

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA EL CONTROL Y
MONITOREO DE VARIABLES APLICADO A UN CULTIVO ACUAPÓNICO A
PEQUEÑA ESCALA BASADO EN IOT**

**BRAYAN PIÑEROS BOLÍVAR
CRISTIAN MATEO BORRAEZ HERNÁNDEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
BOGOTÁ, 2019**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA EL CONTROL Y
MONITOREO DE VARIABLES APLICADO A UN CULTIVO ACUAPÓNICO A
PEQUEÑA ESCALA BASADO EN IOT**

**BRAYAN PIÑEROS BOLÍVAR
CRISTIAN MATEO BORRAEZ HERNÁNDEZ**

**Director: Msc. OSCAR MAURICIO GELVEZ
Codirector: PhD. JOSE GUILLERMO GUARNIZO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
BOGOTÁ, 2019**

Dedicado a nuestros padres por su apoyo incondicional en este proyecto

AGRADECIMIENTOS

A los Ingenieros Oscar Gélvez y Guillermo Guarnizo, directores de este proyecto por su colaboración en el transcurso de este proyecto.

A la Facultad de Ingeniería Ambiental, por la colaboración prestada del espacio físico necesario para el montaje del sistema acuapónico construido (Laboratorio de procesos ambientales) de Ingeniería Ambiental.

Al laboratorista Alan García encargado de los laboratorios de Ingeniería Ambiental por la ayuda y colaboración prestada para el desarrollo del proyecto.

A la Ingeniera Ambien Dayam Soret Calderon Rivera, por su colaboración y asesoría en las variables ambientales del sistema acuapónico.

¡Muchas gracias a todos!

GLOSARIO

ACUAPONIA: Es el resultado de la integración de la producción de peces (acuicultura) y de plantas sin suelo (hidroponía) dentro de un sistema cerrado [1].

ACUICULTURA: Técnica de dirigir y fomentar la reproducción de peces, moluscos y algas en agua dulce o salada [2].

CONTROL: Conjunto de mecanismos y dispositivos que regulan el funcionamiento de una máquina, un aparato o un sistema [3].

CULTIVO: Es la práctica de sembrar semillas en la tierra y realizar las labores necesarias para obtener frutos de estas [4].

DATOS: Representación de una variable que puede ser cuantitativa o cualitativa, indica un valor que se le asigna a las cosas. Los datos son información [5].

HIDROPONIA: Método de cultivo industrial de plantas que en lugar de tierra utiliza únicamente soluciones acuosas con nutrientes químicos disueltos, o con sustratos estériles (arena, grava, vidrio molido...) como soporte de la raíz de las plantas [6].

HORTALIZAS: Conjunto de plantas cultivadas generalmente en huertas o regadíos, que se consumen como alimento, ya sea de forma cruda o cocida [7].

INTERNET DE LAS COSAS: Es una red de objetos físicos –vehículos, máquinas, electrodomésticos y más– que utiliza sensores y API (interfaz de programación de aplicaciones) para conectarse e intercambiar datos por internet [8].

OZONO: Gas muy oxidante de color azulado, que se forma en la ozonósfera y que protege la Tierra de la acción de los rayos ultravioleta del Sol [9].

PH: Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa [10].

PROGRAMACIÓN: La acción de crear programas o aplicaciones, a través del desarrollo de un código fuente [11].

PYTHON: Python es un lenguaje de *scripting* independiente de plataforma y orientado a objetos, preparado para realizar cualquier tipo de programa, desde aplicaciones Windows a servidores de red o incluso, páginas web [12].

RASPBERRY PI: Es un ordenador de placa reducida, ordenador de placa única u ordenador de placa simple de bajo coste desarrollado en el Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi [13].

RED INALÁMBRICA: El concepto se utiliza para nombrar al conjunto de los equipos informáticos interconectados que comparten servicios, información y recursos [14].

SENSOR: Dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente [15].

SISTEMA DE CONTROL: Es un conjunto de elementos que permite mediante la manipulación de variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores preestablecidos [16].

SISTEMA DE RETROALIMENTACIÓN: Es un mecanismo de control de sistemas en el cual los resultados obtenidos de una tarea o actividad son reintroducidos en el sistema con la finalidad de incidir o actuar sobre las decisiones o acciones futuras [17].

TEMPERATURA: Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente, y cuya unidad en el sistema internacional es el kelvin (K) [18].

CONTENIDO

1.	RESUMEN	10
2.	INTRODUCCIÓN	11
3.	OBJETIVOS	12
4.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
5.	JUSTIFICACIÓN	15
6.	ESTADO DEL ARTE	16
7.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA ACUAPÓNICO A PEQUEÑA ESCALA	18
7.1	INTRODUCCIÓN	18
7.2	VARIABLES	20
8.	NIVEL DE AGUA	26
8.1	SELECCIÓN DE SENSOR Y ACTUADOR	26
8.2	CARACTERIZACIÓN	27
8.3	IMPLEMENTACIÓN	29
8.4	CONTROL DEL NIVEL DE AGUA	33
9.	TEMPERATURA DEL AGUA.....	37
9.1	SELECCIÓN DE SENSOR Y ACTUADOR	37
9.2	CARACTERIZACIÓN	39
9.3	IMPLEMENTACIÓN	41
9.4	CONTROL DE TEMPERATURA EN EL AGUA	43
9.4.1	PRUEBAS	43
10.	pH (POTENCIAL DE HIDROGENO)	46
10.1	SELECCIÓN DE SENSOR Y ACTUADOR	46
10.2	CARACTERIZACIÓN	47
10.3	IMPLEMENTACIÓN	50
10.4	CONTROL DE PH	54
11.	MONITOREO DE TEMPERATURA AMBIENTE Y OZONO	58
11.1	SELECCIÓN DE SENSORES	58
11.2	CARACTERIZACIÓN	60
11.3	IMPLEMENTACIÓN	61

12.	VISUALIZACIÓN DE VARIABLES DEL SISTEMA ACUAPONÍCO GENERAL POR THINGSPEAK Y BLYNK	64
12.2	NIVEL DE AGUA	66
12.3	TEMPERATURA EN EL AGUA	67
12.4	PH.....	69
12.5	TEMPERATURA EN EL AMBIENTE	71
12.6	OZONO.....	71
13.	CONCLUSIONES GENERALES.....	73
14.	TRABAJOS FUTUROS	74
15.	Bibliografía.....	75
16.	ANEXOS	77
	ANEXO A	77
	ANEXO B	79
	ANEXO C	82
	ANEXO D	83

ABSTRACT

This project presents the design and implementation of an aquaponic system, the supervision and control of some variable stories such as temperature, level in the tank and ph index in the water, thus seeking to control an adequate air circulation and circulation of the same, looking for sure a good quality of the habitat, eliminating possible remains of food not consumed, allowing a balance between plants and animals.

The need to generate a social impact in the production of food for the human being led to the supervision and control of different system variables from a remote access via the Internet, for the small-scale production of an aquaponic crop applied in urban areas with sustainable organic crops.

Keywords: Aquaponics, Internet of things, Ozone, pH, Python, Raspberry Pi, Sensor, Control system, Temperature.

1. RESUMEN

Este proyecto presenta el diseño e implementación de un sistema acuapónico, con supervisión y control de algunas variables tales como temperatura, nivel en el tanque e índice de pH en el agua, buscando con esto garantizar una adecuada aireación y circulación de la misma, buscando asegurar una buena calidad del hábitat, eliminando posibles restos de alimentos no consumidos, manteniendo un equilibrio entre plantas y animales.

La necesidad de generar un impacto social en la producción de alimentos para el ser humano condujo a que en el presente trabajo se realizara supervisión y control de diferentes variables del sistema desde un acceso remoto vía Internet, para la producción a pequeña escala de un cultivo acuapónico aplicado en áreas urbanas con cultivos ecológicos sostenibles.

Palabras clave: Acuaponía, Internet de las cosas, Ozono, pH, Python, Raspberry Pi, Sensor, Sistema de control, Temperatura.

2. INTRODUCCIÓN

La acuaponía es una de las técnicas innovadoras de agricultura que permite tener un sistema de producción de vegetales y animales acuáticos en conjunto. El objetivo de esta técnica de cultivo es crear un ciclo en el que se aprovechen los elementos del cultivo y que para ello resulte ecológico, de ser así, supone un considerable ahorro de agua y fertilizantes. Las ventajas de la acuaponía es que no necesita de tierra fértil, ni de grandes espacios, ni de grandes cantidades de agua y menos de pesticidas. Algunos hogares en el mundo han incorporado esta alternativa para proveerse de alimentos orgánicos [19].

Según la FAO (Food and Agriculture Organization) para el 2030 el 60% de la población en vías desarrollo estará asentada en las ciudades, adoptando así esta forma de agricultura urbana. Será muy común para entonces que cada familia adapte terrazas y balcones con cultivos hidropónicos y acuícolas [2].

Una alternativa de solución a los problemas de hambre y desnutrición en el mundo es que países como Colombia, cuentan con el apoyo del gobierno nacional para capacitar a muchas familias para generar provisión de alimentos y a su vez tener una fuente de ingresos. También se anticipa a los problemas de espacio que empeoran con la sobrepoblación mundial, invitando a las personas que adaptan en sus hogares este micro ecosistema para no disminuir su calidad de vida a través de una buena alimentación y contribuir al cuidado del planeta.

La importancia de este proyecto se centra en el desarrollo de un sistema controlado que permita mejorar el rendimiento de producción de los sistemas acuapónicos tradicionales. El prototipo diseñado y desarrollado sirve para implementarlo a nivel productivo.

Este trabajo aborda la problemática que incluye áreas del conocimiento Tales como: electrónica, control, agricultura, Biología o procesos ambientales enfocados a un sistema acuapónico aportando soluciones desde el campo de ingeniería, se reitera el desarrollo de sistemas multidisciplinarias que permiten potencializar el agro colombiano.

3. OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema que permita el control y monitoreo de variables aplicado a un cultivo acuapónico a pequeña escala, a partir de una aplicación bajo el concepto IoT.

Objetivos específicos

- Diseñar un sistema para la medición de las variables temperatura en el ambiente y agua, nivel de agua, pH y oxigenación por medio de sensores.
- Implementar el sistema para la medición de las variables en un cultivo acuapónico.
- Controlar la temperatura del agua, pH y el nivel del agua en el sistema acuapónico.
- Desarrollar una aplicación bajo el concepto de IoT que permita el monitoreo y la variación de referencias en las acciones de control de las variables del cultivo acuapónico.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el sector agrícola, la acuaponía es una técnica de cultivo en la cual se obtienen peces y hortalizas en un mismo sistema de producción. *Es la combinación de un sistema de acuicultura de recirculación con un sistema hidropónico en el cual las plantas reciben la mayoría de los nutrientes necesarios para su crecimiento directamente del agua de cultivo de los peces [20]. Esta técnica de cultivo permite el ahorro de agua y reduce la contaminación de la misma en más del 80% [21].* Para producir hortalizas se requiere tener una amplia extensión de terreno; llevando a realizar la producción en la periferia de las ciudades o en sectores rurales, adicionalmente las condiciones climáticas cambiantes e inesperadas generan una producción variada para un mismo producto, afectando el costo del mismo. Los fenómenos climatológicos adversos, tales como las sequías prolongadas, nevadas, inundaciones y heladas afectan los terrenos limitando por períodos prolongados la posibilidad de producción constante de hortalizas, generando precios variables. A partir de los anteriores argumentos, el presente proyecto contempla el diseño e implementación de un sistema para monitoreo de temperatura y oxigenación mediante sensores, pH y nivel de agua de un cultivo acuapónico; permitiendo mitigar la variación de las condiciones climáticas reduciendo y estandarizando el costo de producción, la problemática de no monitorear estos cultivos de hidroponía y acuicultura genera un desestabilidad en el sistema acuapónico en cuanto a las variables aplicadas tanto en sus peces y hortalizas, por lo tanto utilizando la tendencia emergente del IoT (Internet of things o Internet de las cosas), se proporciona datos de sensado al almacenamiento en la nube para un monitoreo sobre el cultivo hidropónico y acuícola dando resultado un cultivo acuapónico.

5. JUSTIFICACIÓN

La Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP), plantea su plan estratégico institucional en cual se establece como principal objetivo de desarrollo integral y sostenible de la pesca y la acuicultura en todo el territorio nacional. Las limitantes estructurales, políticas, económicas, sociales, han impedido que el dinamismo económico de los últimos años afecte directamente las condiciones de vida de los pobladores rurales y el desempeño de actividades agropecuarios [22].

La vigencia 2015 es un periodo de inicio a una etapa de transformación y de apuesta por el campo; el sector agropecuario contribuye de manera importante al desarrollo social y económico del país, de aquí que más del 80% del territorio nacional está formado por municipios netamente rurales y que el 30% de la población del país habite estas zonas [23]. La técnica de cultivo acuapónico está siendo regulada por la Autoridad Nacional de Acuicultura Y Pesca y planea un desarrollo integral como una alternativa productiva, rentable y amigable con el ambiente.

La acuicultura y la hidroponía como técnicas de cultivo, aprovechan la reutilización de recursos, es decir, que, en los tanques implementados para los peces, la sedimentación que ocasiona produce materia, aplicándose a un filtro biológico donde las bacterias se transforman con el fin de generar nitritos y nitratos para las plantas; el control y monitoreo de cultivos permitiría mayor facilidad para la generación de las sustancias aplicadas a las hortalizas, a su vez de que genere estabilidad en el cultivo. Mediante una plataforma web de análisis de IoT se permite el almacenamiento de datos en la nube facilitando su visualización desde lugares remotos, proporcionando datos de los sensores a los recursos de almacenamiento en la nube donde los datos se procesan y analizan para obtener información importante respecto al monitoreo del sistema acuapónico.

6. ESTADO DEL ARTE

La acuaponía es una combinación de peces y plantas en un sistema de producción, hay diferentes técnicas de cultivos como lo es aguas profundas, esta prepara el nutriente en agua; para que la planta crezca e influyen variables medioambientales como: salinidad, temperatura de intensidad de luz, salinidad [24].

La problemática que se genera en los suelos de América Latina, es la erosión hídrica, la cual afecta a Colombia en un 80% y 40% en el mundo, causando aumento de población en 1.6% por año según OMS, por ello se estima que para el 2050 se requiere un 70% más de alimentos que ahora [25].

Se conoce otra técnica que se trata de agricultura de precisión, lo cual localiza el cultivo por medio de GPS, contiene programas de geolocalización y sensores recopilando datos para controlar la parte eléctrica y variables del sistema, y puede producir lechuga, pimiento y tomate [26] .

