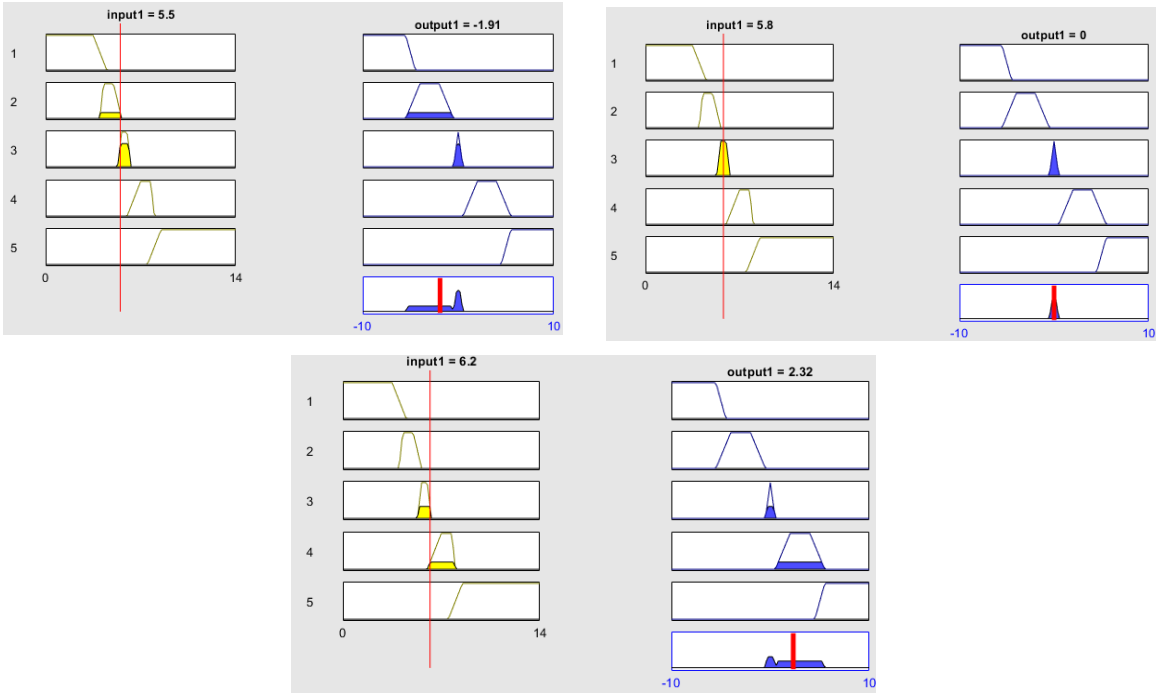


Nota. La figura muestra las reglas difusas en el software MatLab para el control del pH.

Existen diversos métodos de inferencia dentro del control difuso, en este trabajo se empleó el método Mamdani por la facilidad de su implementación. Finalmente, para la defuzzificación y mediante el Toolbox de Matlab se obtuvieron los resultados que se visualizan en la figura 31, utilizando el método del centroide.

Figura 31

Salida del controlador de pH



Nota. Se muestra los Resultados obtenidos mediante el Toolbox de Matlab para el control de pH.

Una vez terminado el proceso de diseño y validación del controlador mediante el software MatLab estas funciones de membresía son llevadas al ide de Arduino para la elaboración del código para el microcontrolador.

La salida del microcontrolador activa los relés que estos a su vez activan las bombas peristálticas encargadas de elevar el nivel de pH (5 gramos de hidróxido de potasio diluido en 1 litro de agua de caño) o disminuirlo (10 mL. de ácido fosfórico diluidos en 1 litro de agua).

El controlador difuso es el encargado de controlar el tiempo de activación de los relés, estos tiempos de activación dependen del valor de entrada determinada por el sensor de pH y cuya salida lo define el controlador difuso, el cual brinda una salida proporcional al error medido; esta salida es "traducida" a valores de tiempo, el cual se ajustó en la programación realizada en el código, dicho salida se muestran en la tabla 17.

Tabla 17

Comportamiento de controlador difuso

pH (medido por el sensor)	Salida del controlador	Bomba Acido	Bomba Alcalino	Tiempo de activación (Segundos)
6.0	0.00	Desactivada	Desactivada	0.0
5.3	-1.03	Activada	Desactivada	10.3
7	3.00	Desactivada	Activada	30.0

Nota. La tabla muestra el funcionamiento del controlador difuso implementado.

Como se puede ver en la tabla 17, la salida del controlador difuso implementada genera números relacionados a las funciones de membresía de salida, estos valores dependen directamente del valor medido por el sensor de pH, si el valor está dentro del rango óptimo (entre 5.6 y 6.2) este dará una salida de 0.0, lo cual indica que ninguna bomba sea activada, si se encuentra por debajo

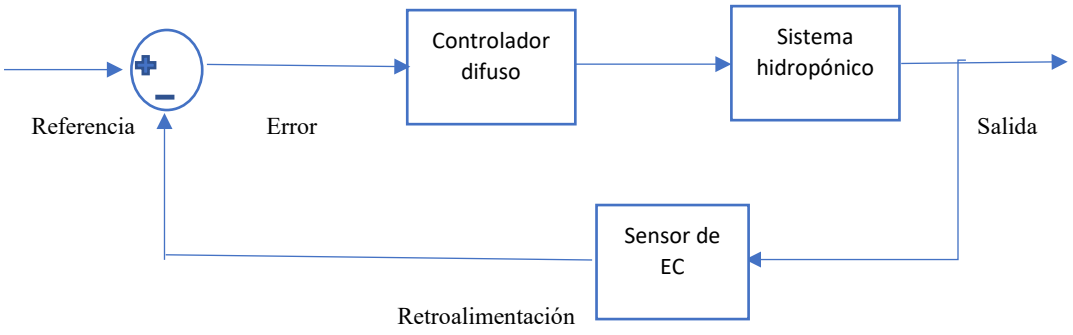
del rango, la salida del controlador brinda un valor negativo y si es mayor al rango se obtendrá un valor positivo correlacionado a la diferencia entre el valor medido y el valor del rango óptimo, si el valor es negativo se activa la bomba de ácido y de manera similar si el valor de la salida del controlador es positivo se activa la bomba alcalina por el tiempo relacionado al valor que se obtiene en la salida del controlador (en segundos) en ambos casos.

4.3 Control de Conductividad Eléctrica

Para el desarrollo del control de la conductividad eléctrica, se acciona dos relés, para activar las bombas peristálticas que dispensan solución nutritiva A y B, que en conjuntos hacen que se aumente la electro-conductividad de la sustancia nutritiva y para la disminución de la electro-conductividad se activa un tercer relé para activar la electroválvula que hace ingresar agua pura a la sustancia nutritiva. En la figura 32 podemos observar el diagrama de control de la electro-conductividad.

Figura 32

Diagrama de control de EC del sistema hidropónico



Nota. La figura muestra el diagrama de control del sistema hidropónico para la electro-conductividad.

4.3.1 Calibración del sensor de conductividad eléctrica

El control de la conductividad eléctrica o electro-conductividad (EC) contará de los siguientes elementos:

- Bomba peristáltica de agua para disminuir la EC.
- Bomba peristáltica de sustancia nutritiva combinada (Sustancia nutritiva A y sustancia nutritiva B) para aumentar la EC.

Para el sistema hidropónico se utilizaron los mili-siemens por centímetro (mS/cm) como unidad de medida. Debido a las diferencias individuales de las diferentes sondas TDS y la falta de compensación de temperatura integrada, el valor medido puede tener algunos errores. Por lo tanto, para obtener un valor de electro-conductividad más preciso, se requiere calibración antes de la medición. Además, se conectó un sensor de temperatura para compensar la temperatura y mejorar la precisión. Durante la calibración, se necesita una solución líquida de conductividad eléctrica conocida o valor TDS, como una solución tampón (buffer) estándar de 1413us/cm. El valor TDS también se puede medir con un medidor de electro-conductividad si no tiene una solución tampón estándar. Dichos buffers los podemos ver en la figura 33. El sensor utilizado es analógico por lo que la obtención del valor de la conductividad eléctrica depende netamente de la utilización del software y de la conversión analógica digital que se desarrolló

Figura 33

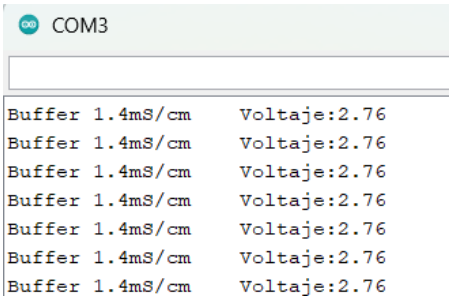
Pruebas de mediciones con soluciones conocidas

Nota. La figura muestra buffer de 1.41 y 12.88 mS/cm usados para la calibración del sensor de electro-conductividad.

Como opción para la calibración de nuestro sensor de electro-conductividad elegido, usaremos las muestras conocidas con diferentes valores de electro-conductividad y obtendremos el valor en voltaje necesario para realizar la calibración en el software (ver figura 34). Dicha obtención de voltaje se realizó con ayuda del ide de Arduino.

Figura 34

Voltaje correspondiente al buffer de EC



Nota. La figura muestra el uso del ide de Arduino para la obtención del voltaje correspondiente al buffer de electro-conductividad conocida de 1.4 mS/cm.

Tabla 18

Valores de TDS medidos con el medidor de EC y los valores en voltaje respectivos

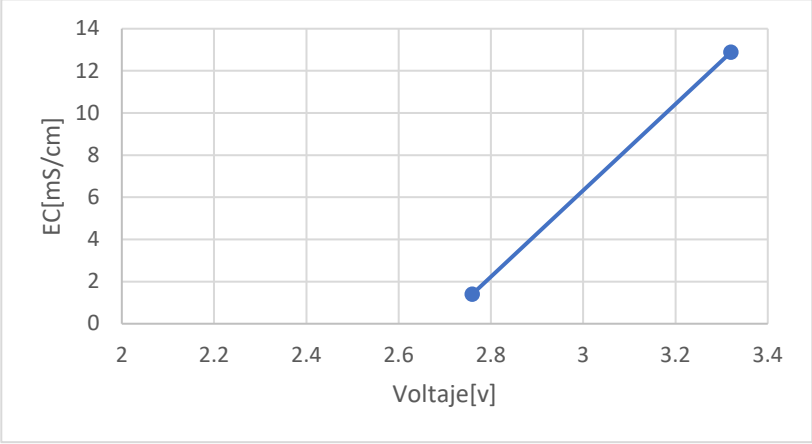
Muestras	Valor medidor de EC (mS/cm)	Valor Voltaje (V)
Vacío	0	0.02
Buffer 1	1.41	2.76
Buffer 2	12.88	3.33

Nota. La tabla muestra los valores de electro-conductividad de las muestras conocidas y el valor de voltaje correspondiente a cada medición.

De igual manera que con el sensor de pH, se determinó la ecuación característica para la calibración del sensor de electro-conductividad. Analizando la gráfica que se obtiene de la tabla 18 en la figura 35 podemos determinar dicha ecuación.

Figura 35

Relacion voltaje /electro-conductividad



Nota. La figura muestra la relacion voltaje y electro-conductividad obtenidas en las mediciones con las muestras conocidas.

Con la grafica obtenida con los valores de voltaje reajustados, podemos inferir que la ecuación de la curva tiene la forma: Y=βX+α .Donde los valores de Y son los valores de la electro-conductividad y X son los valores del voltaje obtenidos con el sensor, por lo que solo nos queda calcular los valres de α y β:

$$\left\{\begin{matrix} 1.41 = \beta(2.76) + \alpha \\ 12.88 = \beta(3.33) + \alpha \end{matrix}\right\}$$ del sistema de ecuaciones tenemos: α=-57.28 β=-21.26

tenemos asi la ecuación para la optención del valor de la electro-conductividad que usaremos en nuestro sistema.