El diseño del sistema debe llevar un microcontrolador, siendo PLC (controlador lógico programable) o Arduino; en las aguas profundas el nivel de pH debe estar entre 6.0 y 7.5, esta es medida por un sensor, funciona por señal eléctrica a una tarjeta de desarrollo, pero si sale de los límites de activa un servomotor a una electroválvula, allí entra una solución que disminuye el pH del agua.

Los sistemas acuapónicos tradicionales usan dos tanques, el cultivo hidropónico puede está ubicado sobre el tanque de los peces, transfieren agua por tubería, el tanque de los peces tiene electroválvula para salir y entrar agua [27].

En Asia y Europa cultivan la lechuga en sistemas hidropónicos con NFT, técnica de película de nutrientes, dentro de una canal impermeable con nutrientes y agua, es utilizada para áreas pequeñas y ayuda la erosión de los suelos, independiente de las heladas, tormentas e inundaciones, esto es una forma económica para producir vegetales en ciclos cerrados, con menos contaminación por uso de fertilizantes, reduciendo el precio final [28].

El desarrollo de un sistema hidropónico se puede implementar en un entorno social urbana de producción agrícola con sensores y un sistema de control automático.

Los sensores se usan en los sistemas de control para la agricultura tomando en cuenta los avances de las tecnologías de la información, los sistemas de control reemplazan la atención constante de los agricultores, por ello produce vegetales y frutas mediante un control preciso [29].

En Japón hay sistemas de control ambiental, estos recopilan datos con estándares de UECs [29]. Pero tiene desventajas como los costos de la instalación de los sensores y cableado, la comunicación de los sensores es por medio de una red inalámbrica, también se usa para otras aplicaciones como detección de suelos, control de riego, detección de humedad y temperatura. Una red de sensores genera pérdidas en la recepción de datos, usa tecnología Zigbee en el estándar 802.15.4, este protocolo tiene poco consumo de potencia. En Japón hay la banda 433 Mhz, con propagación factible. El estándar IEEE 802.15.6 utiliza transmisión reservada usando funciones de procesamiento [30].

Un sistema hidropónico sostenible, controla sus variables por medio de los actuadores y sensores conectados por red inalámbrica, a partir de una plataforma web o móvil; el internet de las cosas unifica los datos enviados para que el usuario acceda a ellos y monitoree su sistema; allí nace la unión de una infraestructura de una red en sistemas informáticos con virtualización de datos, disponibles en la internet generando valor sobre los usuarios.

Los dispositivos de identificación de radiofrecuencia se usan en la conexión del internet de las cosas obteniendo información por señales de frecuencia, estos sensores se conectan por nodos creando redes inalámbricas que detectan diferentes fenómenos como: temperatura, presión. Los agricultores acceden a la información por multimedia [31].

Algunas veces los controladores PID no son una buena opción para las aplicaciones agrícolas por los complejos matemáticos. La lógica difusa es usada para el proceso de control de manipulación de sistemas complejos no lineales, recibiendo una entrada de reglas escritas con variables lingüísticas

En un invernadero combina la red RBF con el controlador PID, para el control de clima en invernaderos [32], hay numerosas variables del sistema que afectan al invernadero, se evidencio un control robusto para el sistema lineal no complejo de temperatura, pueda proporcionar una estrategia de control para la producción el invernadero [33].

7. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA ACUAPÓNICO A PEQUEÑA ESCALA

7.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas acuapónicos dan la opción de producir su propio alimento orgánico de peces y plantas en área urbana o rural. Este proyecto se basó en el diseño en implementación de un sistema acuapónico para el control de variables fisicoquímicas como pH, temperatura, nivel de agua y monitoreo de variables medioambientales como temperatura y oxigenación como se muestra en la Figura 1.

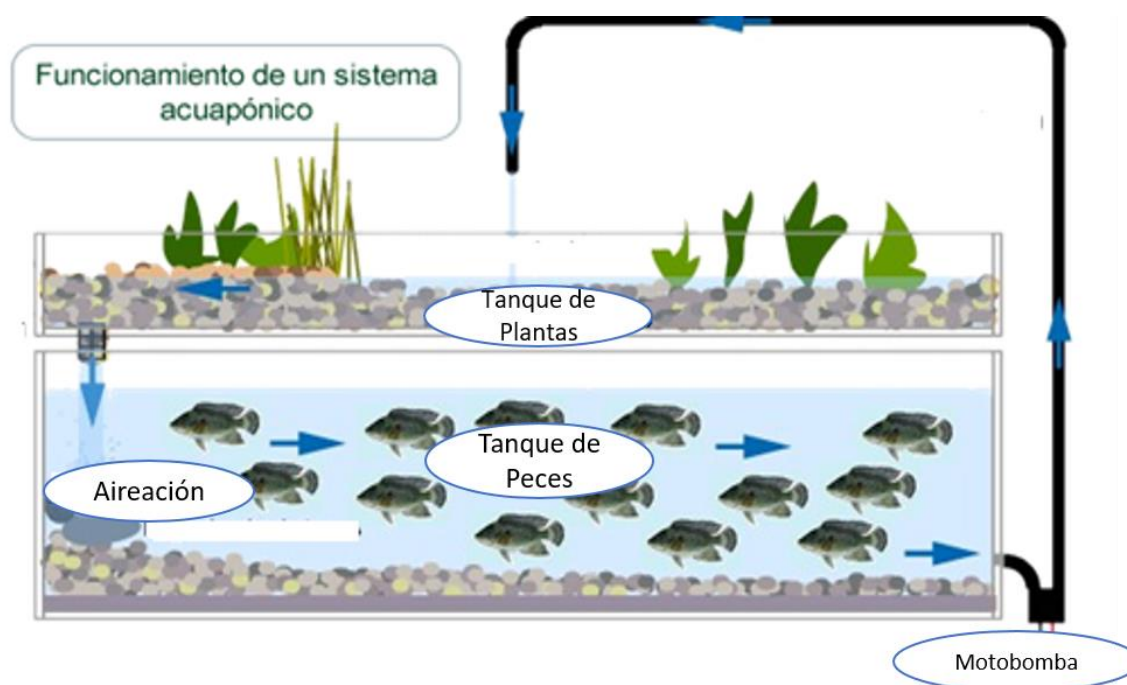


Figura 1. Configuración general de un sistema acuapónico [34].

El montaje fue desarrollado en el laboratorio de procesos ambientales de la Facultad de Ingeniería Ambiental durante un periodo de 12 meses, el sistema se diseñó y construyó para una capacidad de cultivo de 4 peces y 5 plantas (ver Figura 2), el tanque de peces cuenta con un volumen de 44 L y un área superficial de 1.02 m^2 con ello se realizaron pruebas para el sistema de control. La implementación del sistema se explica por medio de un diseño metodológico que se muestra en la Figura 3.

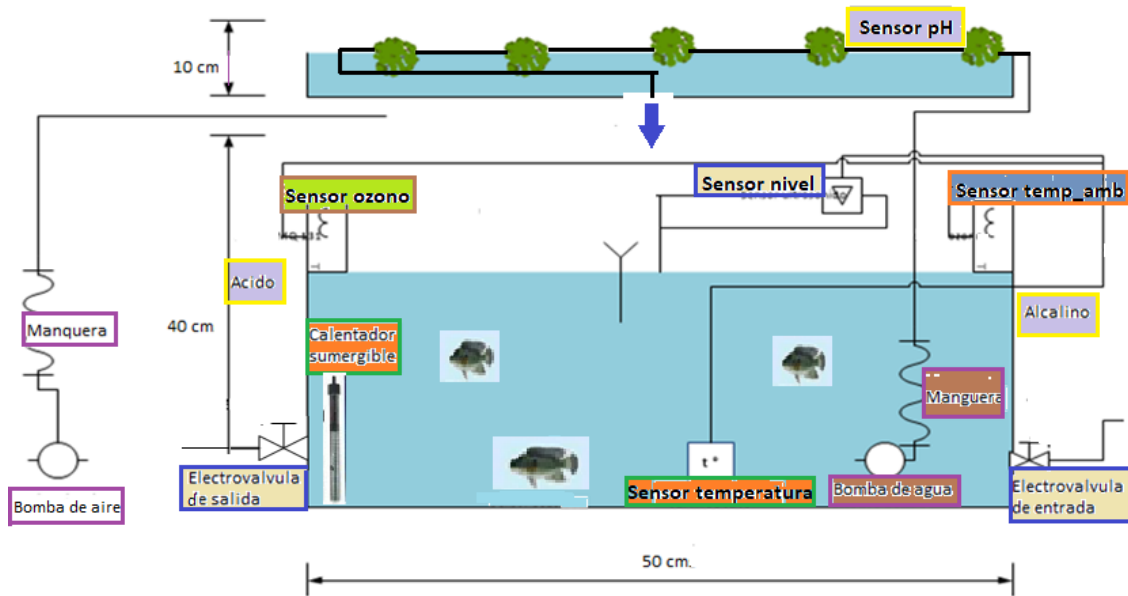


Figura 2 Diseño plano de sistema acuapónico.

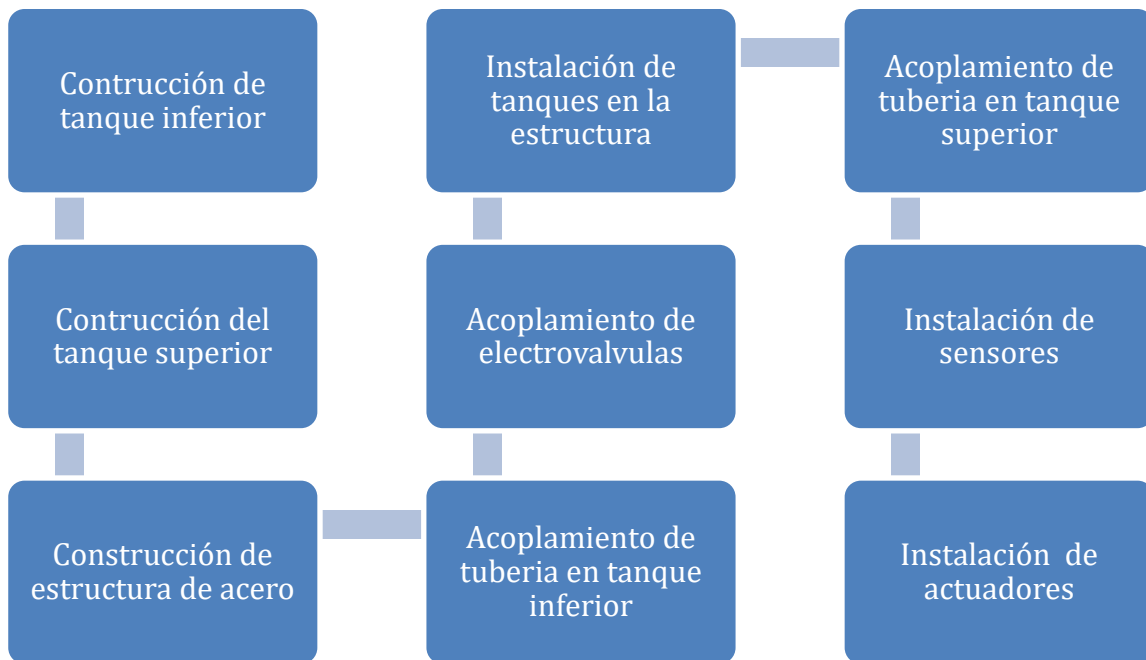


Figura 3 Diseño metodológico del sistema acuapónico.

7.2 VARIABLES

La construcción del sistema acuapónico, se inicia en el modelamiento de los tanques correspondientes a los cultivos de peces y de hortalizas; los sistemas acuapónicos tradicionales usan dos tanques, uno de ellos corresponde a un cultivo hidropónico que puede estar ubicado en la parte superior del sistema sobre el segundo que corresponde a un tanque acuícola ubicado en la parte inferior del mismo.

El tanque superior (plantas) se encarga de transferir agua al tanque inferior (peces) por medio de una tubería, mientras que el tanque inferior tiene como función bombear agua por una manguera hacia el tanque superior, este proceso es conocido como recirculación que minimiza el consumo de agua. El control en la cantidad de líquido introducida al sistema es regulado por electroválvulas.

La mayoría de los tanques utilizados para esta técnica de cultivo son ovoides, con capacidades aproximadas de 100 m³ [35], utilizados generalmente en zonas rurales, las cuales necesitan de gran espacio, pero para casos de sistemas acuapónicos en zonas urbanas se requieren menos recursos y contar con suficiente luz solar.

Para la variable de nivel de agua, se busca un tanque con capacidad de almacenamiento de cinco peces entre tres tipos diferentes que son utilizados para acuaponía; carpa común, bagre del canal, cabeza chata, mientras que para la temperatura el tanque debe soportar temperaturas entre 20 °C y 25 °C; en la Tabla 1, se observa los rangos de temperatura, el alimento requerido, y el pH que necesita estos tipos de peces, y en la Tabla 2 se evidencian las características de los peces tanto de agua fría como de aguas cálidas.

Se sugiere peces de aguas cálidas, debido a que la calidad del ambiente y del agua son versátiles a la hora de controlar la variable de temperatura, además, que la mayoría de los sistemas acuapónicos son implementados en tierra caliente.

Especie de Cultivo	Temperatura (°C)		NAT (mg/l)	Oxígeno (mg/l)	% Proteína en alimento	Tiempo de Crecimiento
	Vital	Optima				
Carpa Común	4 a 34	25 a 30	<1	>4	30 a 38	600gr en 10 meses
Tilapia del Nilo	14 a 36	27 a 30	<2	>4	28 a 32	600gr en 7 meses
Bagre del Canal	5 a 34	25 a 30	<1	>3	25 a 36	400gr en 8 meses
Trucha Arco Iris	10 a 18	14 a 16	<0.5	>6	42	1 kg en 15 meses
Cabeza Chata	8 a 32	20 a 27	<1	>4	30 a 34	750 gr en 10 meses
Camarón de agua dulce	18 a 34	26 a 29	<0.5	>3	35	30 gr en 4 meses

Tabla 1. Requerimientos proteicos y crecimiento de especies acuáticas en sistemas de acuaponía [30].