Y=-21.26 X-57.28

4.3.2 Corrección de la EC según la temperatura

Para el caso de la correccion de las mediciones según varie la temperatura de la solución nutritiva se decidió usar un factor de corrección de temperatura para la electro-conductividad, el cual tambien es sugerido por parte del fabricante del sensor DFRobot Gravity para su uso adecuado cuya fórmula es:

Factor Correc. Temp. EC = 1+0.02(Temperatura actual−25)

Donde se asume, según la bibliografia investigada, (DFRobot,2023) una temperatura de 25°C como temperatura de referencia y un error porcentual de 2% de corrección por cada grado de diferencia. Con esto se corrige el voltaje medido en base a la temperatura actual, esta temperatura es medida por el sensor DS18B20 incorporado en el sistema hidropónico. Así el voltaje es compensado y por ende el valor de la electro-conductividad es compensada, si la solución nutritiva está más caliente que la temperatura de referencia, la conductividad aumenta y de la misma forma disminuye si la temperatura es menor. A continuación, se muestra la relación del voltaje compensado con el voltaje medido y el factor de corrección de temperatura.

Voltaje Compensado= Voltaje medido/ Factor Correc. Temp. EC

4.3.3 Controlador por lógica difusa de la EC

Para el desarrollo del controlador de la electro-conductividad de la solución mediante lógica difusa es necesaria primero generar las funciones de membresía para la fuzzificación en el controlador difuso. En la tabla 19 se tienen los rangos de la electro-conductividad que se usaron para el control difuso.

Tabla 19

Tabla de rangos de electro-conductividad para cada función

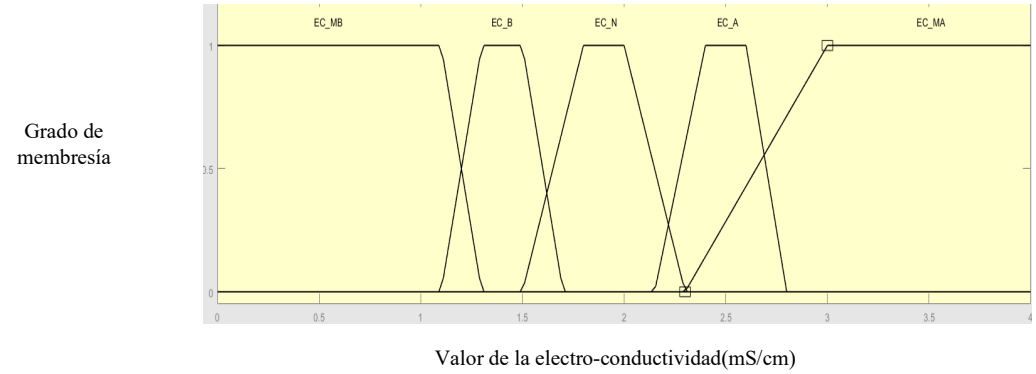
Nivel de EC	Rango(mS/cm)
Muy bajo	0 – 1.1
Bajo	1.1 – 1.6
Normal	1.7 - 2
Alto	2.1 – 2.8
Muy alto	>3

Nota. La tabla tiene los rangos de refernecia para el control de la electro-conductividad.

Teniendo la base de estos trabajos previos y realizando nuestros propios ajustes en base a pruebas y errores desarrollados en el sistema prototipo, se desarrolló las funciones de membresía para el control difuso de la electro-conductividad, las cuales fueron desarrolladas para su simulación en el software MatLab. Se muestran en la figura 36, donde en el eje *Y* se tiene el grado de membresía y en el eje *X* el valor de la electro-conductividad, en la tabla 20 se tienen los valores de dichas funciones de entrada.

Figura 36

Funciones de membresía de entrada para el control de la EC



Nota. La figura muestra las funciones de membresía de entrada en el software MatLab para el controlador difuso.

Tabla 20

Rangos de las funciones de entrada de EC del controlador difuso

Nivel de EC	Rango[mS/cm]
EC muy bajo	[0 0 1.1 1.3]
EC bajo	[1.1 1.3 1.5 1.7]
EC Normal	[1.5 1.8 2 2.3]
EC Alto	[2.15 2.4 2.6 2.8]
EC muy alto	[2.3 3 4 4]

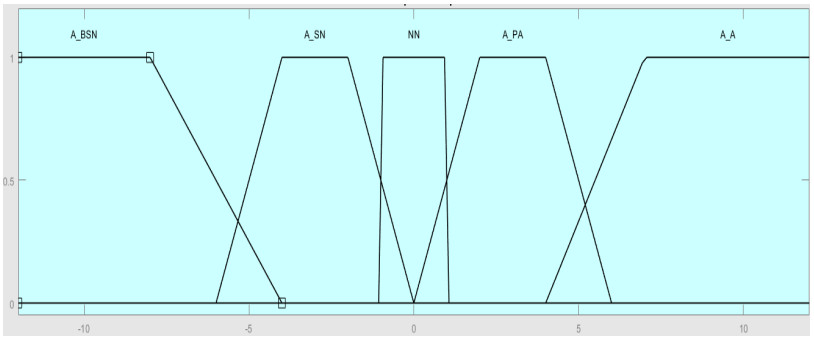
Nota. La tabla muestra los rangos definidos para las funciones de membresía de entrada utilizados en el control difuso de la EC.

Las funciones de membresía de salida se muestran en la figura 37, donde en el eje Y se tienen el grado de membresía de las funciones y en el eje X valores numéricos los cuales representan el tiempo de activación de las válvulas peristálticas, tanto para el incremento de la EC

como para el decremento de la misma y en la tabla 21 se tienen los valores de dichas funciones de salida. Con estas funciones de membresía tanto de la entrada como de la salida se procede a la elaboración de las reglas difusas que se muestran en la figura 38.

Figura 37

Funciones de membresía de salida para el control de la EC



Nota. La figura muestra las funciones de membresía de salida en el software MatLab para el control de la electro-conductividad.

Tabla 21

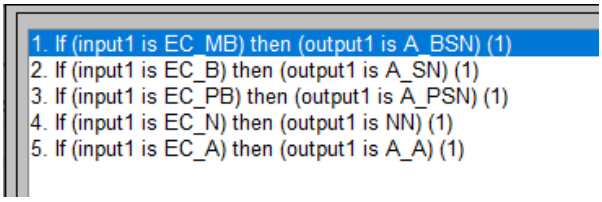
Valores de las funciones de membresía de salida de la EC

Nivel de EC	Rango
Agregar bastante SN	[-12 -12 -8 -4]
Agregar SN	[-6 -4 -2 0]
Neutro	[-1 -1 1 1]
Agregar poca agua	[0 2 4 6]
Agregar agua	[4 7 12 12]

Nota. La tabla muestra los rangos de pH para el control del pH.

Figura 38

Reglas difusas para el control de la EC

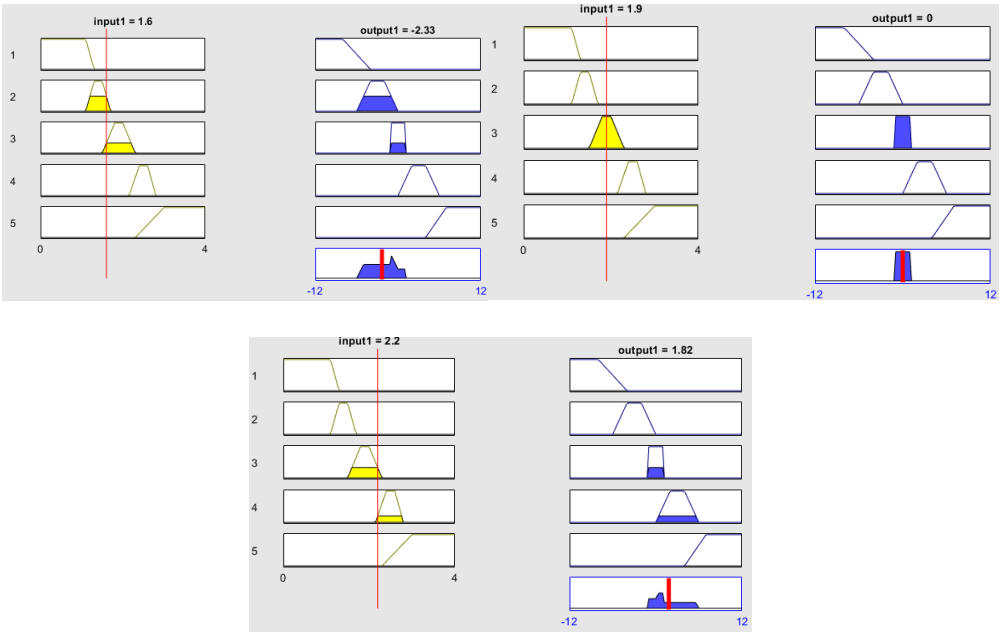


Nota. La figura muestra las reglas difusas en el software MatLab para el control de EC.

Al igual que para el controlador difuso del pH, para el control difuso para la electro-conductividad se usó el método Mamdani. Finalmente, para la defuzzificación y mediante el Toolbox de Matlab se obtuvieron los resultados que se visualizan en la figura 39, utilizando el método del centroide.

Figura 39

Resultados obtenidos mediante el Toolbox de Matlab



Nota. En la figura se muestra las salidas procesadas por el sistema difuso, correspondientes a cada tipo de entrada para el control de la electro-conductividad.

Una vez concluido el proceso de diseño y validación del controlador mediante el software MatLab estas funciones de membresía son llevadas al IDE de Arduino para la elaboración del código para el microcontrolador.

La salida del microcontrolador activa los relés que estos a su vez activan las bombas peristálticas encargadas de elevar el nivel de la electro-conductividad (solución nutritiva A + solución nutritiva B) o disminuirlo (agua pura).

Al igual que el funcionamiento del control de pH, el controlador difuso para la EC es el encargado de controlar el tiempo de activación de los relés, estos tiempos de activación dependen del valor de entrada determinada por el sensor de EC y cuya salida lo define el controlador difuso, el cual brinda una salida proporcional al error medido; esta salida es "traducida" a valores de tiempo, el cual se ajustó en la programación realizada en el código, dicho salida se muestran en la tabla 22.

Tabla 22

Comportamiento de controlador de EC

EC (mS/cm)	Salida del controlador	Bomba SN	Bomba Agua	Tiempo de activación (Segundos)
1.9	0.00	Desactivada	Desactivada	0.0
1.4	-2.00	Activada	Desactivada	20.0
2.3	1.8	Desactivada	Activada	18.0

Nota. La tabla muestra el funcionamiento del controlador difuso implementado.

El tipo de funcionamiento en cuanto al tiempo de activación de las bombas tanto de solución nutritiva como del agua trabajan de igual forma que el controlador difuso de pH.

Si el valor de la EC está dentro del rango óptimo (entre 1.5 y 2.2 mS/cm3) este dará una salida de 0.0, lo cual indica que ninguna bomba sea activada, si se encuentra por debajo del rango, la salida del controlador brinda un valor negativo y si es mayor al rango se obtendrá un valor positivo correlacionado a la diferencia entre el valor medido y el valor del rango óptimo, si el valor es negativo se activa la bomba de solución nutritiva (SN) y de manera similar si el valor de la salida del controlador es positivo se activa la bomba de agua por el tiempo relacionado al valor que se obtiene en la salida del controlador (en segundos) en ambos casos.

4.4 Diagrama de Flujo Para el Sistema Hidropónico

El flujo de trabajo que realiza el sistema hidropónico implementado se puede apreciar en la figura 40, donde en el inicio del programa lo primero que se realiza es la monitorización de los parámetros principales que son el nivel de pH y de conductividad eléctrica, también como parámetro secundario se monitorea la temperatura de la solución nutritiva ya que la temperatura afecta en la medición de ambos parámetros. El software toma el valor de la temperatura y la considera para el cálculo adecuado tanto del pH como de la conductividad eléctrica.