Tipo de Organismo	T (°C)	pH	NAT(mg/l)	N02 (mg/l)	N03 (mg/l)	OD(mg/l)
Peces aguas cálidas	22-32	6-8.5	<3	<1	<400	4-6
Peces aguas frías	10-18	6-8.5	<1	<0.1	<400	6-8
Plantas	16-30	5.5-7.5	<30	<1	-	>3
Bacterias Nitrificantes	14-34	6-8.5	<3	<1	-	4-8

Tabla 2. Rangos generales de tolerancia de calidad de agua para peces, según Somerville (2014) [30].

Otra característica para tener en cuenta es la presión ejercida de un sistema sobre el otro debido a la cantidad de agua, por lo general, un sistema acuapónico puede variar el diseño en cuanto a la estructura y en la ubicación del tanque, algunos pueden estar a parte del sistema general o debajo del sistema hidropónico. Básicamente, el tanque puede almacenar 44 L por ser un sistema a pequeña escala para estimarse un aproximado de cinco peces, como se muestra en la Figura 4.

A partir de las especificaciones de peces y volumen de agua a utilizar se hace uso de la herramienta zhitov que permite estimar las dimensiones del tanque en función de volumen de agua, además de que gracias a que es un servicio gratuito, se pueden realizar cálculos de materiales de construcción.

Se obtuvieron datos como la capacidad del tanque 0.07 m^3 o 70 L, cantidad de líquido (agua) de 0.04 m^3 o 44 L, un volumen libre 0.03 m^3 o 26 L, además de las medidas correspondientes de largo, ancho y alto, cuadrado inferior 0.18 m^2 , área superficial lateral 0.68 m^2 y capacidad de área total 1.03 m^2 .

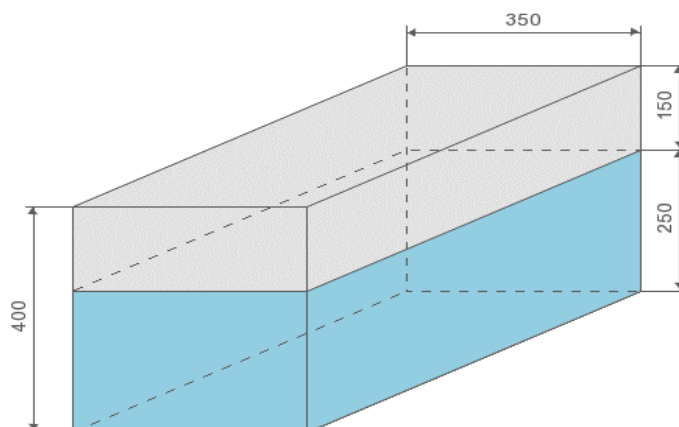


Figura 4. Dimensiones en centímetros del tanque de peces.

Para la selección de las hortalizas, se opta por buscar las de mayor frecuencia de siembra en cultivos acuapónicos, entre ellos se escoge lechuga, perejil o brócoli, ya que el potencial de hidrogeno requerido por estas se encuentran dentro del rango deseado. En la Tabla 3 se muestra pH, tiempo de crecimiento y otras características relevantes para el cultivo de hortalizas.

Especie de Cultivo	pH	Plantas /m2	Termino de Germinación	Tiempo de Crecimiento	T (°C)	Exposición Solar
Albahaca	5.5-6.5	8-40	6-7 días	5-6 semanas	20-25	Moderada/Alta
Coliflor	6-6.5	3-5	4-7 días	2-4 meses	10-20	Alta
Lechugas	6-7	20-25	3-6 días	4-5 semanas	15-22	Moderada/Alta
Pepinos	5.5-6.5	2-5	3-6 días	7-9 semanas	18-26	Alta
Berenjenas	5.5-7	3-5	8-10 días	3-4 meses	15-25	Alta
Morrones	5.5-6.5	3-4	8-12 días	2-3 meses	15-30	Alta
Tomates	5.5-6.5	3-5	4-7 días	2-3 meses	15-25	Alta
Repollo	6-7.2	4-8	4-7 días	6-10 semanas	15-20	Alta
Brócoli	6.7	3-5	4-7 días	2-3 meses	10-20	Moderada/Alta

Acelga	6-7.5	15-20	4-5 días	4-5 semanas	15-25	Moderada/Alta
Perejil	6-7	10-15	8-10 días	3-4 semanas	15-25	Moderada/Alta

Tabla 3. Parámetros y condicionales ambientales para cultivos acuapónicos [30].

Finalmente se establecieron medidas de base iguales al tanque de peces, para facilitar el acople entre este y el de hortalizas, como se observa en la Figura 5.

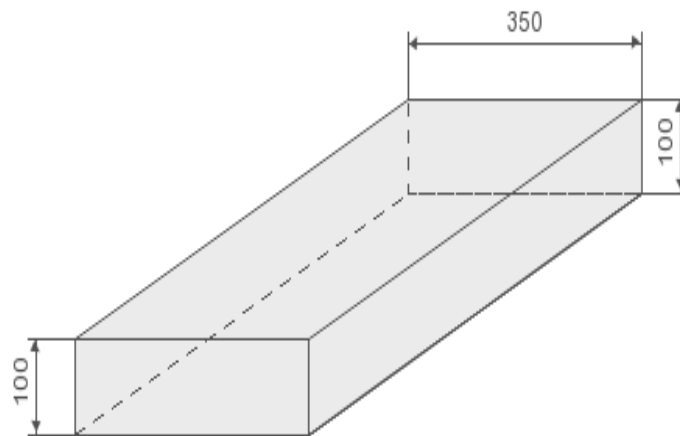


Figura 5. Dimensiones en centímetros del tanque de hortalizas.

Posteriormente, el sistema debe tener una estructura metálica que soporte los dos tanques y componentes del sistema de tal forma, que el de hortalizas guarde simetría vertical con el tanque de peces, ver Figura 6Figura 5.

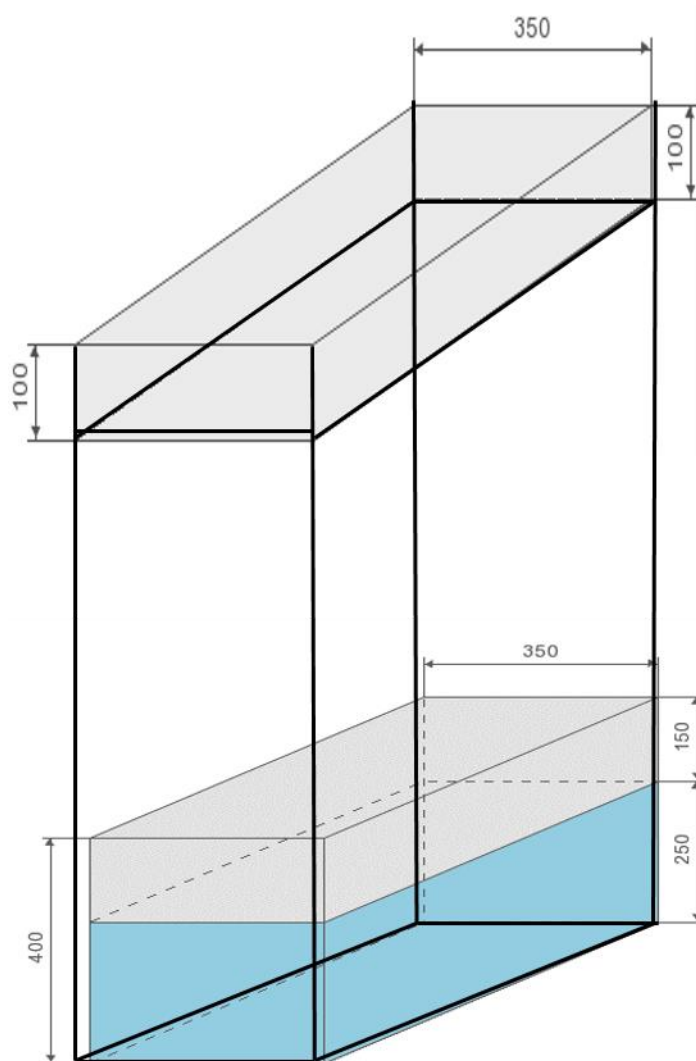


Figura 6. Estructura general del sistema acuapónico.

Para las variables pH y ozono, se tiene en cuenta la cantidad de concentración de oxígeno presente en el tanque acuícola, ya que para generar ozono normalmente se debe tener un motor de aire, el cual suministra el suficiente oxígeno tanto para el agua como para el ambiente en sí. Para el pH la cantidad de concentración en acidez del agua debe contar con un equilibrio tanto para peces como para hortalizas, puesto que de ello depende la supervivencia de estos seres vivos, además de proporcionar un cultivo acuapónico de mayor rendimiento.

La conexión con las electroválvulas que permiten la salida y entrada de agua del tanque desde la llave de suministro, fue realizada con tubería de $\frac{1}{2}$ ", mientras que para la inyección y extracción de agua se utilizó tubería de $\frac{3}{4}$ ". El cultivo de las hortalizas para 7 plantas, fue propuesto desarrollarse en tubería de PVC, debido a

la necesidad de recircular el agua entre el tanque superior e inferior como se observa en la Figura 7.



a)



b)

Figura 7. Tubería usada en el tanque a) superior y b) inferior.

8. NIVEL DE AGUA

8.1 SELECCIÓN DE SENSOR Y ACTUADOR

La selección del sensor se debe a la capacidad de lectura que puede tener, es decir, el rango de lectura del sensor debida a la variación del nivel del agua; existen muchos sensores que realizan esta medición en función de la tecnología la cual puede ser óptica, mecánica, e infrarroja, sin embargo, la elección es realizada en función de costos y características, dentro de las referencias posibles como se observa en la Tabla 4, se tomó el Sensor HC-SR04 (ultrasónico), ver Figura 8. Entre sus múltiples características está el voltaje de operación de 5V, rango de operación de 4.5 cm (máximo) y de 1.7 cm (mínimo) y la duración del pulso enviado (eco) de 10 a 25000 μ S.

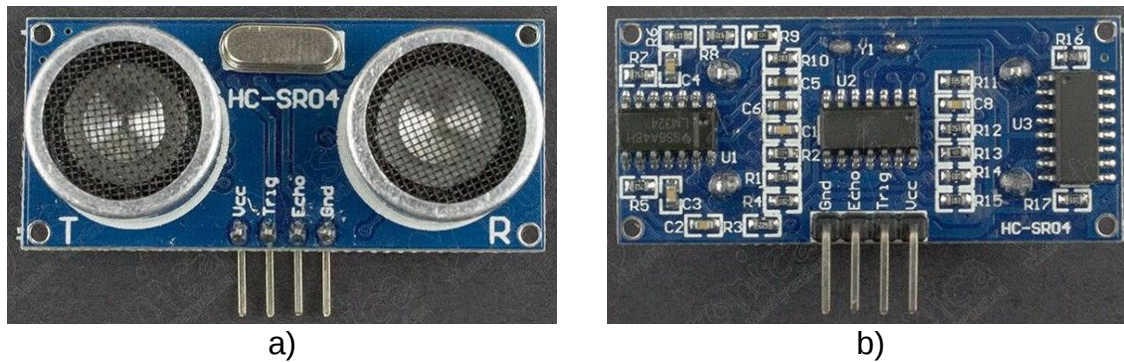


Figura 8. Sensor Ultrasónico HC-SC04 vista a) superior y b) inferior [36].

Sensor de nivel de agua	Sensor de nivel de agua vertical	Sensor HC-SR04
		
Voltaje de operación: 3.5v Corriente de operación: < 200Ma Tipo: análogo Área de detección: 40mm*16mm	Material: Polímero y PP Represión de contacto (Max): 10 Watts Voltaje del switch (Max): 50 VDC	Voltaje de operación: 5V Rango de operación: 4.5cm - 1.7cm Duración de pulso: 10 – 25000 μ S. Costo: 5400

Temperatura de operación: 10 – 30°C	Corriente del switch (Max): 0.5 A	
Humedad: 10 %– 90%	Costo: 130.000	
Costo: 5700		

Tabla 4. Sensores para nivel de agua [36].

A partir del sensor ultrasónico para la detección del nivel de agua, se procede a seleccionar el actuador que permita el paso de agua en las tuberías acopladas al tanque de peces, por tal razón, se usaron electroválvulas tipo ON-OFF, ver Figura 9.

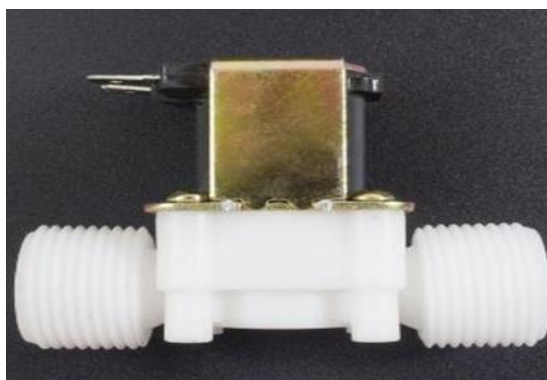


Figura 9. Electroválvula [37].

8.2 CARACTERIZACIÓN

El principio del funcionamiento de un sensor ultrasónico, es el efecto Doppler el cual al generar una onda de sonido mediante un pulso dada por el emisor (trigger), esta retornará al encontrarse con un obstáculo, regresando al sensor y siendo registrada por el receptor, convirtiéndola en un pulso (echo), como se observa en la Figura 10.

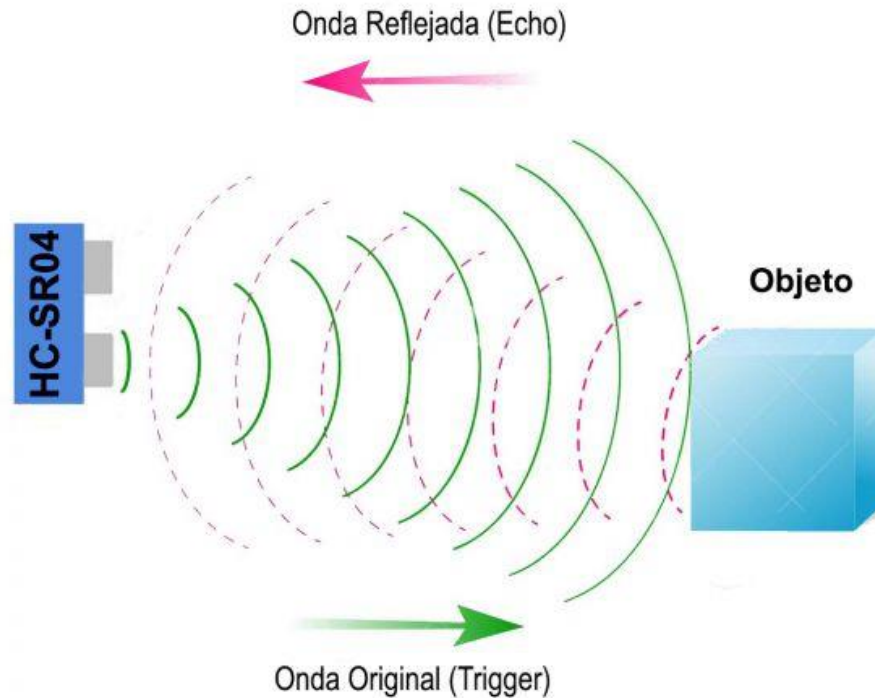


Figura 10. Esquema de funcionamiento del sensor HC-SR04 [34].

Conociendo la velocidad del sonido en el aire (340 m/s), se puede determinar de forma sencilla la distancia exacta a la cual se encuentra el objeto que permite el retorno de la señal, teniendo en cuenta que la velocidad es la relación entre espacio y tiempo. Para conocer la distancia en la que se encuentra un objeto, se debe dividir por dos, debido al recorrido de la onda (ida y vuelta).

La siguiente Gráfica es realizada por mediciones del sensor seleccionado y un termómetro; como se muestra en la Figura 20, al desocupar el tanque de 25 a 10 cm, duro 900 segundos, durante este tiempo se toman datos cada 0.5 minutos, es decir 30 datos (ver Figura 11). Si el objeto que se quiere medir se encuentra en un rango de 4 cm a 25 cm se recomienda no ajustar con la ecuación de la recta, ya que en este rango el sensor tiene una precisión suficiente [38].

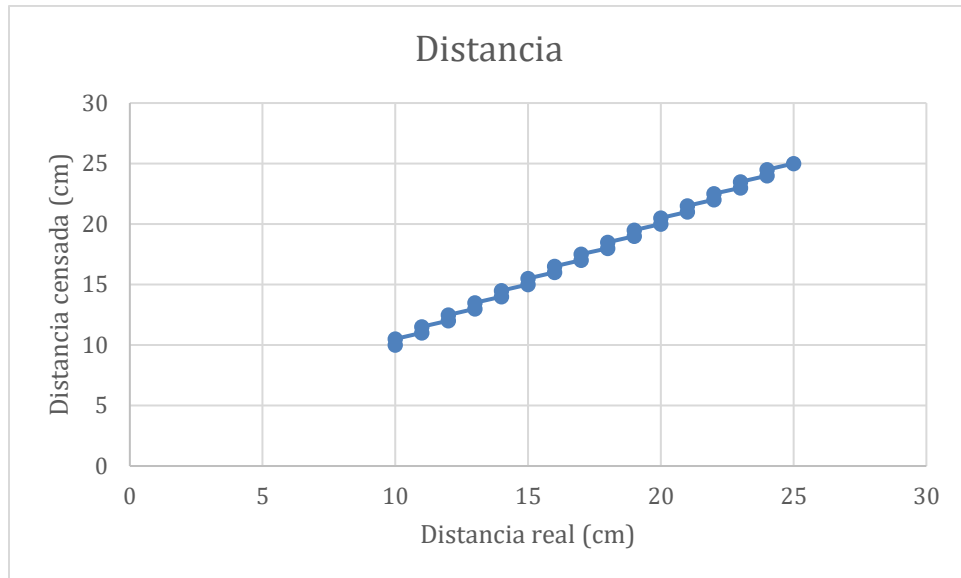


Figura 11. Gráfica de distancia censada VS distancia real.

8.3 IMPLEMENTACIÓN

Se utilizó la Raspberry Pi, ya que es un ordenador de placa reducida de bajo costo, tiene soporte para las descargas de las distribuciones para arquitectura ARM, Raspbian (derivada de Debian), RISC OS 5, Arch Linux ARM (derivado de Arch Linux); promueve el lenguaje de programación Python. Una parte principal que posee la Raspberry Pi son sus pines GPIO. Cada uno funciona con 3.3 voltios a salida. También posee pines de alimentación de 5V, lo cual permite alimentar los sensores, tiene wifi para poder controlar y manejar el sistema desde la plataforma web y móvil, también tiene una alta velocidad de procesamiento, puertos HDMI, Ethernet, USB, Audio 3.5mm, su propio sistema operativo, memoria RAM.

Los valores registrados por el sensor HC-SR04 en la medición del nivel del agua son leídos por la tarjeta Raspberry Pi mediante comunicación bidireccional, haciendo uso de los terminales de propósito general GPIO 27 y GPIO 17 conectados al sensor por echo y trigger, como se observa en la Figura 12.

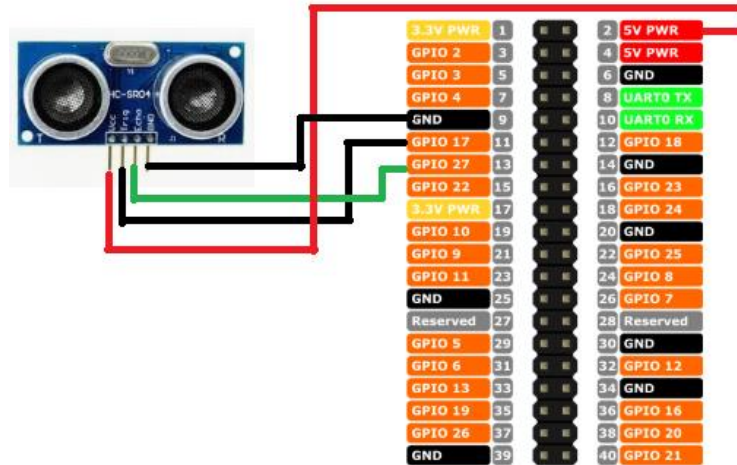


Figura 12. Conexión de sensor [38].

La ubicación del sensor se estableció en un punto específico presente en la sección central del tanque (parte superior) como se observa en la Figura 13, debido a que éste punto proporciona una mayor área de interacción donde la onda emitida colisiona con la superficie del agua, mejorando la calidad de las mediciones; si se ubicara en otro lugar como en los bordes del tanque, cuando el emisor emita las ondas para las mediciones, las ondas retornarán debido al borde, dando a lugar resultados incongruentes.

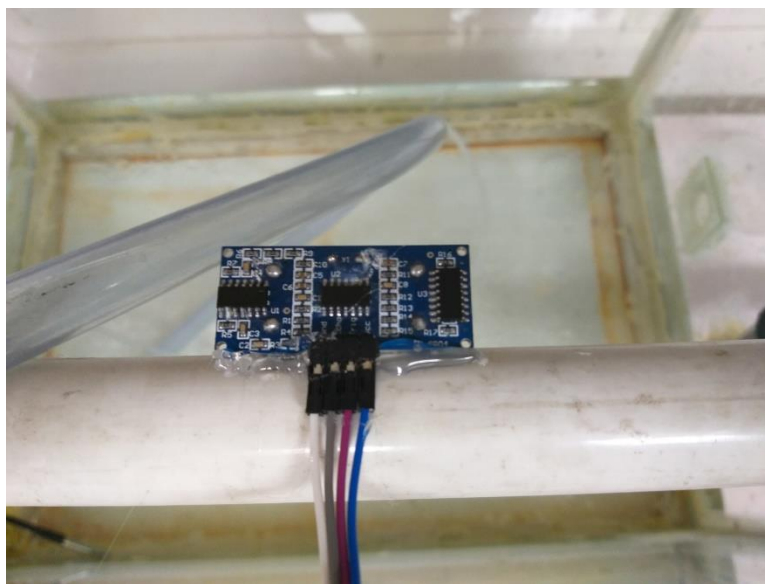


Figura 13. Ubicación del sensor ultrasónico.

El nivel del agua existente en el tanque de peces puede variar debido a perturbaciones externas o internas, sin embargo, éstas pueden ser registradas por

el sensor debido a la lectura continua que se realiza con un periodo de 1 ms, la lectura de medición es enviada a la Raspberry Pi, donde es monitoreada la variable, en la Figura 14, se muestra el diagrama de flujo de la lectura del sensor ultrasónico.

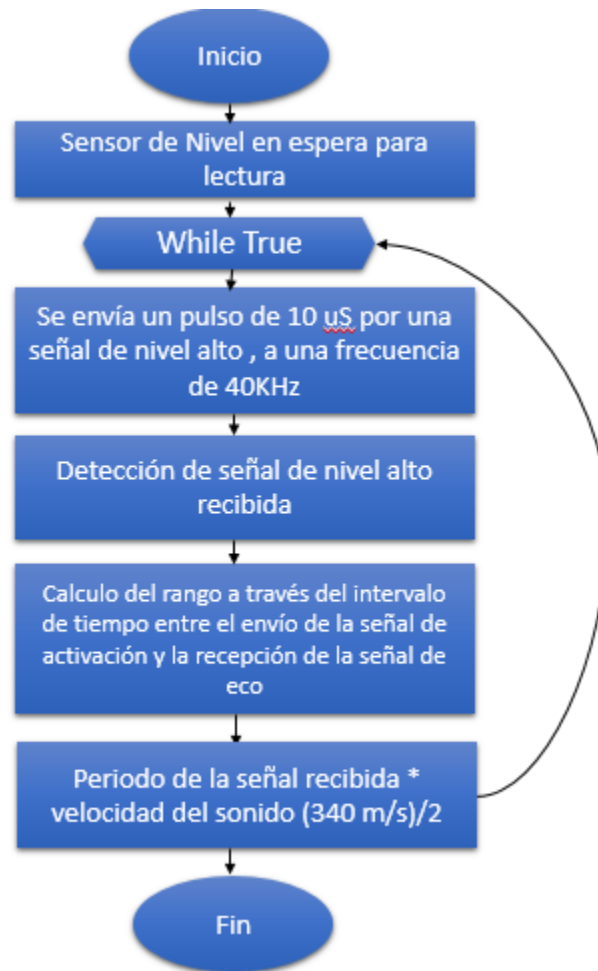


Figura 14. Diagrama de flujo de lectura del sensor.

Luego de implementar el sensor ultrasónico, se conectan dos actuadores para la variable de nivel de agua como se muestra en la Figura 15.

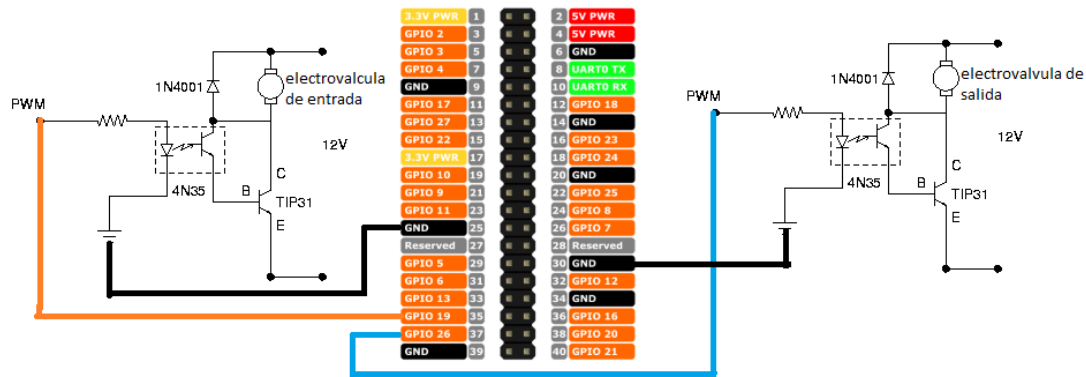


Figura 15. Conexión de actuadores [38].

La alimentación de los actuadores es de 12V, sin embargo, la Raspberry no puede suministrar el suficiente voltaje y corriente para el accionamiento de los dispositivos, por tal razón, se recurre a una fuente externa; la activación o señal de mando para los actuadores es enviada desde la Raspberry Pi, no obstante, es necesario un circuito electrónico básico (driver) que permita una protección eléctrica (valores elevados de tensión y/o corriente) entre los sistemas electrónicos de control (digitales) y el funcionamiento del actuador (analógico)

Las electroválvulas son ubicadas en las secciones laterales del tanque de peces, cada actuador necesita de un acople debido a las dimensiones (grosor) de la tubería, en un extremo un actuador es conectado a la tubería de entrada de agua (ver Figura 16) y el otro es conectado a una segunda tubería cuya finalidad es el desagüe.

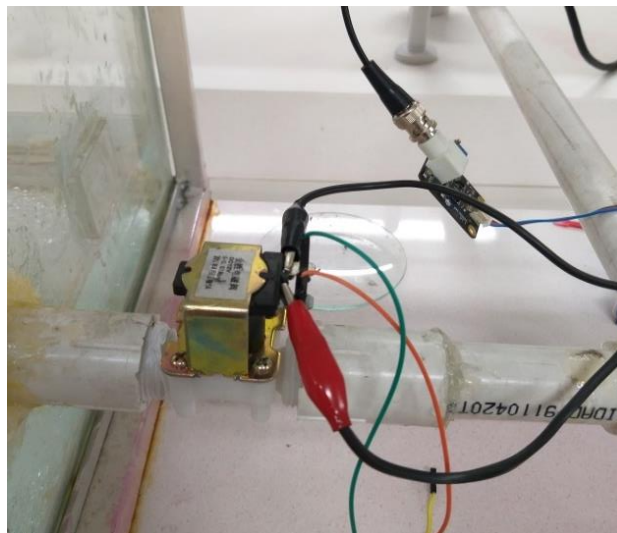


Figura 16. Electroválvulas como actuadores del control de nivel.

8.4 CONTROL DEL NIVEL DE AGUA

El sistema sobre el cual se efectúa la acción de control en el nivel de agua está definido por la altura máxima que puede alcanzar el agua que es 25 cm con respecto a la base del tanque de peces, mientras que el valor mínimo es dado a una altura de 4 cm por la conexión del punto de desagüe en este tanque. El valor de nivel de agua deseado es 25 cm, con ello se tiene 44 litros de agua en el tanque, pero hay una recomendación de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) que dice que la densidad del tanque recomendada es de 20 kg/1 000 litros [2], por lo tanto este sistema puede alcanzar una densidad de 0.88 kg/ 44 litros.

El control del nivel del agua en el tanque de peces, se efectúa al manipular el flujo de agua como variable del sistema, para ello, se diseñó un control ON-OFF debido a que es una acción de control simple la cual puede ser efectuada por la apertura y cierre de las electroválvulas que son de dos posiciones.

Luego se realiza un diagrama de bloques para explicar de forma gráfica el sistema de control como se muestra en la Figura 17.