Para el correcto funcionamiento del sistema, es necesario el monitoreo del nivel de la solución nutritiva (SN) realizado por el sensor ultrasónico HC-SR04, es decir, se verifica si hay o no suficiente solución nutritiva en el sistema para realizar un correcto trabajo de riego en el momento de la recirculación por todo el sistema. Si el nivel de solución nutritiva es bajo se activan las bombas peristálticas que agregan solución nutritiva y agua al sistema, durante el tiempo necesario para determinar que el nivel de la solución nutritiva es adecuado (esto también lo determina el sensor ultrasónico). Si el nivel de la solución nutritiva no es bajo, entonces el nivel es adecuado para realizar el proceso de recirculación que lo determina el módulo RTC, el módulo

determina el encendido y apagado de la bomba de recirculación de la solución nutritiva (La activa durante 5 minutos cada hora entre las 6 am y las 6 pm).

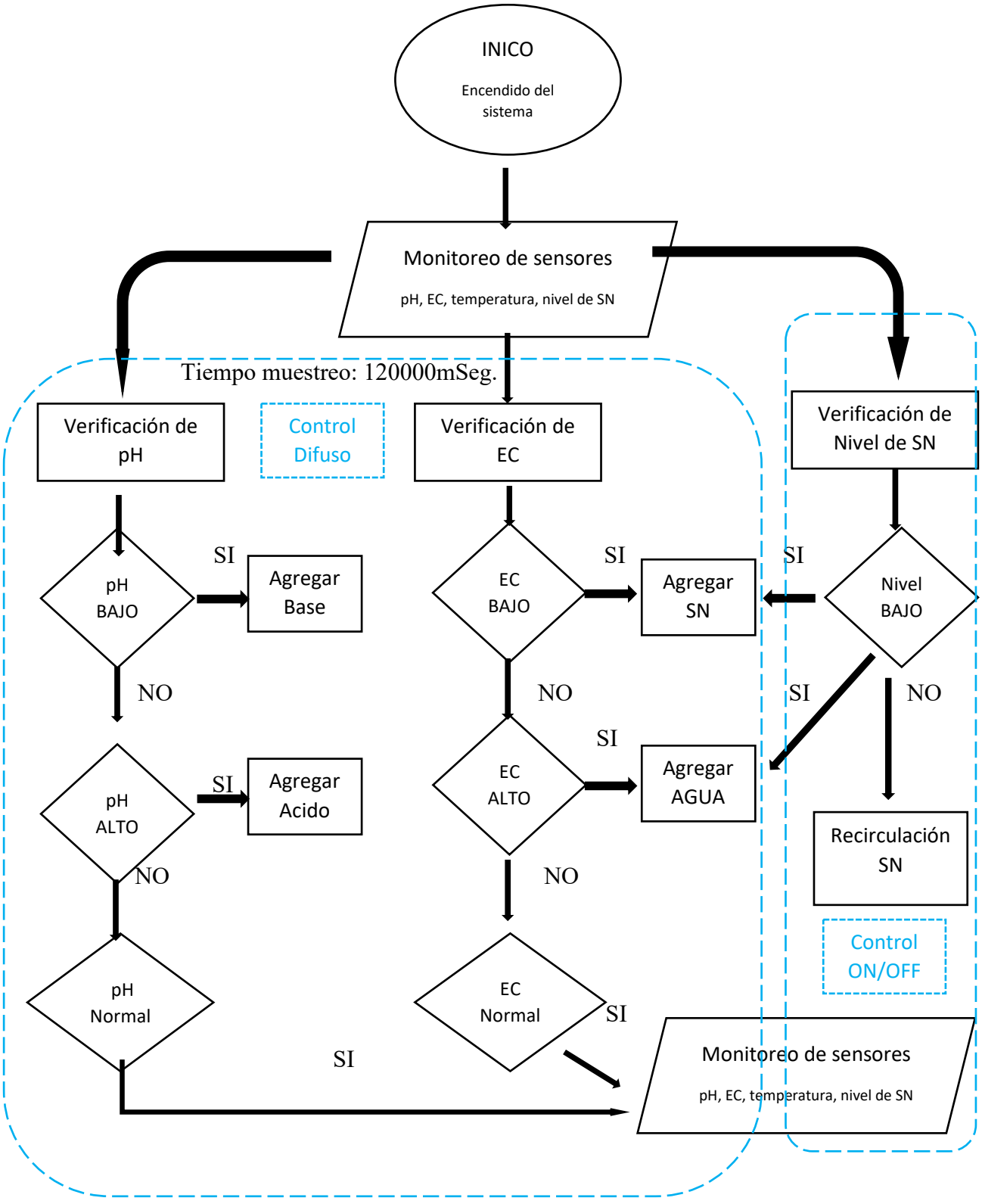
La verificación del nivel de pH lo realiza el sensor de pH, si el nivel pH es bajo se activa la bomba para agregar solución base a la solución nutritiva y si el nivel de pH es alto se activa la bomba para agregar solución ácida, si el nivel de pH está dentro del rango adecuado el sistema sigue monitoreándose mediante la plataforma IOT.

La verificación del nivel de conductividad eléctrica lo realiza el sensor de EC, si el nivel EC es bajo se activa la bomba para agregar solución nutritiva y si el nivel de EC es alto se activa la bomba para agregar agua, si el nivel de EC está dentro del rango adecuado el sistema sigue monitoreándose mediante la plataforma IOT.

Para la activación de estas bombas se toma en consideración un tiempo de muestreo de 120000mseg. Es decir que, si se detecta un nivel fuera de los rangos adecuados requeridos y este se mantiene así durante este tiempo, recién en este punto se procede a la activación de la bomba, si durante este tiempo el nivel medido vuelve al rango deseado ninguna bomba se activa, esto tanto para el pH como para la conductividad eléctrica. Esto se empleó para evitar la activación de las bombas de manera innecesaria ya que siempre se pueden registrar lecturas erradas.

Figura 40

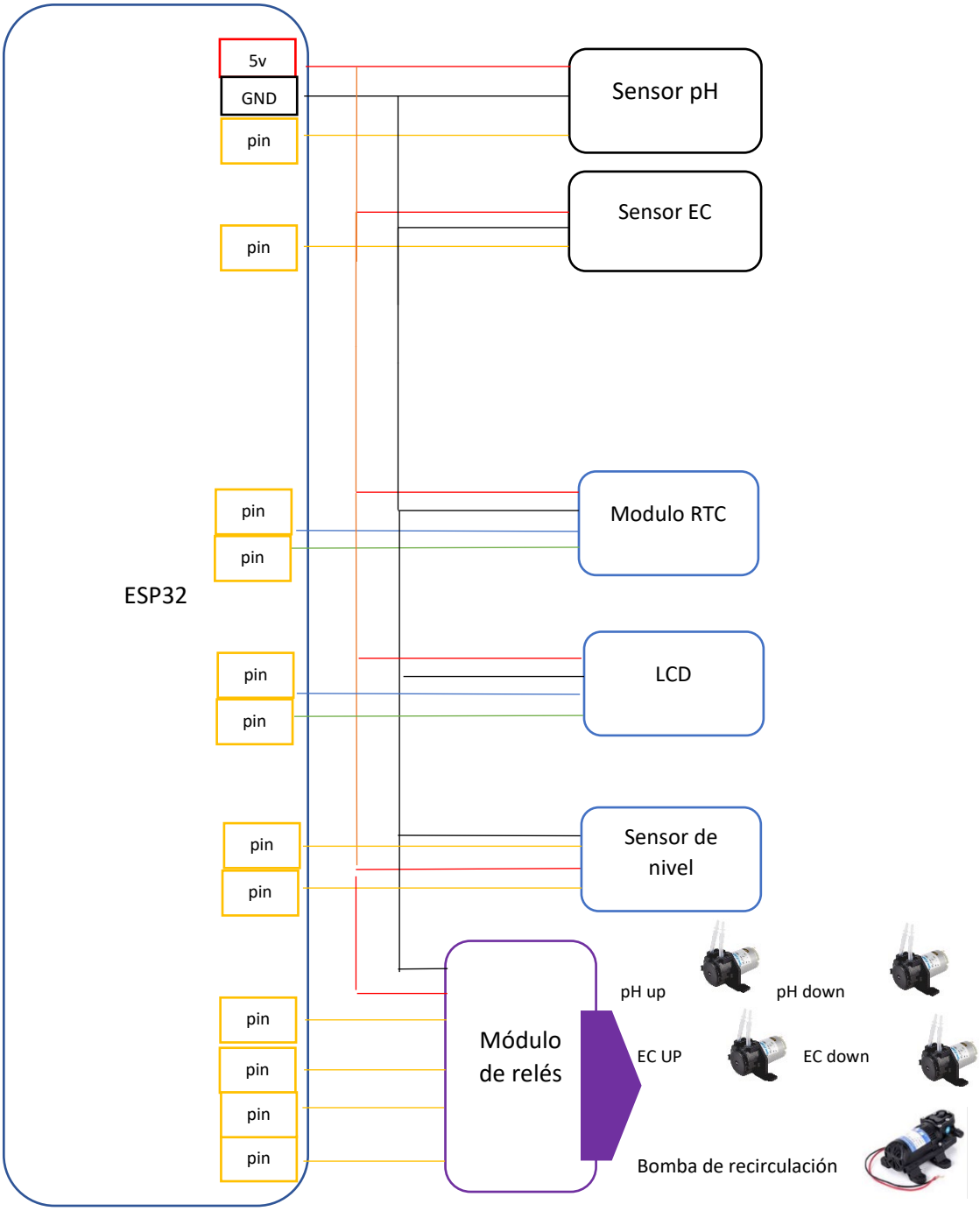
Diagrama de flujo



4.4.1 Esquema de conexión sistema hidropónico

Figura 41

Esquema de conexión del sistema hidropónico



Nota. La figura muestrea el esquema de conexión empleado en el sistema hidropónico.

4.5 Interface de Control y Monitoreo

Teniendo en cuenta que existen muchas más plataformas Iot en la actualidad, además de las mencionadas, se decidió usar la plataforma Blynk para nuestro proyecto por tener mayor documentación en la cual poder apoyarce en el desarrollo y por tener mas experiencia con esta plataforma.

4.5.1 Control y monitoreo IoT con Blynk

Blynk es una plataforma IoT el cual se puede utilizar para crear prototipos, permite la implementación y gestión remota de dispositivos electrónicos conectados, abarcando desde pequeños proyectos personales de IoT hasta grandes despliegues con millones de productos comerciales interconectados. Blynk ofrece un conjunto completo de herramientas de software esenciales para el desarrollo de prototipos, la implementación y la administración remota de dispositivos inteligentes a cualquier escala.

Blynk Console es una aplicación web que puede ser utilizada por diferentes tipos de usuarios y Blynk Apps es una aplicación móvil nativa multifuncional para iOS y Android.

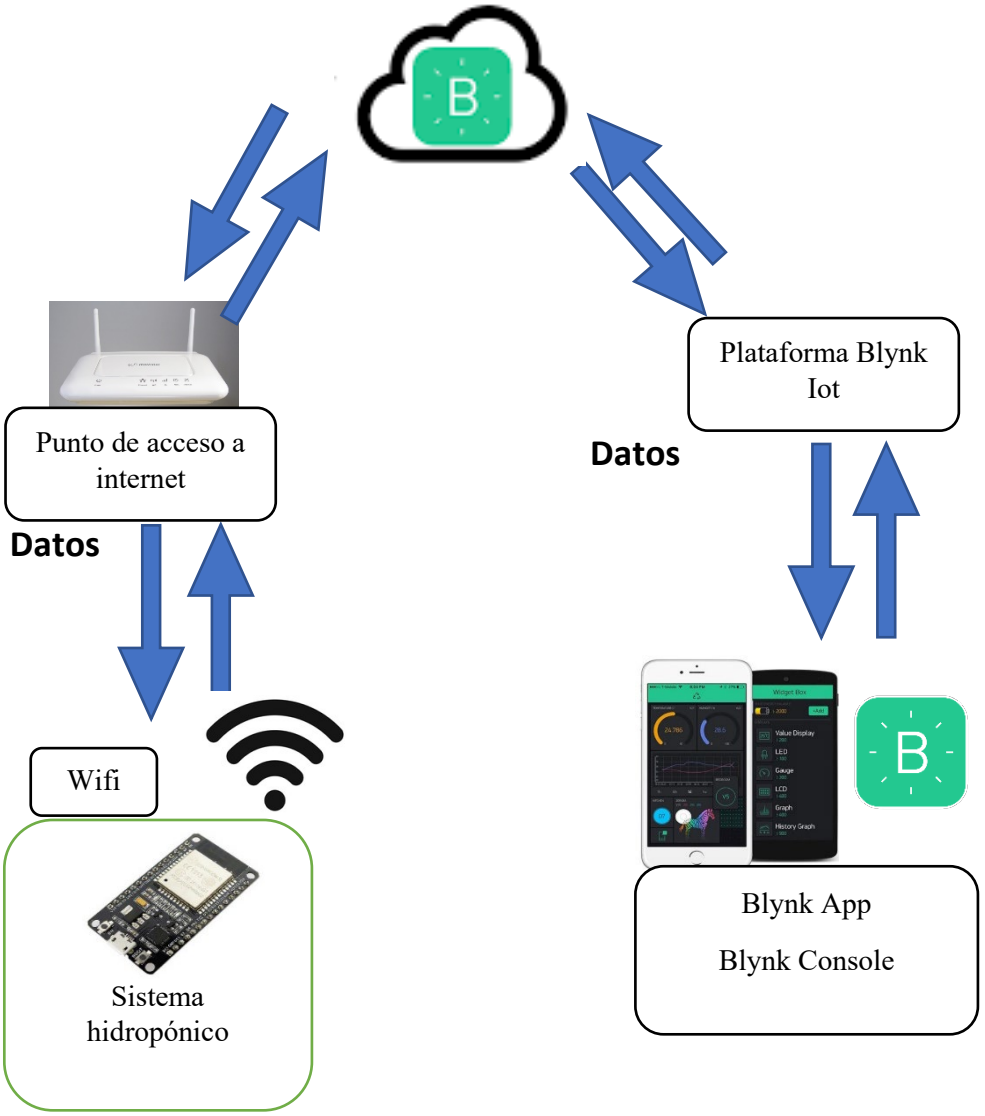
El funcionamiento de nuestro sistema mediante el internet de las cosas es el siguiente:

- Los sensores recopilan información, dicha información es recibida y procesada, en nuestro caso por el microcontrolador ESP32 .
- El ESP32 se conecta a internet mediante un accesspoint, y toda la data procesada de los sensores es enviada a la plataforma Iot .

La plataforma Iot Blynk, gracias a sus caracteristicas, nos permite poder visualizar y controlar manualmente nuestros datos mediante internet en su app en un celular (Blynk Apps) y/o poder visualizarlos y controlarlos mediante una pc (Blynk Console). El esquema de monitoreo de cómo trabaja Blynk se muestra en la figura 42.

Figura 42

Esquema de control y monitoreo



Nota. La figura muestra el esquemático de control y monitoreo de nuestro sistema hidropónico con la plataforma Blynk.

4.5.2 Diseño y desarrollo de la interfaz de control

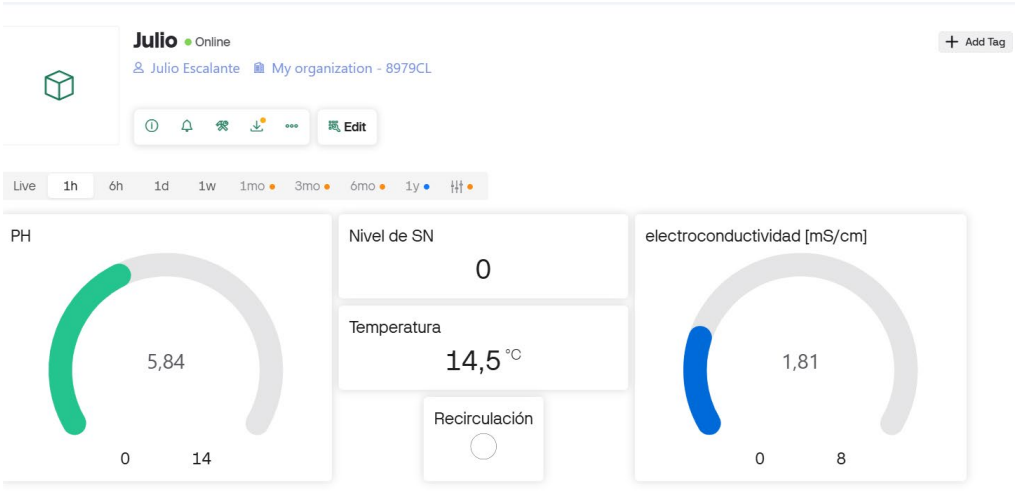
El diseño y desarrollo de la interfaz de control y monitoreo de nuestro sistema hidropónico se basa en poder ver los principales parámetros como el pH, la electro-conductividad, iluminación y poder controlarlos, estableciendo un setpoint mediante la misma plataforma.

Blynk, nos proporciona diferentes widgets para poder monitorizar y controlar los parámetros que necesitamos en nuestro proyecto, en su versión gratuita. Una versión de pago de Blynk proporciona mayores tipos de widgets, con lo que podemos aumentar el número de parámetros a visualizar, por lo cual, a modo de experimentar probaremos en este proyecto, monitorizando la activación de las válvulas de aumento y disminución del pH y la electro-conductividad, de la temperatura de la misma y también la frecuencia y duración de riego.

En la figura 43 se tiene el desarrollo final de la interfaz en la plataforma IoT en las dos versionesque Blynk nos proporciona, en su versión para pc (Blynk Console) y en su versión para teléfono móvil (Blynk App) respectivamente.

Figura 43

La interfaz en la plataforma iot



Nota. La figura nos muestra la interfaz del sistema hidropónico en la plataforma iot Blynk.

En la interfaz final, en la parte de la izquierda tenemos la visualizacion del valor actual del pH, a la derecha el de la electro-conductividad, en la parte del medio tenemos en la parte superior el nivel de la solucion nutritiva, mas abajo el valor de la temperatura de la sustancia nutritiva y por ultimo un indicador el cual se activa cada vez que la bomba de recirculacion funciona. De igual forma tenemos la monitorización de estos parametros mediante la app de Blynk para el celular la cual se tiene en la parte de anexos.

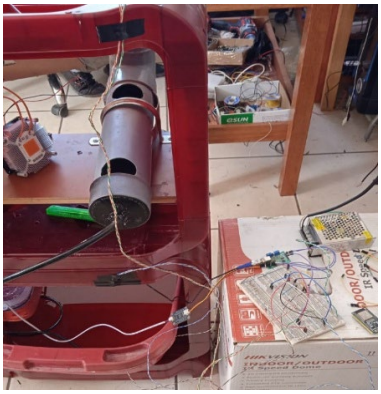
4.6 Construcción del Sistema Hidropónico

A continuación, se muestra el desarrollo del sistema hidropónico final, desde el desarrollo inicial de la estructura, hasta la puesta en marcha del sistema de control y monitoreo final.

La estructura en la que se instalará el sistema hidropónico tiene las siguientes dimensiones: 150cm de alto, 60 cm de ancho y 50 de profundidad, esta estructura tiene 2 niveles, en el primer nivel se colocó el contenedor de la sustancia nutritiva, el cual tiene capacidad de hasta 15 litros donde se encuentra la sustancia nutritiva y en el segundo nivel se tiene la estructura construida a partir de tubos de PCB el cual puede contener 4 plantas. En la figura 44 tenemos el proceso de construcción del sistema hidropónico y en la figura 45 vemos el soporte final para las plantas.

Figura 44

Desarrollo inicial del sistema hidropónico



Nota. La figura muestra en pleno proceso de la construcción del sistema hidropónico

Figura 45

Estructura para la ubicación de las plantas

Nota. Se muestra la estructura desarrollada con tubos de PBC para la ubicación de las plantas.

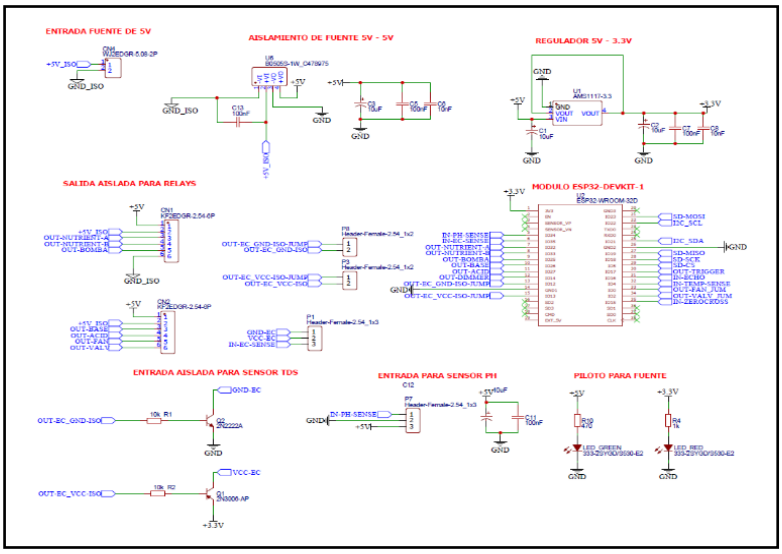
Una vez terminado el armado del sistema hidropónico, se comienza a desarrollar diferentes pruebas para verificar el optimo funcionamiento de los sensores, ya que por utilizar sensores de bajo costo tienne limitaciones y estas seran verificadas en nuestro sistema para ver si es factible, tal como se planteó en nuestros objetivos especificos, ser usados en este tipo de proyectos.

4.6.1 Diseño y desarrollo de las tarjetas electrónicas

El software que se usó para la realización de las tarjetas electrónicas del sistema hidropónico fue el Easy Eda, que es un software libre y de facil uso, con documentación amplia en internet y con la facilidad de poder exportar tus diseños para un desarrollo profecional . Se muestra parte del esquemático de las tarjetas electrónicas (figura 46) , el enrutamiento de las pistas (figura 47) , el diseño de las placas en 3D (figura 48) y la placa PCB terminada (figura 49).

Figura 46

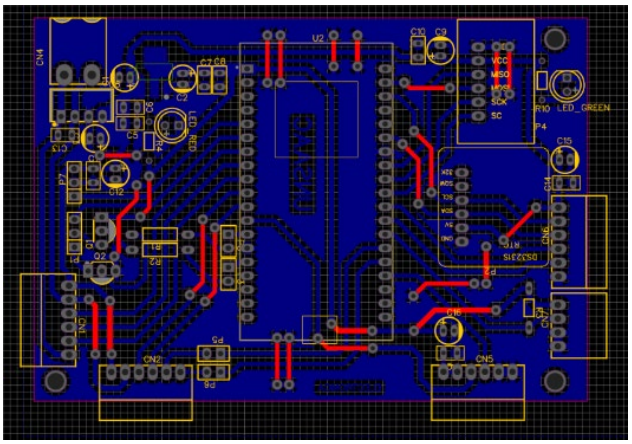
Esquemático de las tarjetas electrónicas



Nota. La figura muestra una parte del esquemático de las tarjetas electrónicas desarrollado en el software de easy eda.

Figura 47

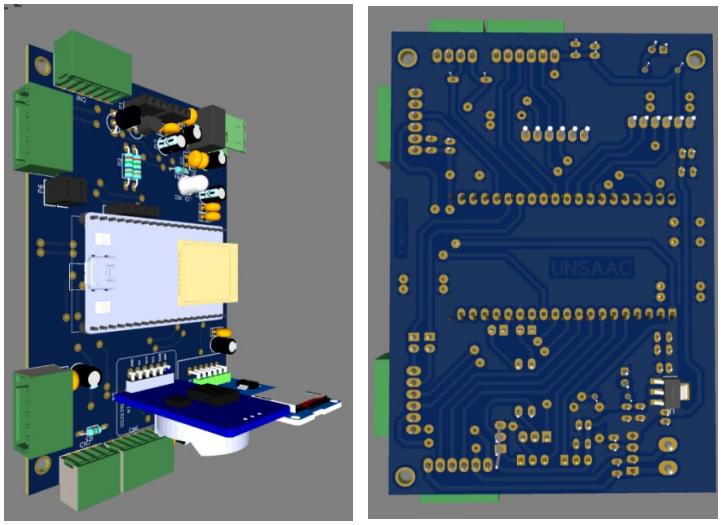
Enrutado pistas y diseño de la placa PCB



Nota. La figura muestra el enrutado de las pistas y diseño de la placa PCB desarrollado en el software Easy Eda.