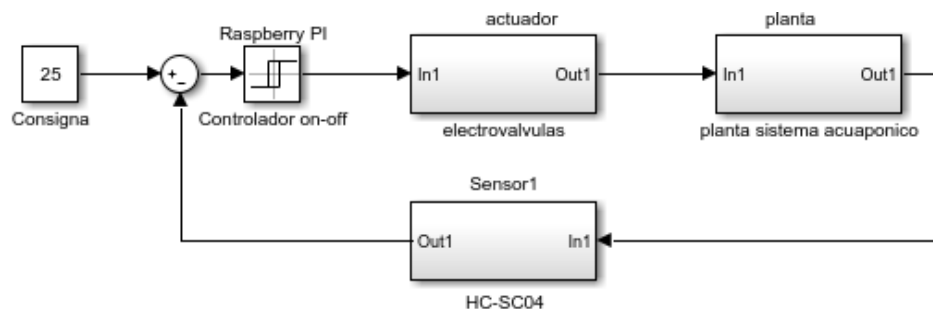


Figura 17. Diagrama de bloques control on-off.

Referencia es el valor de referencia o setpoint, la Raspberry contiene el controlador.

El control ON-OFF es desarrollado en la Raspberry Pi; como se implementó el control de forma digital se realiza el código que ejecutará la tarjeta, para esto, se tiene en cuenta el diagrama de bloques anterior. Como paso anterior a construir el código, se realiza un diagrama de flujo como guía, ver Figura 18.

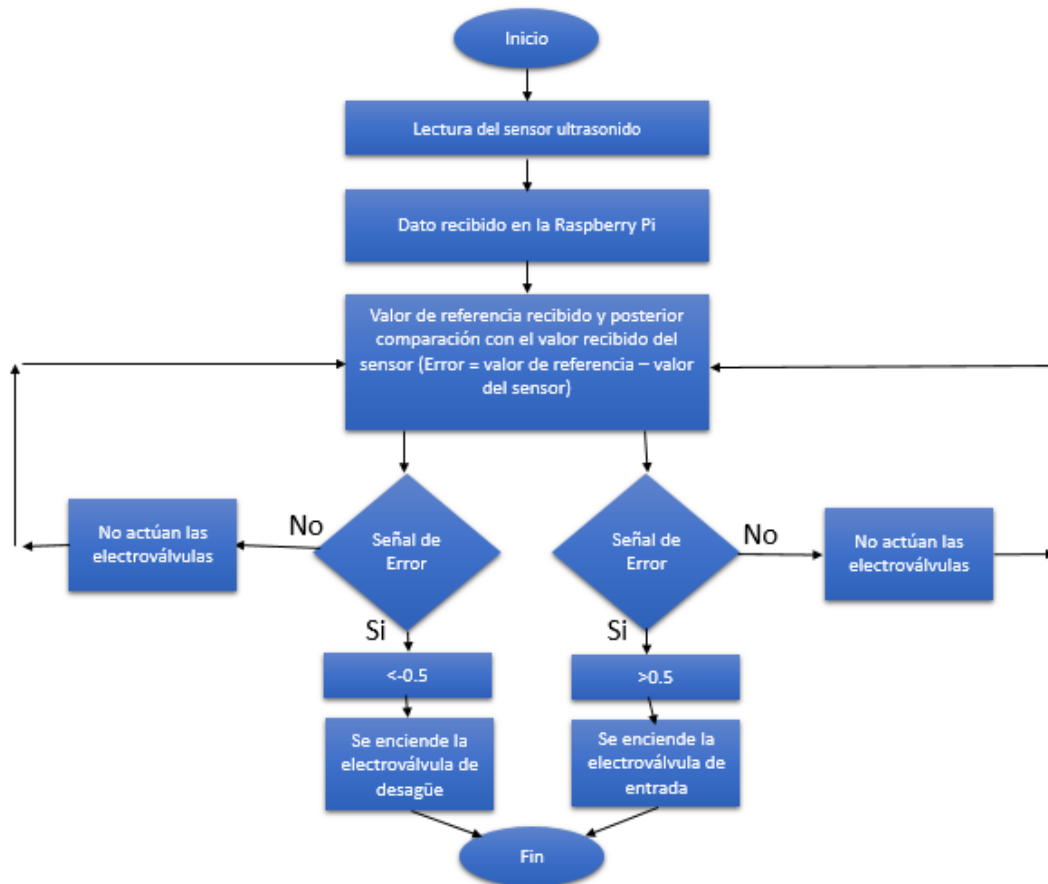


Figura 18. Diagrama de flujo del control de nivel.

El código del control de nivel se puede encontrar en el anexo A.

Para activar cada uno de los actuadores, se realiza una comparación con error de 0.5 y -0.5 en el valor medido por el sensor de nivel, si es mayor a 0.5, la Raspberry manda una señal PWM a la electroválvula de entrada para que dé el paso de agua, de igual manera, si es menor a -0.5, la electroválvula se habilita para que el desagüe. En la Figura 19 y Figura 20, se muestran el llenado y vaciado en tiempo real del tanque. El llenado se evidencia que fue más rápido que el vaciado, ya que esto depende directamente de la presión del agua y de la abertura de la llave.

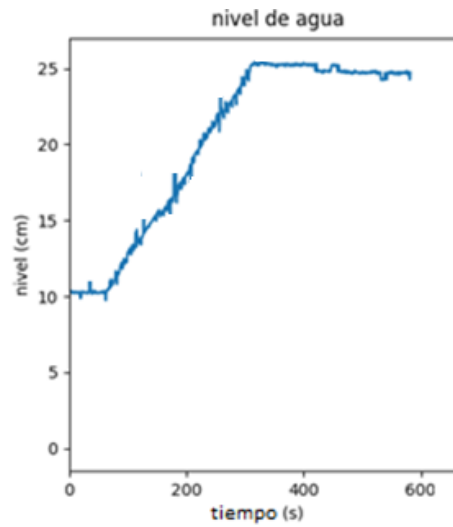


Figura 19. Respuesta del control para llenado.

Los picos se producen por ruido del sensor en el censado, estos no afectan el control de la variable por su mínima duración, por lo tanto, no afecta su funcionamiento.

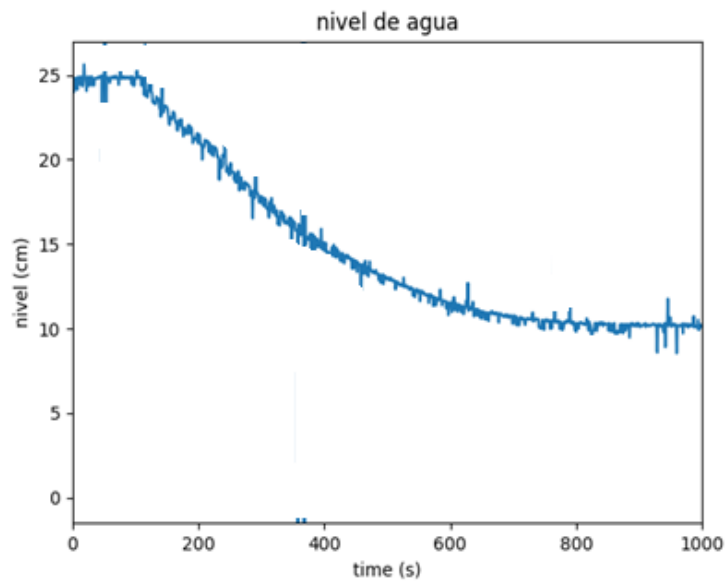


Figura 20. Respuesta de control para desocupado.

En las pruebas de control se evidencia el envío de setpoint o referencia desde la aplicación como se muestra en la Figura 21a, al controlador digital en la tarjeta Raspberry, como se muestra en la Figura 21b, se envía un valor de 24, en unidad de cms.

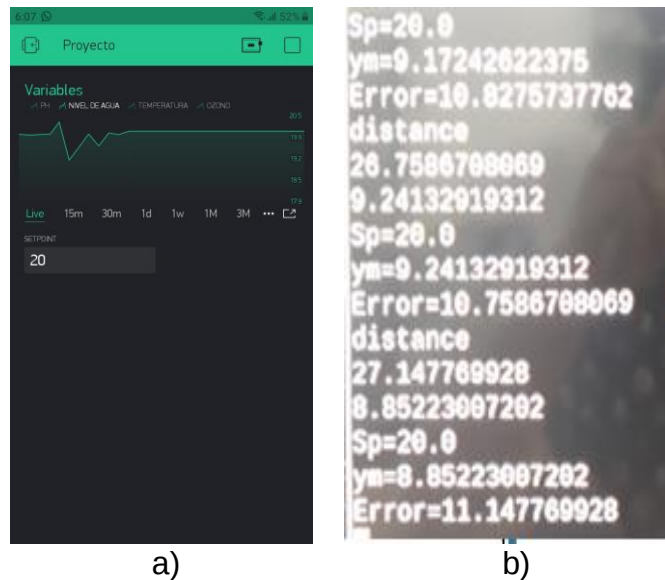


Figura 21. a) Setpoint en aplicación y b) Setpoint en el controlador.

9. TEMPERATURA DEL AGUA

9.1 SELECCIÓN DE SENSOR Y ACTUADOR

La selección del sensor se debe a la capacidad de lectura que puede tener, es decir, el rango de lectura del sensor debido a la variación de la temperatura presente en el agua; existen muchos sensores que realizan esta medición en función de la tecnología la cual puede ser termopares, dispositivos de temperatura resistivos (RTD), radiadores infrarrojos, entre otros como se muestra en la Tabla 5, sin embargo, la elección es realizada en función de costos y características, dentro de las referencias posibles se tomó el Sensor digital sumergible DS18B20, ver Figura 22. Entre sus características están el rango de temperatura de -55 a 125 °C, precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, con un tiempo de respuesta $\leq 750\text{ms}$, resolución de 12 bits y un voltaje de alimentación de 5V, apropiado para conectarlo a la Raspberry Pi 3.



Figura 22. Sensor DS18B20 [39].

Termistor datalogger CR200X	Termistor BetaTherm 100k6A1IA 107	Sensor DS18B20
		
Tolerancia $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (más de 0°C a 70°C rango).	Tolerancia $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (más de 0°C a 70°C rango).	Rango de temperatura: -55 – 125°C .
Rango de medición de temperatura -50°C a $+70^{\circ}\text{C}$.	Rango de medición de temperatura -5°C a $+95^{\circ}\text{C}$.	Precisión: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
Profundidad máxima de inmersión 15 m (50 pies).	Profundidad máxima de inmersión 15 m (50 pies).	Tiempo de respuesta: $\leq 750\text{ms}$.
		Resolución: 12 bits.

Longitud máxima del cable 305 m (1000 pies).	Longitud máxima del cable 305 m (1000 pies).	Voltaje de alimentación: 5V.
Diámetro de la sonda 0,76 cm (0,3 pulg.).	Diámetro de la sonda 0,76 cm (0,3 pulg.).	Costo: 15.000
Costo: 150.000	Costo: 200.000	

Tabla 5. Sensores de temperatura agua [39].

Luego se procede a seleccionar el actuador, que permita calentar el tanque de peces, para esto se buscó un dispositivo con una capacidad de calentar 44 L de agua, se seleccionó un calentador sumergible, que tiene internamente un termostato que permite un control de temperatura retroalimentado. Este se usa en tanques de peces como acuarios, maneja un rango de temperatura adecuado para el tipo de peces que se podrían cultivar en el sistema, es un calentador sumergible de 200 W de potencia como se muestra en la Figura 23, permitiendo un control de temperatura de 20 a 32°, también tiene un diseño de doble capa para evitar alguna filtración de agua, con un soporte máximo de presión de 50 galones es decir 190 L, sin embargo, la elección es realizada en función de costos y características, dentro de las referencias posibles (ver Tabla 6). Se consultó acerca de otros actuadores, pero no eran apropiados para un sistema con peces.



Figura 23. Calentador sumergible Seastart HX-906 [40].

Resistencia calefactora para almacenamiento de agua 2kw, 230	Calentador de agua 110v portátil 8 litros.	Calentador sumergible HX-906
--	--	------------------------------

		
Tensión nominal: 230 V Potencia: 2000 vatios Dimensiones: L 220 mm x B 45 mm x B 45 mm Rosca: M 14 x 1,5 Costo: 100.000	Resistencia cubierta para máxima seguridad Tensión nominal: 110v Frecuencia nominal: 60hz Potencia: 480w / 8 litros Cable: 70cm Costo: 20.000	Tensión nominal: 110v Potencia: 200w Capacidad: 150 litros/65 galones Resistentes y duraderos Tiene tecnología reflectante para los peces Resistente a los golpes y al calor. Tiene un termostato y un indicador de luz para mayor precisión y vida útil. Tiene un termostato calibrado por ordenador. Costo: 25000

Tabla 6. Actuadores de temperatura agua [40].

9.2 CARACTERIZACIÓN

El principio de funcionamiento de un sensor de temperatura, se basa en el efecto Seebeck. Este fenómeno consiste en generar corriente a partir de someter dos metales a una diferencia de temperaturas [41] (ver Figura 24).

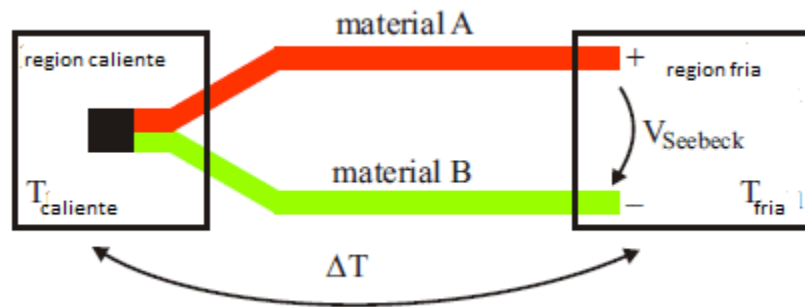


Figura 24. Principio efecto Seebeck [42].

La cantidad de electricidad producida dependerá de los dos metales elegidos y también de la diferencia de temperatura entre la unión de ambos y los extremos libres.

La siguiente Gráfica es realizada por mediciones del sensor seleccionado y un termómetro; como se muestra en la Figura 31, la temperatura de 21 a 25°C, duro 7000 segundos, durante este tiempo se toma datos cada $3.52 \approx 4$ minutos, es decir 33 datos. (ver Figura 25).