Figura 48

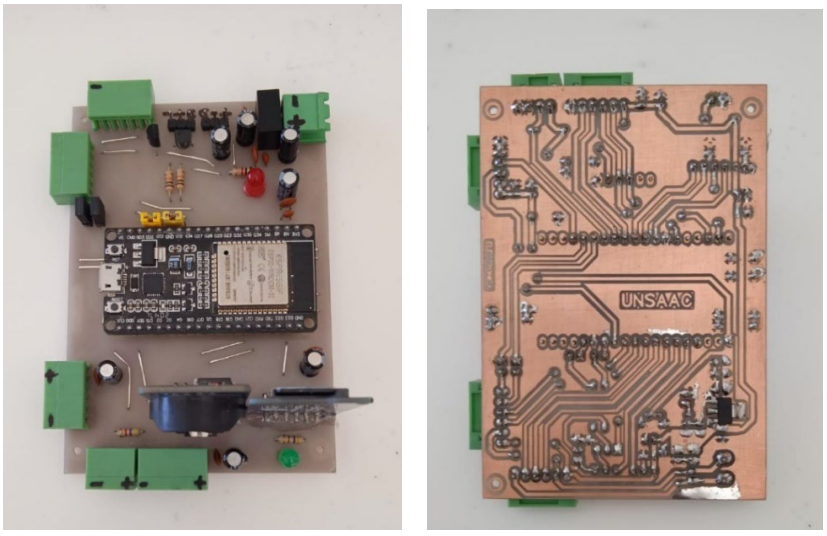
Vista superior y posterior 3D de la placa PCB



Nota. La figura muestra la vista superior y posterior 3D de la placa PCB desarrollados en el software de Easy Eda.

Figura 49

Vista superior y posterior de la placa PCB terminada



Nota. La figura muestra la vista superior y posterior de la placa PCB terminados desarrolladas en Cusco con la técnica de grabado CNC.

Acontinuación, se muestran sistema hidropónico finalizado, con la instalacion de las placas electrónicas, las fuentes de alimentacion, los reles, las bombas peristálticas y todas las conexiones electricas y de mangueras.(figura 50).

Figura 50

Sistema hidropónico finalizado

Nota. La figura muestra el sistema hidropónico concluido, con la bomba de circulación en la parte inferior, las soluciones nutritivas, las bombas peristálticas para el control de ph y electroconductividad y el sistema completo de control y monitoreo electrónico.

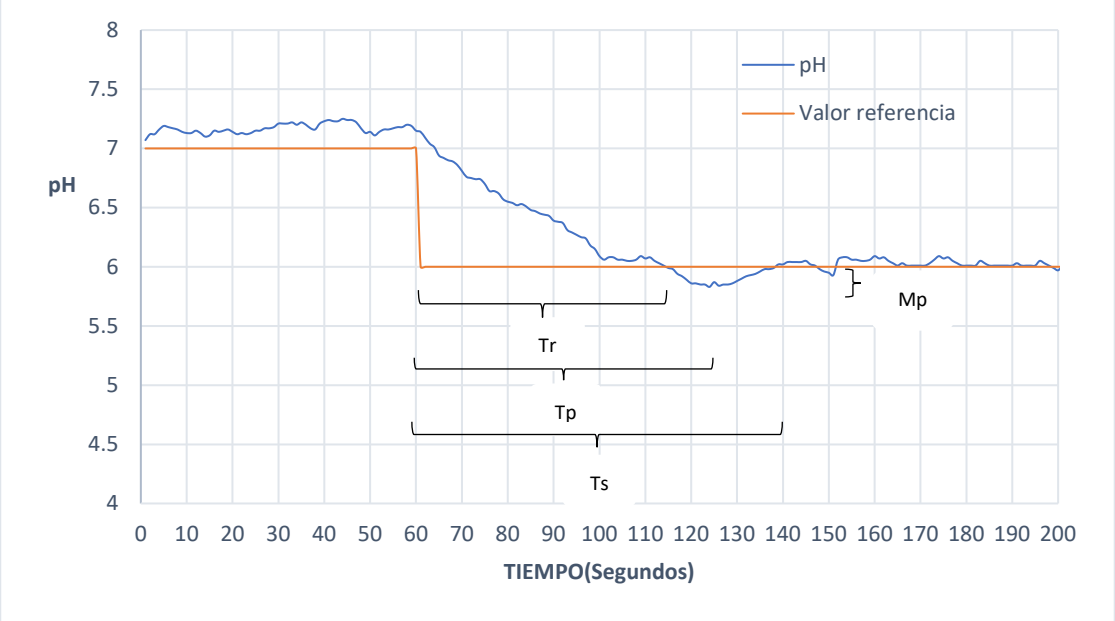
Capítulo V: Resultados

En este capítulo se muestra los resultados que se obtuvieron de los controladores tanto del pH como de la electro-conductividad.

En la figura siguiente (figura 51) vemos la respuesta al escalón unitario para el pH de la solución nutritiva, teniendo inicialmente un pH del agua de aproximadamente 7, el cual es muy elevado para el sistema hidropónico, llevándolo al rango deseable por medio del sistema de control difuso ya implementado, entre 5.6 y 6.2.

Figura 51

Respuesta al escalón del sistema de control de pH



Nota: La figura muestra la respuesta al escalón unitario del sistema de control de pH y también los valores de los parámetros principales.

De la figura 51 podemos obtener gráficamente los siguientes valores:

Tiempo de subida (Tr) : 55 segundos.

Tiempo pico (Tp) : 65 segundos.

Sobre impulso(Mp) : 0.17.

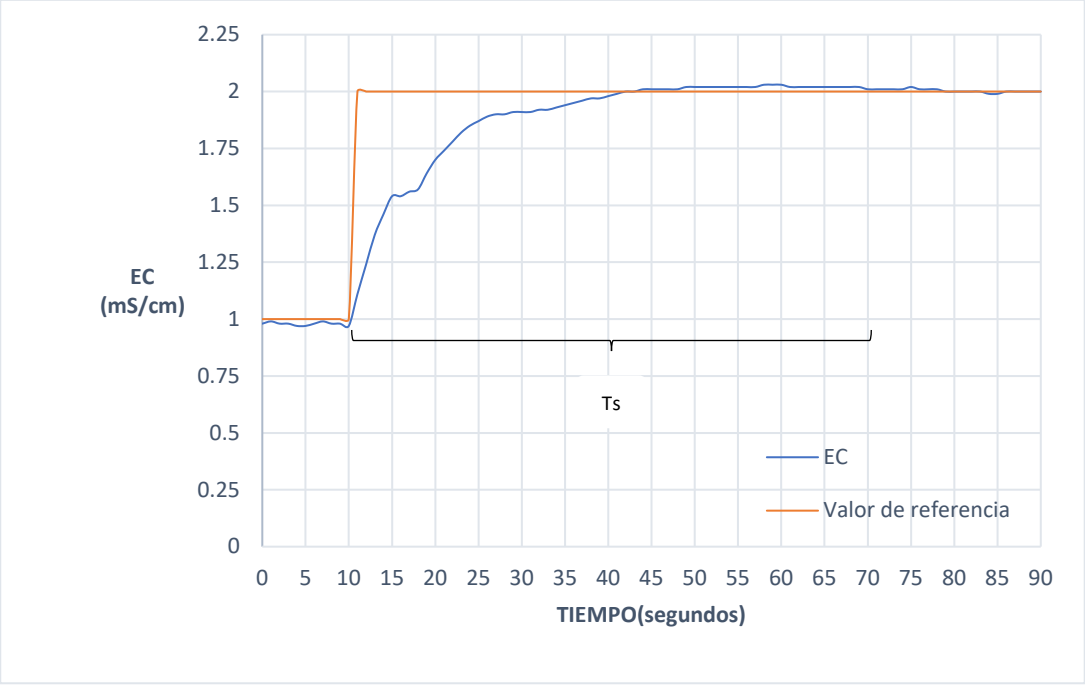
Tiempo de establecimiento (Ts) :80 segundos.

Error en estado estacionario (Ess) : 0.08.

En la siguiente grafica (figura 52) observamos la respuesta al escalón unitario, cuyo valor inicial es de 1 mili siemens inicialmente, luego el sistema de control difuso lleva el valor dentro de los parámetros deseados, entre 1.8 y 2.2 miliSiemens/cm de electro-conductividad.

Figura 52

Respuesta al escalón del sistema de control de electro-conductividad



Nota: La figura muestra la respuesta al escalón unitario del sistema de control de electro-conductividad y también los valores de los parámetros principales.

De la figura 52 podemos obtener gráficamente los siguientes valores:

Tiempo de subida (Tr) : 35 segundos.

Tiempo pico (Tp) : 48 segundos.

Sobre impulso(Mp) : 0.03.

Tiempo de establecimiento (Ts) :62 segundos.

Error en estado estacionario (Ess) : 0.02.

A lo largo del día el valor de pH fluctúa levemente, en la tabla 23 se muestra cada uno de los valores obtenidos en las mediciones tomadas a diferentes horas del día y comparadas con las mediciones realizadas con el instrumento de medición de pH de ATC. Con un error absoluto promedio de 0.2 y un error porcentual promedio de 3.31%.

Tabla 23

Error de la medición del pH

Medición	Valor pH	Instrumento	Error absoluto	Error porcentual (%)
1 (mañana)	6.0	6.1	0.1	1.64
2 (tarde)	5.7	6	0.3	5
3 (noche)	5.9	6.1	0.2	3.28

Nota. La tabla muestra tanto el error absoluto como el porcentual en la medición del pH.

De igual forma en la tabla 24 se muestra cada uno de los valores obtenidos en las mediciones tomadas a diferentes horas del día y comparadas con las mediciones realizadas con el instrumento de medición de la electro-conductividad TDS-3.

Tabla 24

Error de la medición de la electro-conductividad

Medición	Valor EC (mS/cm)	Instrumento (mS/cm)	Error absoluto(mS/cm)	Error porcentual (%)
1 (mañana)	1.9	1.8	0.1	5
2 (tarde)	1.8	1.8	0.0	0
3 (noche)	1.9	1.8	0.1	5

Nota. La tabla muestra tanto el error absoluto como el porcentual en la medición de la electro-conductividad.

De la tabla anterior se obtiene un error absoluto promedio de 0.1 y un error porcentual promedio de 3.33%.

Capítulo VI: Discusión

6.1 Descripción de Hallazgos más Significativos

Los puntos más significativos que se hallaron a lo largo del trabajo desarrollado fueron:

- El sistema hidropónico en cuanto al control de pH tiende a bajar su valor a lo largo de toda la etapa de desarrollo de los cultivos, por lo que se observó que el sistema de control solamente realiza la operación de disminuir el pH con la solución ácida (solución con ácido fosfórico) y no fue necesaria el control de elevar el valor del pH con la solución básica (solución con hidróxido de potasio).
- En cuanto al control de la electro-conductividad se observó que, a lo largo de todo el proceso de desarrollo de las plantas, la electro-conductividad de la solución nutritiva solo disminuía, por lo que solamente el control de elevación por parte del controlador difuso funcionaba.
- Se hizo pruebas durante el periodo de desarrollo de las plantas (2 meses) y se observó que los sensores tanto de electro-conductividad y de pH pierden en cierta medida sus capacidades de medición, por lo que es necesario calibrar estos sensores periódicamente.

6.2 Comparación Critica con Trabajos Existentes

- Teniendo en cuenta el trabajo de tesis “Diseño de un sistema de control automático de pH y conductividad eléctrica para garantizar el balance de la solución nutritiva de un sistema hidropónico NFT en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.” (Granda, 2022), podemos comparar el error absoluto en la medición del pH, teniendo valores entre 0.04 y 0.12 con un promedio de 0.08 en comparación a lo que se obtuvo en el trabajo presente con un promedio de 0.17. De igual forma en comparación con

los valores medidos de la electro-conductividad el error absoluto promedio de las mediciones del trabajo tomado como referencia es de 1 mientras que el promedio de las mediciones tomadas en el presente trabajo es de 0.1.

- Comparando con el trabajo de investigación “Embedded fuzzy logic for controlling pH and nutrition in hydroponic cultivation” (Nasution,2023), cuyo sistema de control del pH y la electro-conductividad fueron desarrollados también mediante metodología difusa, obtuvieron como resultado un sobre impulso al control del nivel de pH 4.318% y para la electro-conductividad 2.296% con un error de 0.227% y 0.606% respectivamente. En comparación al error promedio obtenido en este trabajo de 2.76% y 5% del pH y la electro-conductividad respectivamente.

Conclusiones

- Se diseñó un sistema a base de instrumentos de bajo costo, que monitorea los valores de pH, conductividad eléctrica los cuales se pueden observar numéricamente y también se creó un indicador en la misma interfaz de frecuencia y tiempo de recirculación de la sustancia nutritiva, todo esto usando la plataforma IoT de Blynk, el cual nos permite monitorizar el sistema de manera remota el funcionamiento adecuado de un sistema hidropónico.
- Se diseñó un prototipo capaz de regular y estabilizar los niveles de conductividad eléctrica y pH de la solución nutritiva en un sistema hidropónico, asegurando que se mantengan dentro de los rangos óptimos mediante el controlador difuso con el método de Mamdani y el método del centroide para la defuzzificación, este controlador difuso fue diseñado mediante el software Matlab para evaluar el comportamiento de las salidas difusas en función a las reglas difusas y funciones de membresía para el pH y la electro-conductividad independientemente una de la otra. También se diseñaron las placas electrónicas mediante el uso del software Easy Eda.
- Se implementó un prototipo con instrumentos de bajo costo que controla el nivel de pH y la electro-conductividad de la sustancia nutritiva de un sistema hidropónico mediante bombas peristálticas que son activada mediante relés por parte del controlador difuso probado en Matlab y luego llevado al IDE de Arduino para la creación del código para el microcontrolador ESP32 que gracias a su chip integrado de wifi envía los datos a la plataforma Blynk permitiendo monitorizar el sistema hidropónico completo a través de internet. Donde se obtuvo, para el control del pH los siguientes parámetros: Tr = 55 seg., Tp =65 seg., Mp= 0.17, Ts =80 seg. Ess =0.08, error absoluto promedio de 0.2 y un error

porcentual promedio de 3.31%, en cuanto a la electro-conductividad se obtuvo: Tr = 35 seg., Tp =48 seg., Mp= 0.03, Ts =62 seg. Ess =0.02, un error absoluto promedio de 0.1 y un error porcentual promedio de 3.33%. Con estos resultados validamos el funcionamiento del sistema implementado.

Recomendaciones

- Como los sensores de bajo costo tienden a descalibrarse se recomienda por lo menos volverlos a calibrar después del periodo de desarrollo de las plantas para volverlos a usar en una siguiente cosecha.
- Además de regular el pH y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva, es fundamental garantizar una adecuada ubicación y adaptación del entorno donde se instalará el sistema hidropónico.

Bibliografía

Alveal Concha M. A. & Campos González K. (2014), "*Estudio comparativo de sistemas de riego hidropónico y por goteo*" (Tesis de pregrado) Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile.

Amaya Rincón, D. A. & Cruz Velásquez, 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. Recuperado de: http://hdl.handle.net/11349/3811.

Beltráno J. & Giménez D. O. (2015). Cultivo en hidroponía. (1ra edición). Editorial de la Universidad de la Plata.

Berna Villalobos M. C. (2014) "Desarrollo de un sistema automatizado de cultivo hidropónico del tipo NFT" (Tesis de pre grado) Pontificia Universidad Católica De Valparaíso, Valparaíso, Chile.

Bürkert. (2020). *Medición de Conductividad en fluidos*. Bürkert Fluid Control Systems. https://www.burkert.es/es/empresa-y-carrera/actualidades/noticias/Medicion-de-Conductividad-en-fluidos.

Chen, C.-H.; Jeng, S.-Y.; Lin, C.-J. (2022) Fuzzy Logic Controller for Automating Electrical Conductivity and pH in Hydroponic Cultivation. Appl. Sci. 2022, 12, 405. https://doi.org/10.3390/app12010405.

Chiara Quispe, D. R., Herrera, L., Vargas, P., & Chauca, M. (2017). Cultivo hidropónico de espinaca mediante técnica NFT e invernadero para el control de variables ambientales. Perfiles De Ingeniería, 12(12), 49–60. https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v12i12.810.

DFRobot Gravity (2023), Gravity Analog TDS Sensor Meter For Arduino SKU SEN0244. https://www.dfrobot.com/product-1123.html

Espressif Systems (2023), The internet of thing with esp32, http://esp32.net/.

Freire Solis E. V. & Pujos Espin M. D. (2020).” Diseño e implementación de un sistema de monitoreo para el control de nutrientes, pH, c.e., temperatura y flujo de agua, en hidroponía mediante el uso de sistemas embebidos, ubicado en el departamento de horticultura, de la facultad de recursos naturales, de la escuela superior politécnica de Chimborazo”. (Tesis de pregrado) Escuela superior politécnica del Chimborazo. Rio Bamba, Ecuador.

Generación verde, (abril de 2017), Tipos de sistemas hidropónicos para cultivar. https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos

Gilsanz J. C. (2017), Hidroponía. (1ra edición). Editorial Prontográfica.

Granda Delgado R. H. (2022). Diseño de un sistema de control automático de pH y conductividad eléctrica para garantizar el balance de la solución nutritiva de un sistema hidropónico NFT en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. (Tesis de pregrado) Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque, Perú.

Inca Sánchez S. A. (2013) “Automatización y control del sistema NFT para cultivos hidropónicos” (Tesis de pre grado). Universidad Ricardo Palma, Lima – Perú.

Marulanda C. & Izquierdos J. (2003),” La huerta hidropónica popular”, Santiago de Chile, Chile: FAO

Mouser Electronics (2023), Módulos de sensor de múltiples funciones: Seeed Studio 314990622 https://www.mouser.pe/ProductDetail/Seeed-Studio/314990622?qs=DRkm Tr78QAQsz VLy9PBgKw%3D%3D.

Máximo Gutiérrez, M. (2020). "Diseño en sensores de conductividad eléctrica para medida de calidad del agua en soluciones de suelo". (Tesis de pre grado). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena - Colombia.

Mengzi Zhang, Catherine M. Whitman, Erik S. Runkle, Manipulating growth, color, and taste attributes of fresh cut lettuce by greenhouse supplemental lighting, Scientia Horticulturae, Volumen 252, 2019, Pages 274-282, ISSN 0304-4238, https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.051

Morgan E. J (2014), Sensor ultrasónico HC-SR04 https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet - pdf/download/1132204/ETC2/HCSR04.html

Nasution, I. S., Satriyo, P., Dhafir, M., Devianti, Iswanda, A., Rani, S., Fitria, S. R., & Munawar, A. A. (2023). Embedded fuzzy logic for controlling pH and nutrition in hydroponic cultivation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1183*, 012113. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1183/1/012113.

Pacheco Bautista, D., Cortés Rito, E., & Aguilar Acevedo, F. (2018). Diseño de un controlador de carga de tres etapas para sistemas fotovoltaicos usando lógica difusa. Revista chilena de ingeniería, vol. 27 N.º 4, 2019, pp. 540-550. doi:10.4067/S0718-33052019000400540.

Pérez Zavala J. A., López Guevara L. E., Romero Vásquez R. D. (2016), "Automatización de invernadero para cultivos hidropónicos en el salvador", (Tesis de pregrado) Escuela Especializada en Ingeniería Itca-Fepade, Santa Tecla, La Libertad, El Salvador, C. A.

Quercusblog. (2018). *Efectos de la temperatura en la medida del pH*. El blog de QuercusLab. https://quercuslab.es/blog/efectos-de-la-temperatura-en-la-medida-del-ph/?srsltid=AfmBOorfVCxLv-0cnqe2qyXeE1H_DzqIIN2cmvvNuEYBGa1vw-0oMwbx.

Quipo Mendoza R. (2016) "Efecto de tres dosis de soluciones nutritivas en la producción de dos variedades de espinaca (spinacia oleracea) mediante el sistema hidropónico de raíz flotante en k'ayra – Cusco." (Tesis de pre grado) Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú.

Raspberry pi Foundation (2023), Raspberry Pi, https://www.raspberrypi.com/

Ross, T. J. (2010). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Segunda edición. Universidad de Nuevo México. Wiley.

Recalde Dicado K. A. & Rojas Mesa E. X. (2022). Implementación de un módulo IoT hidropónico NFT semiautomático con alimentador de nutrientes por control difuso. (Tesis de pre grado) Universidad politécnica salesiana sede Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

Safira, M. R., Lim, M. W., & Chua, W. S. (2022). Design of control system for water quality monitoring system for hydroponics application. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1257, 012027. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1257/1/012027

Soria Campos J.A. (2012)," Curso sobre hidroponía básica para principiantes", México.

Suarez Guedes R. J. (2023), *Blog de tecnologías*, https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/rsuagued/arduino/.

Sudmea Automation. (2025) *Sensor de conductividad SUP-TDS7001*. Sudmea https://es.supmeaauto.com/conductivity-sensor-and-meter/tds7001-conductivity-sensor.

Wang L.X. (1997). A course in fuzzy systems and control. Prentice-Hall International, Inc.

Westlab. (2016, 29 de noviembre). *How Does Temperature Affect pH?* Westlab. https://www.westlab.com/blog/how-does-temperature-affect-ph.

Yate Bonilla M. A. & Zambrano Saya M. A. (2021*). Prototipo IoT de monitoreo de variables ambientales para un cultivo hidropónico de hortalizas*. (Tesis de pregrado) Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia.

Zambrano Cortés, N. H., & Behrentz Pfalz, M. C. (2014). Automatización de un cultivo hidropónico para el control de variables. Revista Colombiana De Investigaciones Agroindustriales, 1, 44-54. https://doi.org/10.23850/24220582.114.

Anexos

Anexo A

Checklist y costos

Ítem	Materiales	Cantidad	Costo (Soles)
1	ESP32	1	15
2	Sensor pH	1	120
3	Sensor EC	1	60
4	RTC	1	12
5	Pila cr2032 (3.3 v)	1	1.50
6	Sensor temperatura	1	25
7	Sensor ultrasónico	1	18
8	Pantalla LCD	1	25
9	Bomba peristáltica	4	100
10	Bomba de agua	1	85
11	Relés 5v	5	25
12	Fuente 12v	1	60
13	Fuente 5V	1	40
14	Cables eléctricos	1	10
15	Tubos PVC 9mm y 3mm	2	7
16	Mangueras	3 metros	6
17	Depósito de 15 Litros	1	15
18	Estructura de soporte	1	50
19	Hidróxido de potasio	1	34
20	Ácido fosfórico	1	40
21	Solución nutritiva	1	50
22	Buffer para pH	3	360
23	Buffer para EC	2	40
24	Medidor de pH	1	150
25	Medidor de EC	1	120
26	Licencia software (Matlab)	1	124
Costo total			**S/ 1655.5**

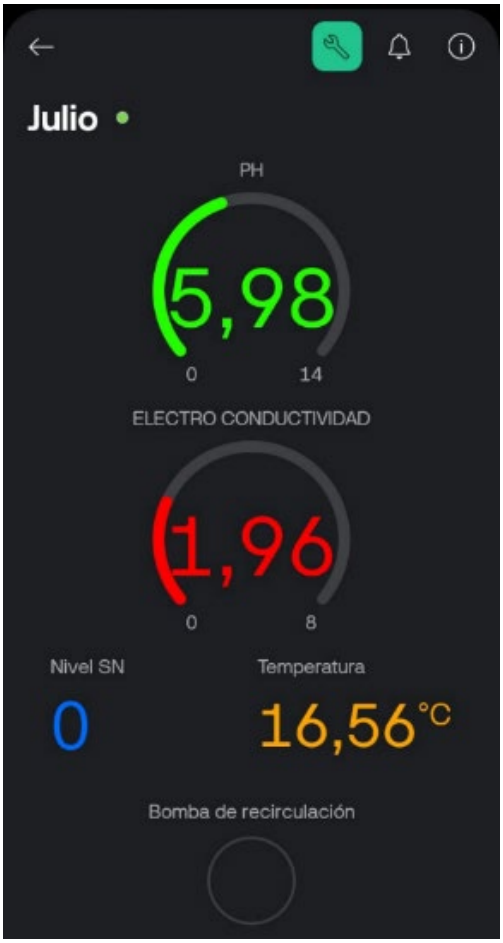
Anexo B

Desarrollo de las plantas en el sistema hidropónico

Para las pruebas de funcionamiento con cultivos se usaron 4 plantas de lechuga, donde a continuación se muestran el desarrollo de las lechugas en el sistema hidropónico.