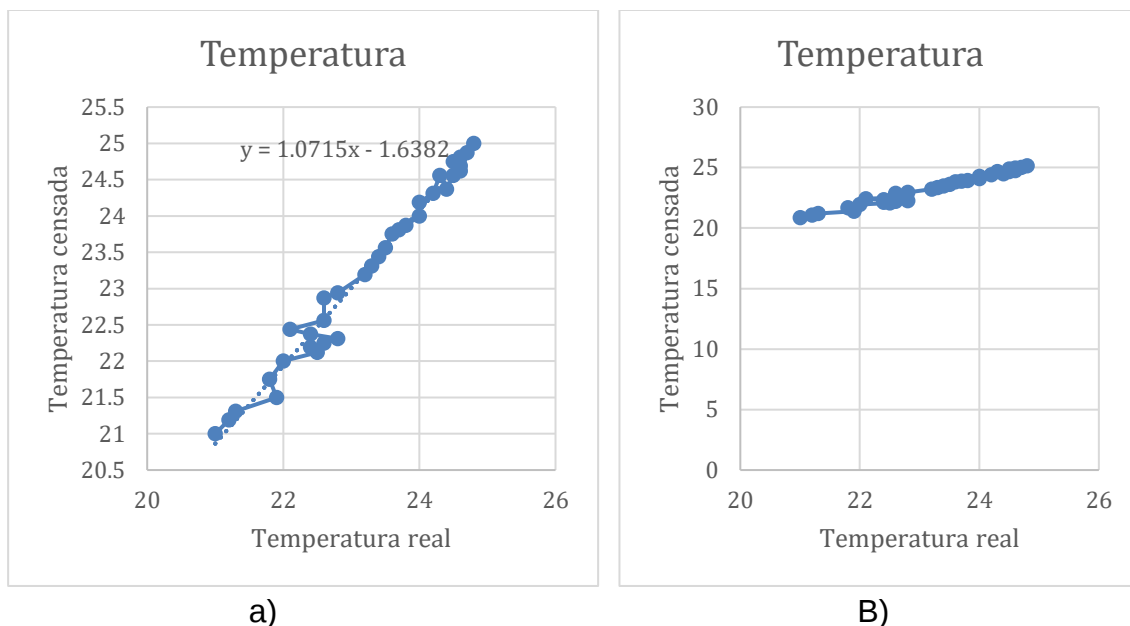


Figura 25. Gráfica de la temperatura real VS temperatura censada a) sin ajuste b) con ajuste de la recta

9.3 IMPLEMENTACIÓN

Los valores registrados por el sensor DS18B20 en la medición de la temperatura son leídos por la tarjeta Raspberry Pi, haciendo uso de la terminal de propósito general GPIO 4, como se observa en la Figura 26.

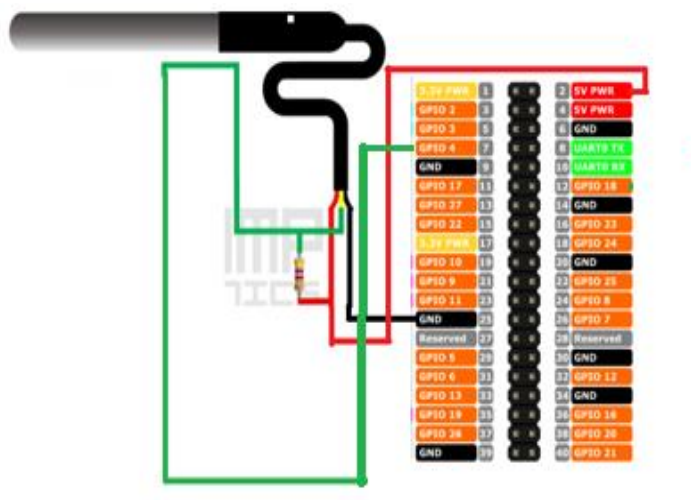


Figura 26. Conexión del sensor [38].

Por ser de naturaleza sumergible, la ubicación del sensor puede ser en cualquier punto del tanque de peces como se observa en la Figura 27.



Figura 27. Sensor de temperatura sumergible.

La lectura del sensor se basa en el protocolo 1-Wire, este protocolo permite que a través de un solo bus de datos se pueda enviar y recibir un paquete de datos, es decir, consta de un maestro y de varios esclavos para la emisión y recepción de datos; gracias a este protocolo, la configuración del sensor con la Raspberry es más sencilla, basta con agregar una carpeta de ubicación y de crear un archivo que pueda almacenar cada dato que reciba el sensor, para esto se debe abrir y cerrar el archivo cada vez que se quiera acceder; además en el programa se crea una función que permita convertir cada byte recibido en valores reales y así mostrarlos en la terminal de la Raspberry.

A continuación, en la Figura 28, se muestra el diagrama de flujo de la lectura del sensor de temperatura.

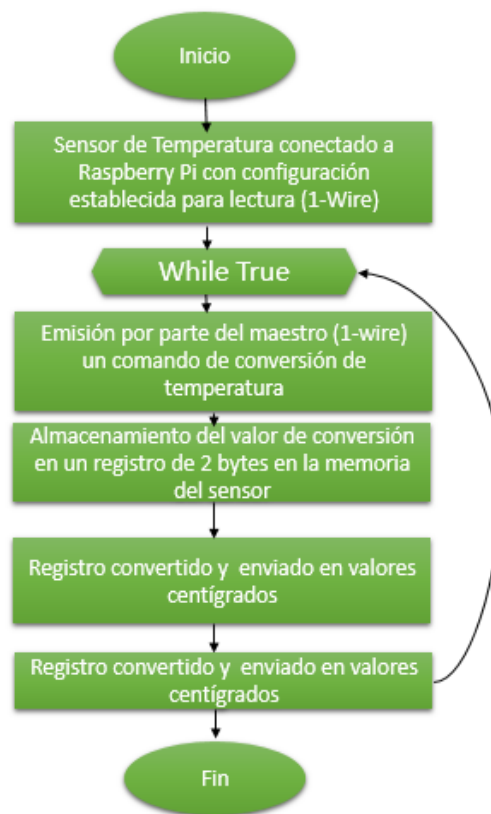


Figura 28. Diagrama de flujo de lectura del sensor de temperatura.

Luego de haber conectado el sensor de temperatura, se conecta el actuador para la variable de temperatura como se muestra en la Figura 29.

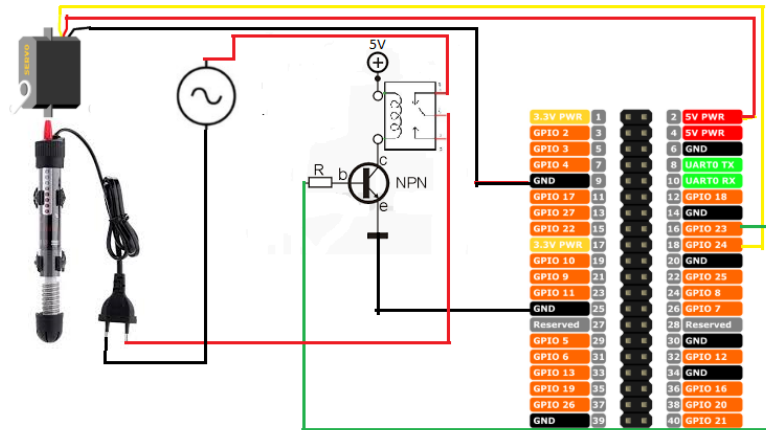


Figura 29. Conexión de actuador [38].

El actuador es alimentado a 110V AC; para que el termostato entre en funcionamiento, luego se le acopla un servomotor para que, en vez de realizar la acción de cambiar la referencia de temperatura de forma manual, esta se pueda ajustar por medio de la Raspberry Pi, (ver Figura 30). El servomotor es conectado a la terminal de propósito general GPIO 24, también el actuador es conectado a un driver que reciba una señal de disparo por el GPIO 23 de la Raspberry.



Figura 30. Termostato como actuador del control de temperatura.

9.4 CONTROL DE TEMPERATURA EN EL AGUA

La acción de control en la temperatura del agua, es realizada por el calentador sumergible, quien posee un control retroalimentado interno. La acción tiene una temperatura máxima de 32 °C con respecto a una temperatura mínima de 20 °C, la cual puede ser cambiada por acceso remoto. El valor ideal de temperatura para el tanque de peces está definido por el tipo de peces y plantas.

9.4.1 PRUEBAS

Como se explicó en el capítulo 3, se utilizó el calentador sumergible Seastar HX-906, ya que posee un control de temperatura, este se comprobó mediante pruebas de perturbación, como se muestra en la Figura 31, donde se perturba enfriando el tanque ingresando hielo en el agua, se observó que la temperatura tiende a estabilizarse en su referencia en 15000 segundos.

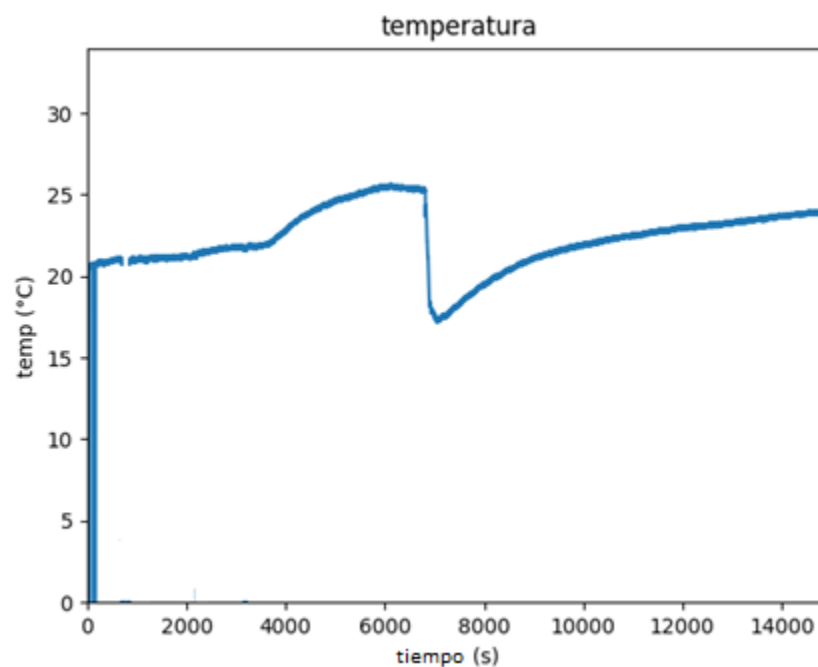


Figura 31. Prueba de perturbación del termostato.

Luego se realiza un diagrama de bloques para explicar de forma gráfica el sistema de control como se muestra en la Figura 32.

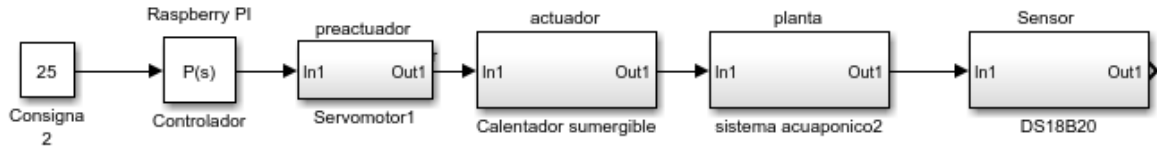


Figura 32. Diagrama de bloques control lazo abierto.

Luego se hizo otra prueba de perturbación ingresando hielo nuevamente, bajando casi a los 10°C de temperatura, luego empieza a recuperarse como se muestra en la Figura 33, hubo un problema de lectura con el sensor, parándole la gráfica en tiempo real, pero inmediatamente se solucionó y se ejecuta de nuevo el programa, sigue Gráficando como se muestra en la Figura 34.

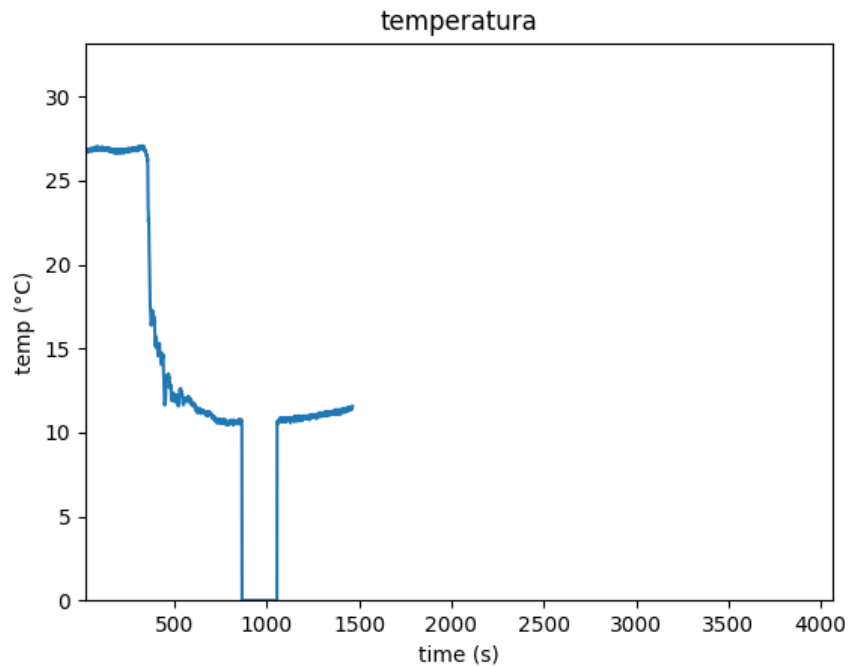


Figura 33. Segunda prueba de perturbación.

En la Figura 34 se evidencia como se recupera la temperatura después de la perturbación realizada, pero no se logró evidenciar completamente el tiempo que se demoró en estabilizarse la temperatura, hasta los 27°C aproximadamente, esto fue de nuevo un problema con la lectura del sensor, cabe resaltar que hay una buena respuesta a la perturbación.

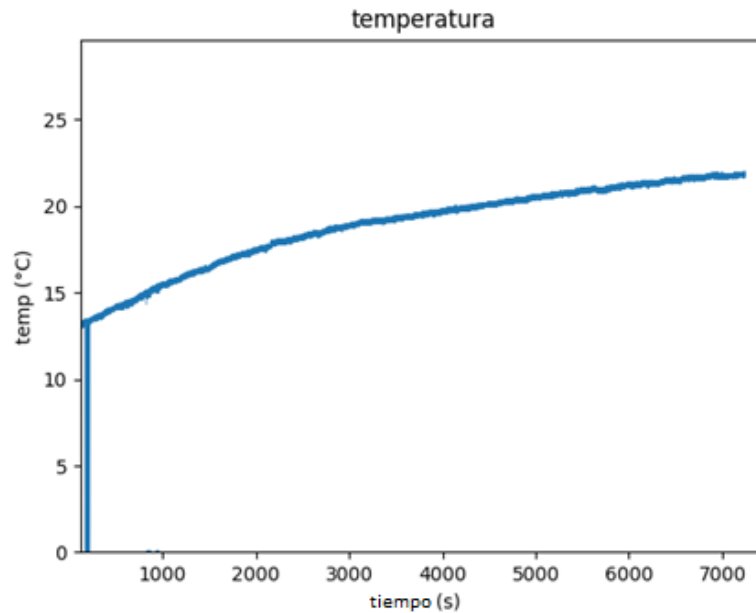


Figura 34. Segunda prueba de perturbación.

Por lo tanto, se implementó una automatización o control en lazo abierto, utilizando este termostato como ayuda comercial para la realización de este ítem, esta se ejecuta por medio del servomotor dando el movimiento mecánico sobre el termostato y haciendo el cambio de temperatura.

Se envió un setpoint o referencia desde la aplicación al programa en la tarjeta Raspberry, como se muestra en la Figura 35, se envía un valor de 27, en unidad de °C.

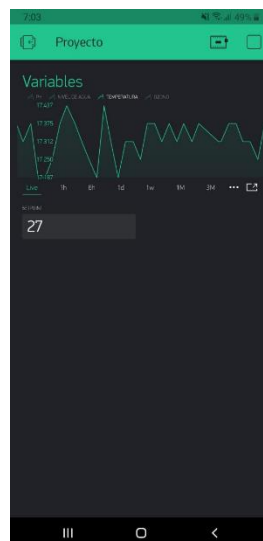


Figura 35. Set Point en aplicación.

10. pH (POTENCIAL DE HIDROGENO)

10.1 SELECCIÓN DE SENSOR Y ACTUADOR

La selección del sensor se debe a la capacidad de lectura que puede tener, es decir, el rango de lectura del sensor debida a la calidad del agua como: turbidez y suciedad presente en los dos tanques; existen muchos sensores que realizan esta medición en función de su naturalidad, es decir, si es análogo o digital, sin embargo, la elección es realizada en función de costos y características, dentro de las referencias posibles como se muestra en la Tabla 7, se tomó el Sensor de pH MSP430, ver Figura 36. Este cuenta con un rango de temperatura de 0°C – 50°C, rango pH de 0 – 14, lo cual son los límites establecidos de la variable, tiene una precisión de ± 0.1 , pues es buena para tener datos certeros, cuenta con un tiempo de respuesta ≤ 1 minuto, que es viable para medir esta variable.



Figura 36. Sensor de pH MSP430 [43].

Sensor pH Arduino	Sensor pH electronilab	Sensor ph meter v1.1
		
Alimentación: 5.00V Consumo: 5-10Ma Rango de medición: 0-14 pH	Potencia del módulo: 5.00V Tamaño del módulo: 43 x 32 mm (1.69x1.26 ")	Rango de temperatura: 0°C – 50°C Rango pH: 0 – 14 Precisión: ± 0.1

Temperatura de medición: 0-80°C	Rango de medición: 0 - 14PH	Tiempo de respuesta: ≤1 minuto
Precisión: ± 0.1pH (25°C)	Temperatura de medición: 0-60	Costo: 105.000
Tiempo de respuesta: = 5s	Precisión: ± 0.1pH	
Costo: 150.000	Tiempo de respuesta: = 1 mi	
	Costo: 145.000	

Tabla 7. Sensores Ph.

Luego de seleccionar el sensor, se eligieron dos actuadores que puedan alterar el potencial de hidrogeno en el tanque de peces, manteniendo el pH en valores neutros, se consiguieron dos actuadores, uno como acidificador (solución liquida) para disminuir el pH, este tiene una sustancia química NaH_2PO_4 (bifosfato de sodio) como se muestra en la Figura 37 (parte a) , y otro como alcalinizador (solución liquida) para aumentar el pH, (parte b), estos se usan normalmente para alterar el potencial de hidrogeno en los acuarios [44].

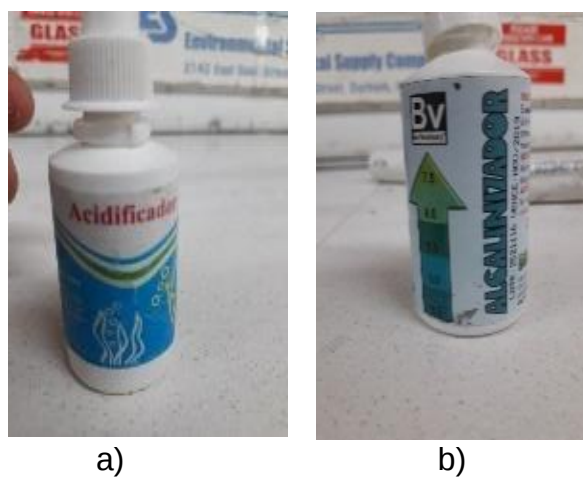


Figura 37. Actuadores a) Acidificador y b) Alcalinizador.

10.2 CARACTERIZACIÓN

La medición del pH es una de las pruebas más usuales que se realizan para conocer la calidad del agua. El pH indica la cantidad de acidez o alcalinidad de un líquido, sin embargo, es una medida de la actividad del potencial de iones de hidrogeno (H^+) [45]. Las soluciones de pH se pueden dividir en dos grupos: Aquellos líquidos que tengan un pH inferior a 7 se consideran ácidos, y líquidos que tengan un pH superior a 7, hasta 14 se consideran alcalinos. La escala de pH es logarítmica, es decir, que representa una variación diez veces mayor en la acidez. En la Figura 38, se puede observar la escala de acidez y alcalinidad.



Figura 38. Escala del pH [45].

El agua con un $pH < 7$ se establece que es ácido, de lo contrario si posee un $pH > 7$ se considera alcalina. Normalmente, el rango que debe tener el agua es de 6.5 a 7. La alcalinidad es una medida que permite que el agua pueda resistir ante un cambio de pH que tendiese ser más ácido.

Teniendo en cuenta lo anterior, la caracterización del sensor utilizado para la detección de la acidez en el agua se muestra en la Tabla 8, es desarrollada a partir de la curva entre el pH que existe tanto en el tanque de peces como de hortalizas, dicha variable se Gráfica la tensión vs acidez del agua, como se observa en la Figura 39.

Voltaje(V)	pH	Voltaje(V)	pH
0.41	0	-0.41	14
0.35	1	-0.35	13
0.29	2	-0.29	12
0.23	3	-0.23	11
0.17	4	-0.17	10
0.11	5	-0.11	9
0.06	6	-0.06	8
0	7	0	7

Tabla 8: Relación pH con salida del sensor [43].

Estos datos son la salida de voltaje en milivoltios con relación al pH, la gráfica anterior no presentaba la caracterización correcta del sensor.

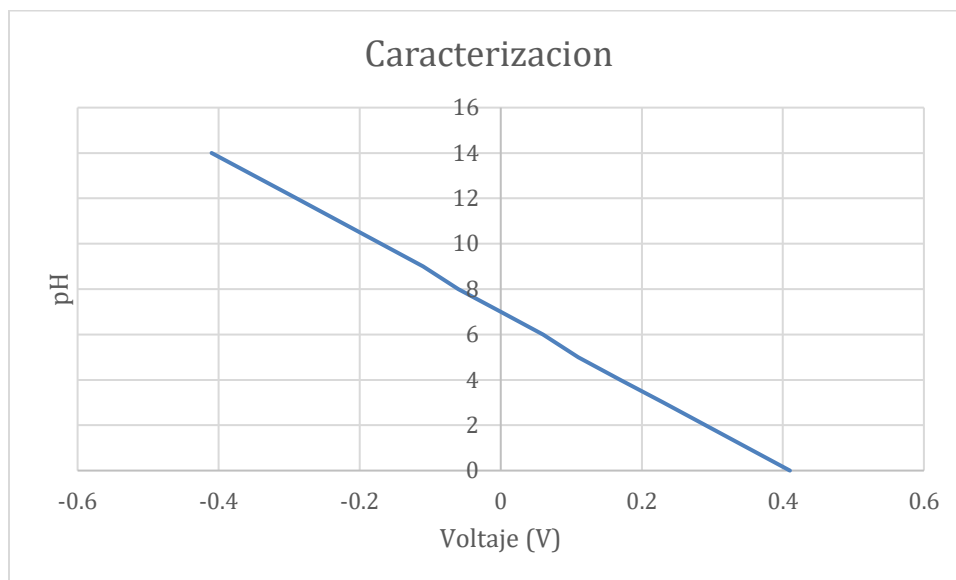


Figura 39. Caracterización del sensor.

10.3 IMPLEMENTACIÓN

Los valores registrados por el sensor MSP430 en la medición pH son leídos por la tarjeta Raspberry Pi mediante la conexión del sensor con un convertidor de nivel TTL que reduce el voltaje (5V a 3.3V); al no tener la Raspberry Pi terminales para lectura análoga, se necesita de un convertidor análogo-digital, de los cuales el más popular es el ADC MCP3008; haciendo uso del puerto uno del ADC para leer los datos, se conecta a RX0 del TTL, la terminal del TTL que corresponde a RX1 se conecta a la terminal analógica A0 del sensor, como se muestra en la Figura 40.

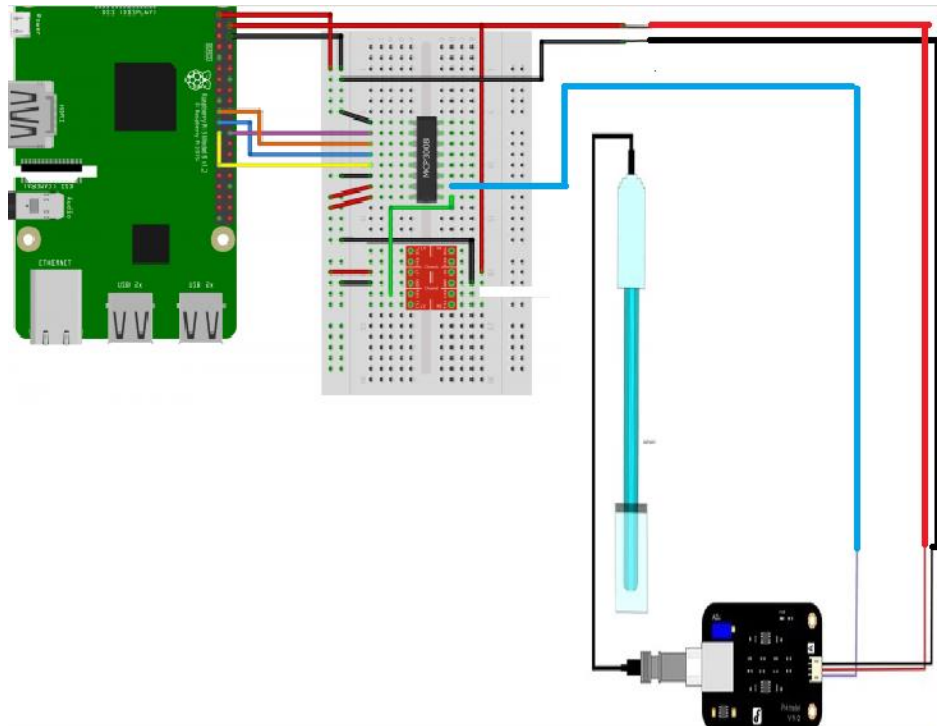


Figura 40. Conexión del sensor [46].

La ubicación del sensor se estableció en un punto específico presente en una sección de la tubería del tanque de hortalizas como se observa en la Figura 41; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, debido a que este punto proporciona mayor área de concentración de pH, al haber recirculación, el nivel de pH es igual tanto en el tanque superior como el inferior.



Figura 41. Sensor pH.

A continuación, en la Figura 42 se muestra el diagrama de flujo del código de lectura del sensor de pH.

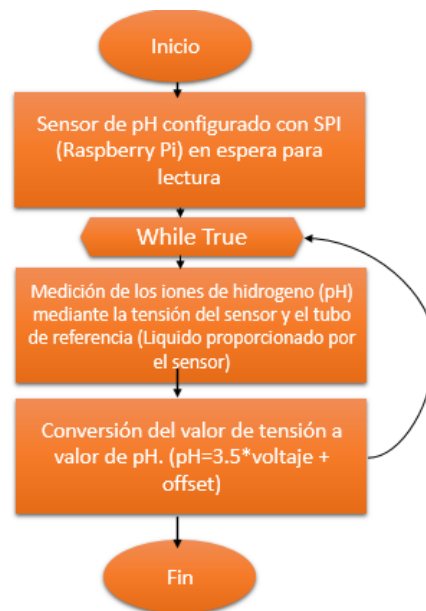


Figura 42. Diagrama de flujo lectura de sensor de pH.

La lectura del sensor de pH está dada por la librería spidev; para hacer uso de esta librería, se debe configurar la Raspberry para habilitar el SPI (Serial Peripheral

Interface) que es un protocolo que permite de manera sincrónica la comunicación entre la tarjeta y el sensor facilitando la recepción de datos. Como es un sensor análogo, se utiliza el integrado MCP 3008 para la conversión ADC, en el programa se debe hacer algo similar por lo que al recibir los datos la Raspberry vienen en paquetes, el programa se encarga de decodificar cada dato y así obtener el valor real del pH.

Luego de implementar el sensor de pH, se conectan los actuadores para la variable como se muestra en la Figura 43. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

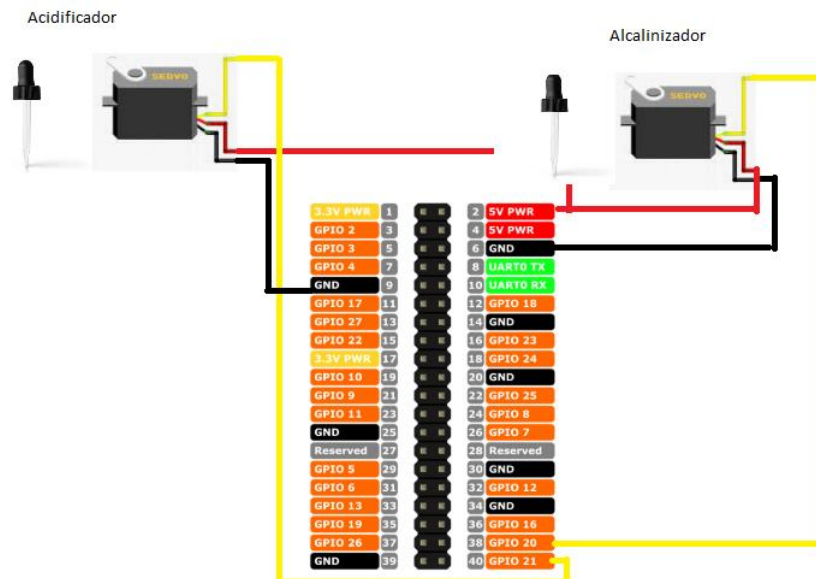


Figura 43. Conexión de actuador [38].