Anexo C

Monitoreo del sistema hidropónico por Blynk App



*Nota.*Se muestra la pantalla de monitoreo del sistema hudropónico mediante la aplicacion Blynk app para el celular.

Anexo D

Código del programa

```
//-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
//---------------------- DEFINIENDO LOS CONJUNTOS DIFUSOS DEL SISTEMA-----------------------------
//-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
        // Crear objeto fuzzy
        Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();

        // Definir conjuntos difusos para pH
        FuzzySet *pH_muy_bajo = new FuzzySet(PH_MIN, PH_MIN, 3.5, 4.5);
        FuzzySet *pH_bajo     = new FuzzySet(4, 4.25, 5, 5.6);
        FuzzySet *pH_normal   = new FuzzySet(5.3, 5.6, 6.2, 6.9);//<--------
        FuzzySet *pH_alto     = new FuzzySet(6.2, 7, 7.75, 8);
        FuzzySet *pH_muy_alto = new FuzzySet(7.5, 8.5, PH_MAX, PH_MAX);

        // Definir conjuntos difusos para electroconductividad
        FuzzySet* EC_MUY_BAJO   = new FuzzySet(EC_Min, EC_Min, 1.1, 1.3);
        FuzzySet* EC_BAJO       = new FuzzySet(1.1, 1.3, 1.5, 1.7);
        FuzzySet* EC_NORMAL = new FuzzySet(1.5, 1.8, 2, 2.3);//
        FuzzySet* EC_ALTO    = new FuzzySet(2.15, 2.4, 2.6, 2.8;
        FuzzySet* EC_MUY_ALTO = new FuzzySet(2.3, 3, EC_Max, EC_Max);


        ////////////////////////////////// Salidas: control para pH
        FuzzySet *add_acid_fast = new FuzzySet(4.5, 5.5, 10, 10);
        FuzzySet *add_acid_slow = new FuzzySet(0.5, 2, 4, 5.5);
        FuzzySet *no_action     = new FuzzySet(0, 0, 0, 0);
        FuzzySet *add_base_slow = new FuzzySet(-5.5, -4, -2, -0.5);
        FuzzySet *add_base_fast = new FuzzySet(-10, -10, -5.5, -4.5);

        ////////////////////////////////Salida: Control electroconductividad
        FuzzySet* add_BSN     = new FuzzySet(-10, -10, -8, -4);
        FuzzySet* add_SN      = new FuzzySet(-6, -4 ,-2 ,0);
        FuzzySet* add_NN      = new FuzzySet(-1, -1, 1, 1);
        FuzzySet* add_ poca_Agua= new FuzzySet(0 ,2 ,4 ,6);
        FuzzySet* add_AGUA = new FuzzySet(4, 7 ,12 ,12);

//-------------------------------------------------------------------------------------//
 //------------------------- Reglas para control del pH--------------------------//
   //-------------------------------------------------------------------------------------//

      //_____________________________________REGLA 1_____________________________________//
          FuzzyRuleAntecedent *if_pH_muy_bajo = new FuzzyRuleAntecedent();
          if_pH_muy_bajo->joinSingle(pH_muy_bajo);
          FuzzyRuleConsequent *then_add_base_fast = new FuzzyRuleConsequent();
          then_add_base_fast->addOutput(add_base_fast);
          FuzzyRule *fuzzyRule1 = new FuzzyRule(1, if_pH_muy_bajo, then_add_base_fast);
          fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule1);

      //_____________________________________REGLA 2_____________________________________//
          FuzzyRuleAntecedent *if_pH_bajo = new FuzzyRuleAntecedent();
          if_pH_bajo->joinSingle(pH_bajo);
          FuzzyRuleConsequent *then_add_base_slow= new FuzzyRuleConsequent();
          then_add_base_slow->addOutput(add_base_slow);
          FuzzyRule *fuzzyRule2 = new FuzzyRule(2, if_pH_bajo, then_add_base_slow);
          fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule2);

      //_____________________________________REGLA 3_____________________________________//
```

```
    FuzzyRuleAntecedent *if_pH_normal = new FuzzyRuleAntecedent();
    if_pH_normal->joinSingle(pH_normal);
    FuzzyRuleConsequent *then_no_action= new FuzzyRuleConsequent();
    then_no_action->addOutput(no_action);
    FuzzyRule *fuzzyRule3 = new FuzzyRule(3,if_pH_normal,then_no_action);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule3);

  //_____________________________________REGLA 4_____________________________________//
    FuzzyRuleAntecedent *if_pH_alto = new FuzzyRuleAntecedent();
    if_pH_alto->joinSingle(pH_alto);
    FuzzyRuleConsequent *then_add_acid_slow= new FuzzyRuleConsequent();
    then_add_acid_slow->addOutput(add_acid_slow);
    FuzzyRule *fuzzyRule4 = new FuzzyRule(4, if_pH_alto, then_add_acid_slow);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule4);

  //_____________________________________REGLA 5_____________________________________//
    FuzzyRuleAntecedent *if_pH_muy_alto = new FuzzyRuleAntecedent();
    if_pH_muy_alto->joinSingle(pH_muy_alto);
    FuzzyRuleConsequent *then_add_acid_fast= new FuzzyRuleConsequent();
    then_add_acid_fast->addOutput(add_acid_fast);
    FuzzyRule *fuzzyRule5 = new FuzzyRule(5,if_pH_muy_alto,then_add_acid_fast);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule5);

//-------------------------------------------------------------------------------------//
//----------------------- Reglas para control de la ELECTRO-CONDUCTIVIDAD--------------//
//-------------------------------------------------------------------------------------//

  //_____________________________________REGLA 6_____________________________________//
    FuzzyRuleAntecedent* if_EC_MUY_ALTO = new FuzzyRuleAntecedent();
    if_ EC_MUY_ALTO ->joinSingle(EC_MUY_ALTO);
    FuzzyRuleConsequent* then_add_AGUA = new FuzzyRuleConsequent();
    then_add_AGUA->addOutput(add_Agua);
    FuzzyRule* fuzzyRule6 = new FuzzyRule(6, if_EC_MUY_ALTO, then_add_AGUA);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule6);

  //_____________________________________REGLA 7_____________________________________//
    FuzzyRuleAntecedent* if_EC_ALTO = new FuzzyRuleAntecedent();
    if_ EC_ALTO ->joinSingle(EC_ALTO);
    FuzzyRuleConsequent* then_add_poca_Agua = new FuzzyRuleConsequent();
    then_add_poca_Agua ->addOutput(add_poca_Agua);
    FuzzyRule* fuzzyRule7 = new FuzzyRule(7, if_EC_ALTO, then_add_poca_Agua);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule7);

  //_____________________________________REGLA 8_____________________________________//
    FuzzyRuleAntecedent* if_EC_NORMAL = new FuzzyRuleAntecedent();
    if_EC_POCO_BAJO->joinSingle(EC_POCO_BAJO);
    FuzzyRuleConsequent* then_add_NN = new FuzzyRuleConsequent();
    then_add_NN->addOutput(add_NN);
    FuzzyRule* fuzzyRule8 = new FuzzyRule(8, if_EC_NORMAL, then_add_NN);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule8);

  //_____________________________________REGLA 9_____________________________________//
    FuzzyRuleAntecedent* if_EC_BAJO = new FuzzyRuleAntecedent();
    if_EC_BAJO->joinSingle(EC_BAJO);
    FuzzyRuleConsequent* then_add_SN = new FuzzyRuleConsequent();
    then_add_SN->addOutput(add_SN);
    FuzzyRule* fuzzyRule9= new FuzzyRule(9, if_EC_BAJO, then_add_SN);
```

Nota. Se muestra la parte principal del código desarrollado con el IDE de Arduino para el control del sistema.

Anexo E

Hojas de datos

Datasheet - ESP32.

Product Overview

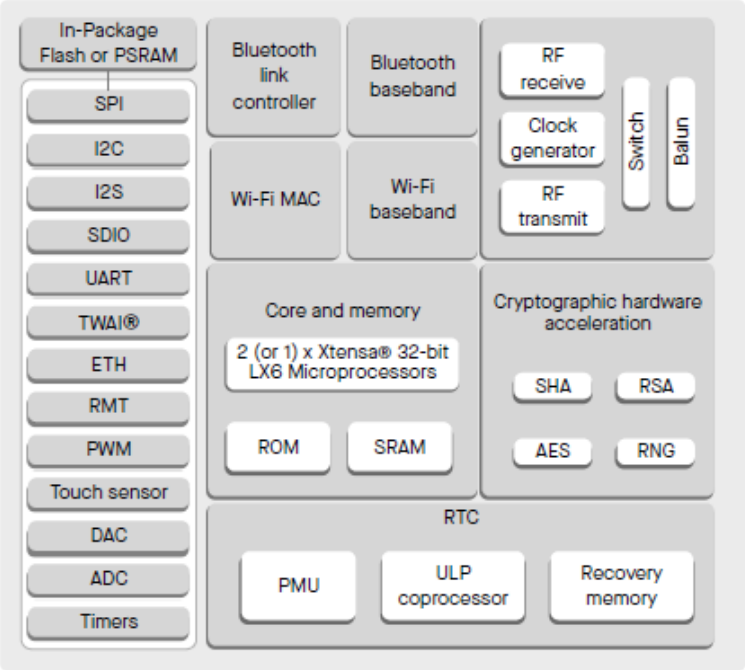
ESP32 is a single 2.4 GHz Wi-Fi-and-Bluetooth combo chip designed with the TSMC low-power 40 nm technology. It is designed to achieve the best power and RF performance, showing robustness, versatility and reliability in a wide variety of applications and power scenarios.

The ESP32 series of chips includes ESP32-D0WD-V3, ESP32-D0WDR2-V3, ESP32-U4WDH, ESP32-S0WD (NRND), ESP32-D0WDQ6-V3 (NRND), ESP32-D0WD (NRND), and ESP32-D0WDQ6 (NRND), among which,

- ESP32-S0WD (NRND), ESP32-D0WD (NRND), and ESP32-D0WDQ6 (NRND) are based on chip revision v1 or chip revision v1.1.
- ESP32-D0WD-V3, ESP32-D0WDR2-V3, ESP32-U4WDH, and ESP32-D0WDQ6-V3 (NRND) are based on chip revision v3.0 or chip revision v3.1.

For details on part numbers and ordering information, please refer to Section 1 ESP32 Series Comparison. For details on chip revisions, please refer to *ESP32 Chip Revision v3.0 User Guide* and *ESP32 Series SoC Errata*.

The functional block diagram of the SoC is shown below.



ESP32 Functional Block Diagram

Datasheet - SENSOR PH

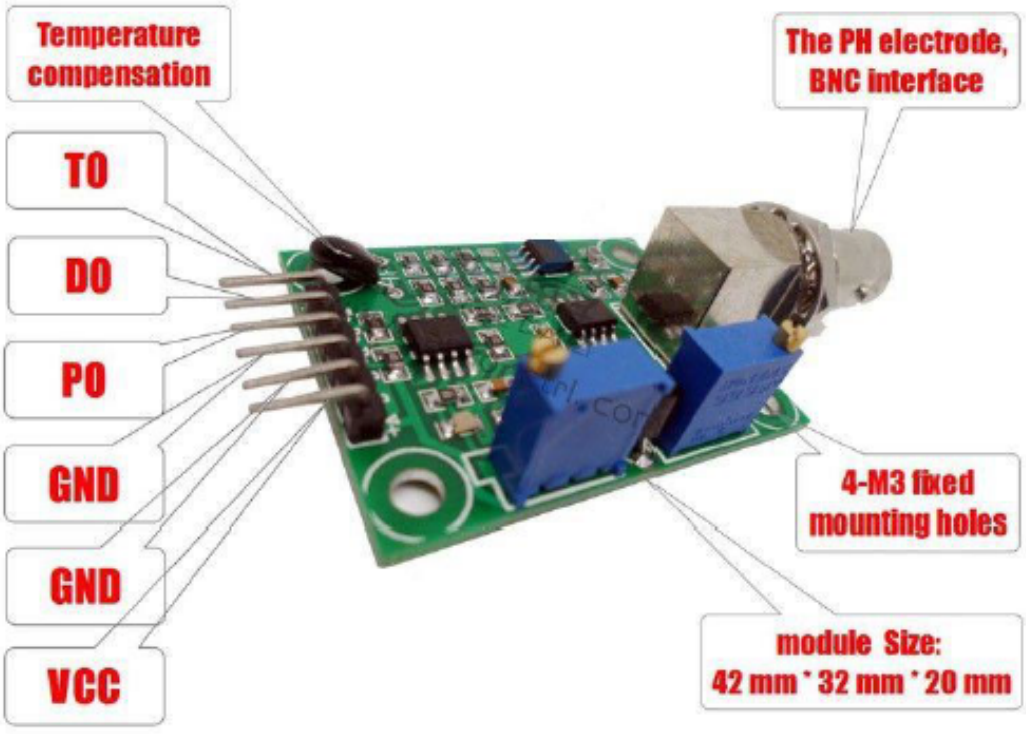
How to use a PH probe and sensor

If you worked with PH metering before you will know that PH values range from 0-14. Where PH 0 Will be very acidic, PH 7 will be neutral and PH 14 very alkaline. Water is near a PH 7 and this is usually around here that we will need to monitor PH of many things. A swimming pool, for example, should be slightly alkaline at 7.2, hydroponics systems around 6 (for optimum plant nutrition takeup) and aquaponics around 6.8.

I wrote this **PH probe and sensor** "how to" because it is not as straightforward as one would think (but quite easy when you understand the ins and outs) mostly because there is not a lot of information on this on the Internet, surely not detailed information.

We will first look at the ph probe module board and then the PH probe because both the PH probe and sensor have to be set correctly:

- offset setting
- limit setting
- sketch to test the board analogue range
- sketch for PH reading and calibration.
- calibration of PH probe
- PH probe usage
  The ph probe module in this tutorial is available on our site here: PH probe module BNC conector



Datasheet - Sensor electro-conductividad.

Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor / Meter(K=10)

SKU:DFR0300-H

INTRODUCTION

DFRobot Gravity: analog electrical conductivity sensor/meter(K=10) is particularly used to measure the high electrical conductivity liquid, such as seawater, concentrated brine, etc. The measurement range is up to 100ms/cm. This product is suitable for the water quality application of mariculture, for example, marine fisheries, marine aquariums.

It supports 3~5v wide voltage input, and is compatible with 5V and 3.3V main control board, such as Arduino and Raspberry Pi. The excitation source adopts AC signal, which effectively reduces the polarization effect, improves the precision and prolongs the life of the probe; The software library uses single-point calibration method, and can automatically identify standard buffer solution, so simple and convenient.

With this product, main control board (such as Arduino) and the software library, you can quickly build an electrical conductivity meter, plug and play, no solding required, which providing a set of plug-and-play conductivity measurement solution for makers.

Datasheet - Sensor de temperatura – DS18B20.

Click here for production status of specific part numbers.

DS18B20

Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

General Description

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

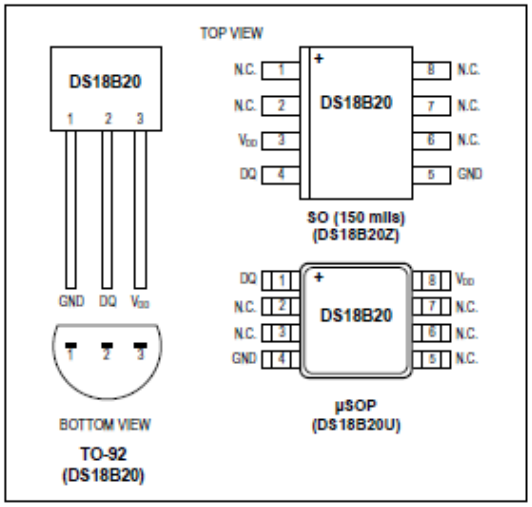
Applications

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

Benefits and Features

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
  - Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
  - ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
  - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
  - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
  - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin µSOP, and 3-Pin TO-92 Packages

Pin Configurations



Ordering Information appears at end of data sheet.

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

maxim integrated™

19-7487; Rev 6; 7/19

Datasheet - Relé 5V.

SONGLE RELAY

松乐继电器 ® SONGLE RELAY	RELAY ISO9002	SRD

1. MAIN FEATURES

- Switching capacity available by 10A in spite of small size design for highdensity P.C. board mounting technique.
- UL,CUL,TUV recognized.
- Selection of plastic material for high temperature and better chemical solution performance.
- Sealed types available.
- Simple relay magnetic circuit to meet low cost of mass production.

2. APPLICATIONS

- Domestic appliance, office machine, audio, equipment, automobile, etc.
  (Remote control TV receiver, monitor display, audio equipment high rushing current use application.)

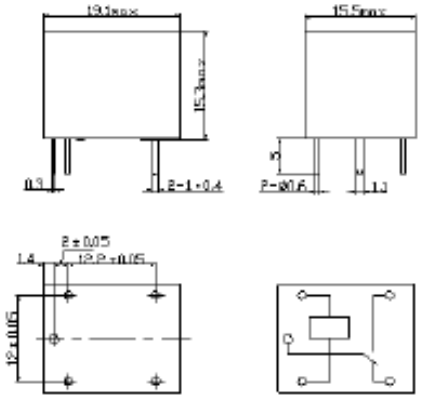
3. ORDERING INFORMATION

SRD	XX VDC	S	L	C
Model of relay	Nominal coil voltage	Structure	Coil sensitivity	Contact form
SRD	03、05、06、09、12、24、48VDC	S:Sealed type	L:0.36W	A:1 form A
				B:1 form B
		F:Flux free type	D:0.45W	C:1 form C

4. RATING

CCC	FILE NUMBER:CH0052885-2000	7A/240VDC
CCC	FILE NUMBER:CH0036746-99	10A/250VDC
UL /CUL	FILE NUMBER: E167996	10A/125VAC 28VDC
TUV	FILE NUMBER: R9933789	10A/240VAC 28VDC

5. DIMENSION(unit:mm) DRILLING(unit:mm) WIRING DIAGRAM



Datasheet - HC – SR04(Sensor de ultrasonido)

Tech Support: services@elecfreaks.com

Ultrasonic Ranging Module HC - SR04

Product features:

Ultrasonic ranging module HC - SR04 provides 2cm - 400cm non-contact measurement function, the ranging accuracy can reach to 3mm. The modules includes ultrasonic transmitters, receiver and control circuit. The basic principle of work:
(1) Using IO trigger for at least 10us high level signal,
(2) The Module automatically sends eight 40 kHz and detect whether there is a pulse signal back.
(3) IF the signal back, through high level , time of high output IO duration is the time from sending ultrasonic to returning.
Test distance = (high level time×velocity of sound (340M/S) / 2,

Wire connecting direct as following:

- 5V Supply
- Trigger Pulse Input
- Echo Pulse Output
- 0V Ground

Electric Parameter

Working Voltage	DC 5 V
Working Current	15mA
Working Frequency	40Hz
Max Range	4m
Min Range	2cm
MeasuringAngle	15 degree
Trigger Input Signal	10uS TTL pulse
Echo Output Signal	Input TTL lever signal and the range in proportion
Dimension	45*20*15mm

Datasheet - RTC – DS3231

DS3231

Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal

General Description

The DS3231 is a low-cost, extremely accurate I²C real-time clock (RTC) with an integrated temperature-compensated crystal oscillator (TCXO) and crystal. The device incorporates a battery input, and maintains accurate timekeeping when main power to the device is interrupted. The integration of the crystal resonator enhances the long-term accuracy of the device as well as reduces the piece-part count in a manufacturing line. The DS3231 is available in commercial and industrial temperature ranges, and is offered in a 16-pin, 300-mil SO package.

The RTC maintains seconds, minutes, hours, day, date, month, and year information. The date at the end of the month is automatically adjusted for months with fewer than 31 days, including corrections for leap year. The clock operates in either the 24-hour or 12-hour format with an AM/PM indicator. Two programmable time-of-day alarms and a programmable square-wave output are provided. Address and data are transferred serially through an I²C bidirectional bus.

A precision temperature-compensated voltage reference and comparator circuit monitors the status of V_{CC} to detect power failures, to provide a reset output, and to automatically switch to the backup supply when necessary. Additionally, the $\overline{RST}$ pin is monitored as a pushbutton input for generating a µP reset.

Benefits and Features

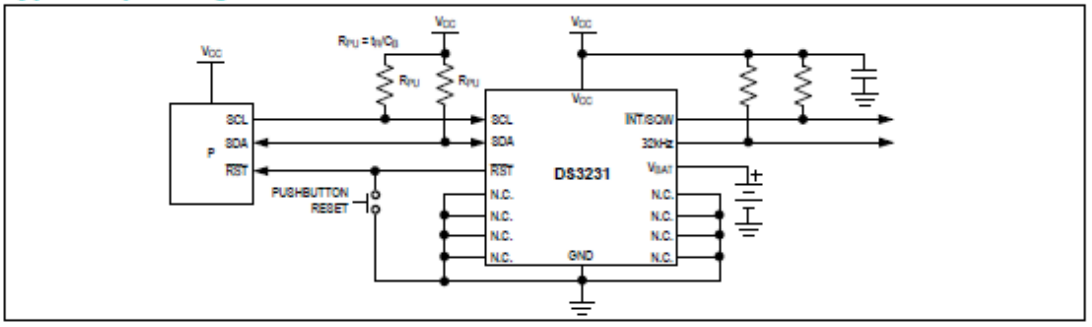
- Highly Accurate RTC Completely Manages All Timekeeping Functions
  - Real-Time Clock Counts Seconds, Minutes, Hours, Date of the Month, Month, Day of the Week, and Year, with Leap-Year Compensation Valid Up to 2100
  - Accuracy ±2ppm from 0°C to +40°C
  - Accuracy ±3.5ppm from -40°C to +85°C
  - Digital Temp Sensor Output: ±3°C Accuracy
  - Register for Aging Trim
  - $\overline{RST}$ Output/Pushbutton Reset Debounce Input
  - Two Time-of-Day Alarms
  - Programmable Square-Wave Output Signal
- Simple Serial Interface Connects to Most Microcontrollers
  - Fast (400kHz) I²C Interface
- Battery-Backup Input for Continuous Timekeeping
  - Low Power Operation Extends Battery-Backup Run Time
  - 3.3V Operation
- Operating Temperature Ranges: Commercial (0°C to +70°C) and Industrial (-40°C to +85°C)
- Underwriters Laboratories® (UL) Recognized

Applications

- Servers
- Telematics
- Utility Power Meters
- GPS

Ordering Information and Pin Configuration appear at end of data sheet.

Typical Operating Circuit



Underwriters Laboratories is a registered certification mark of Underwriters Laboratories Inc.

maxim integrated.

19-5170; Rev 10; 3/15