A los dos actuadores les corresponde los terminales GPIO 20 y GPIO 21, como son dos servomotores, la alimentación es de 5V, cada actuador lleva un gotero con alcalinizador o acidificador. Los dos actuadores son colocados en los laterales del tanque de peces (parte superior) para que se facilite el goteo de cada solución acuosa en el mismo (ver Figura 44).



Figura 44. Pinza y Gotero como actuadores del control de pH.

10.4 CONTROL DE PH

El sistema sobre el cual se efectúa la acción de control de pH está definido por el valor máximo de pH que puede alcanzar el agua que es de 8.5, mientras que el valor mínimo es dado a un valor de 5.5.

El control de pH, se efectúa al manipular la variación del pH del agua como variable del sistema, para ello, se diseñó un control ON-OFF debido a que es una acción de control simple ya que permite aumentar o disminuir el valor de pH a niveles neutros.

Esta variable presenta cambios de acuerdo con los entornos climáticos externos que puedan perturbar sobre el potencial de hidrogeno en el sistema acuapónico, presentando cambios en función de tiempo, partiendo de valores de pH neutros – básicos de 7.5 de agua en la tubería.

Luego se realiza un diagrama de bloques para explicar de forma gráfica el sistema de control de pH como se muestra en la Figura 45.

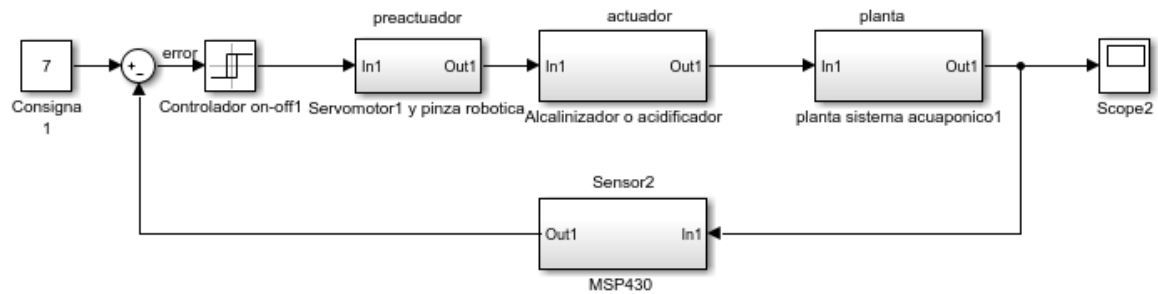


Figura 45. Diagrama de Bloques.

Se procede a implementarlo, como se muestra en la Figura 46, el diagrama de flujo del controlador de pH.

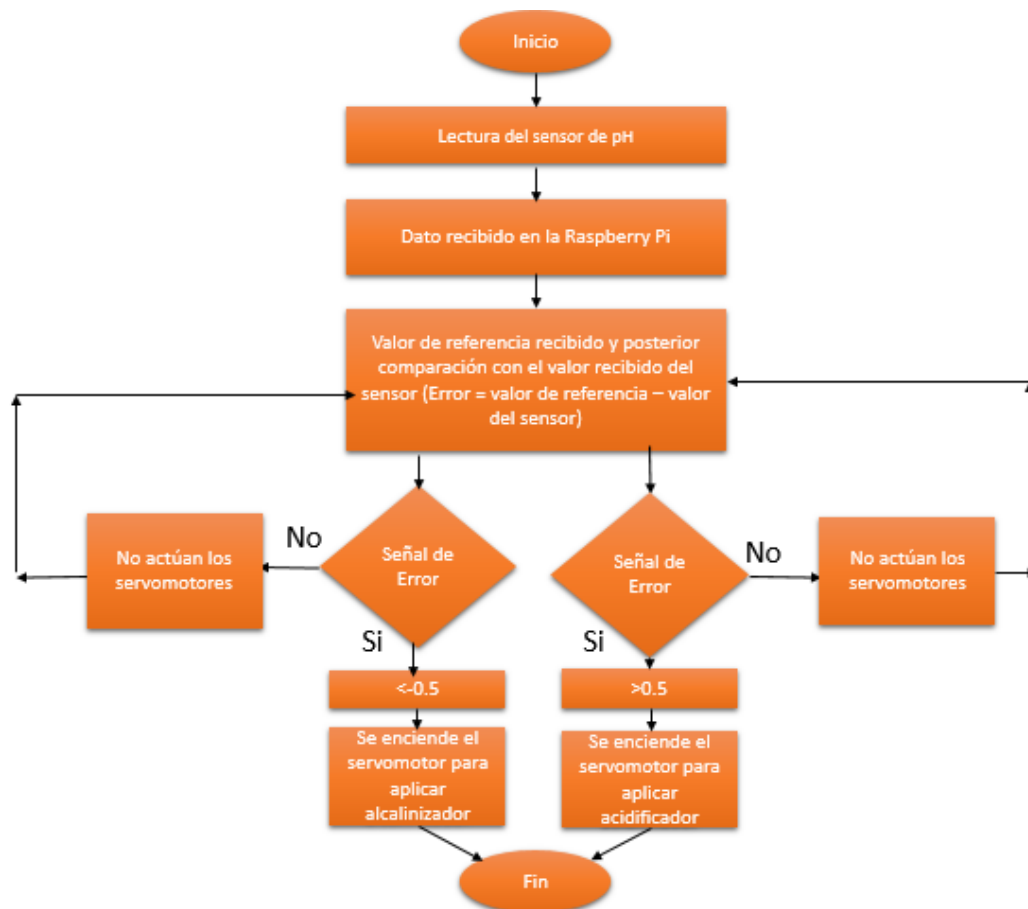


Figura 46. Diagrama de flujo del control de pH.

El código del control de pH se puede encontrar en el anexo C

Para activar cada uno de los actuadores, se realiza una comparación con error de 1 y -1 en el valor medido por el sensor de pH, si es mayor a 1, la Raspberry manda

una señal PWM al actuador para que haga el movimiento correspondiente en grados para accionar el gotero, de igual manera, si es menor a -1.

Luego se realizaron pruebas de control; en una de estas se envió un valor de referencia 4.5 pH, al enviarle este valor se activó el actuador acidificador para que baje el potencial de hidrogeno dando un comportamiento que se evidencia en la Figura 47.

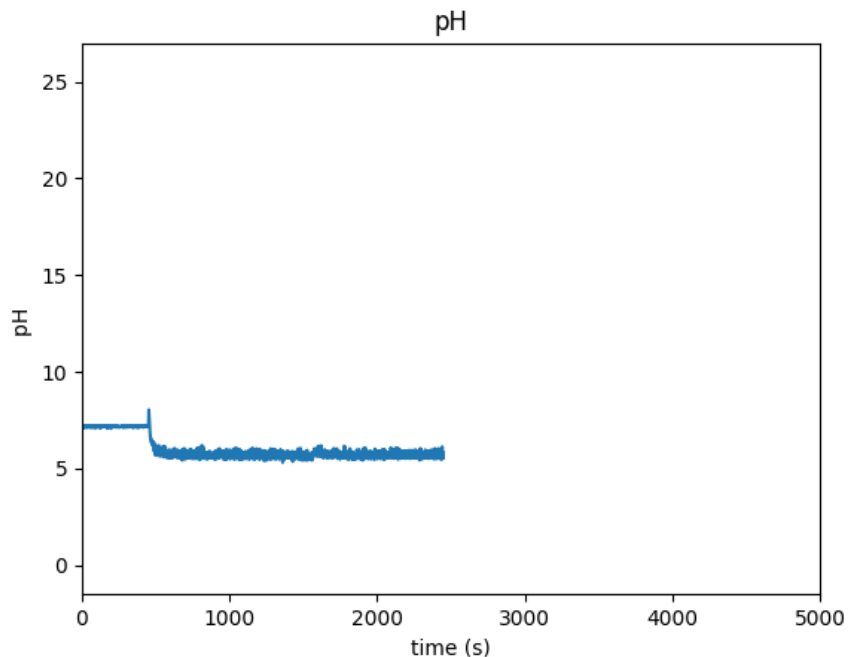


Figura 47. Respuesta del sensor.

En las pruebas de control se evidencia el envío de setpoint o referencia desde la aplicación como se muestra en la Figura 48.

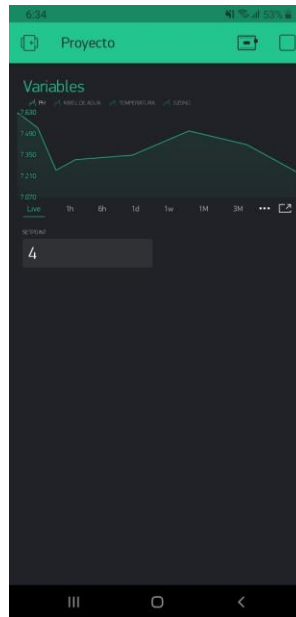


Figura 48. Setpoint en Aplicación.

En la Figura 49 se muestra un setpoint (sp) de 7, ya que el setpoint está fija desde el programa, anteriormente se explicó porque, pero si se quiere otro valor, solo es un cambio pequeño en el programa para que reciba el setpoint desde la aplicación.

```

Archivo  Editar  Pestañas  Ay
ym=7.58
Error=-0.58
Sp=7
ym=7.17
Error=-0.17
Sp=7
ym=7.46
Error=-0.46
Sp=7
ym=7.63
Error=-0.63
Sp=5.0
ym=7.25
Error=-2.25
Sp=5.0
ym=7.63
Error=-2.63
Sp=5.0
ym=7.6
Error=-2.6
Sp=5.0
ym=7.22
Error=-2.22

```

Figura 49. Setpoint en el controlador.

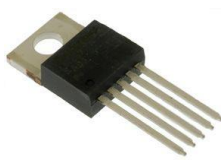
11. MONITOREO DE TEMPERATURA AMBIENTE Y OZONO

11.1 SELECCIÓN DE SENSORES

La selección del sensor se debe a la capacidad de lectura que puede tener, es decir, el rango de lectura del sensor debida a la variación de la temperatura presente en el ambiente; existen muchos sensores que realizan esta medición en función de la tecnología la cual puede ser termopares, dispositivos de temperatura resistivos (RTD), radiadores infrarrojos, entre otros, sin embargo, la elección es realizada en función de economía y facilidad de adquisición, dentro de las referencias que se muestran en la Tabla 9, se tomó el Sensor DHT11, (ver Figura 50). Entre sus características están el voltaje de alimentación de 3.5v a 5.5v, periodo de muestro > 2 s, lo cual sirve para esta variable ya que solo se monitorea, también maneja un rango de temperatura de $0^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ lo cual está dentro los límites de la planta, con una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.



Figura 50. Sensor DTH11 [37].

TMP36	TC74	DHT11
		

Voltaje de operación: de 2,7 V a 5,5 V	Voltaje de operación: de 2,7 V a 5,5 V	Voltaje de alimentación: 3.5v a 5.5v
Rango de temperaturas: -40° C a 150.	Rango de temperaturas: 40° C a 125° C	Periodo de muestro:> 2 s
Precisión: $\pm 2^{\circ}$ C Conversión: 10 mV / °C	Precisión: $\pm 2^{\circ}$ C de 25° C a 85° C y $\pm 3^{\circ}$ C de 0° C a 125° C	Rango de temperatura: 0°C – 50°
Tiempo de respuesta (100%): 8 min.	Resolución: 8-bit	Precisión: $\pm 2^{\circ}$ C
Offset: 0.5 V	Muestras/segundo: 8	Costo: 6000
Costo: 7000	Costo: 10.000	

Tabla 9. Sensores temperatura ambiente.

La selección del segundo sensor, se debe a la capacidad de lectura que debe tener para identificar las variaciones de los niveles de oxígeno presentes en el agua y ambiente. Algunos sensores pueden realizar esta medición dependiendo de la tecnología la cual pueden ser los sensores Lambda (sensores de oxígeno utilizados para los vehículos), la elección es realizada en función de costos y características dentro de las referencias que se muestran en la Tabla 10, se tomó el Sensor MQ-131, la familia MQ son sensores para detectar diferentes tipos de gases. (ver Figura 51). Entre su variedad de características están el voltaje de operación de 5V, rango de medición de 310PPB (partes por billón) -2PPM (partes por millón), también maneja una temperatura de operación de 20°C con presión de $\pm 2^{\circ}$ C.



Figura 51. Sensor MQ-131 [37].

MQ 131	Smakn mq 131	cjimq mq 131
--------	--------------	--------------

		
Voltaje de entrada: 5V Voltaje de salida: ~0.2 ~ 5V DC Rango de medición: 310PPB-2PPM Temperatura de operación: 20°C±2°C Costo:100.000	Chip principal: mq131 Sonda de sensor de gas Voltaje de trabajo DC:5V Costo: 110.000	Módulo de gas de alta y baja concentración Costo: 150.000

Tabla 10. Sensores de concentración ozono.

11.2 CARACTERIZACIÓN

El ozono es un gas que puede encontrarse de forma natural en la atmosfera y cuya molécula contiene tres átomos de oxígeno [47]. Este gas puede ser generado por ciertos dispositivos para ambientes como los tanques acuícolas donde se es necesario utilizarlo, y con ello obtener oxígeno disuelto en agua. Esto se logra por la difusión del aire con el entorno. La cantidad de oxígeno disuelto en el agua depende del organismo que lo necesita, el estado físico, la temperatura del agua, los contaminantes presentes, entre otros. Algunos estudios sugieren que 4 partes por millón (ppm) de ozono es la mínima cantidad que puede soportar una población de peces [48].

La caracterización del sensor de ozono se realiza por medio de un programa genérico en Python; la calibración del sensor se hace con la ayuda de la ficha técnica del sensor, con ello se hace una linealización de la recta para tener una ecuación lineal y después programarla dentro del código.

En la siguiente Figura se evidencia una relación de resistencia del sensor (R_s/R_o), la abscisa es la concentración de gases. R_s es la resistencia en diferentes gases, R_o es la resistencia del sensor en 50 ppm CL2.

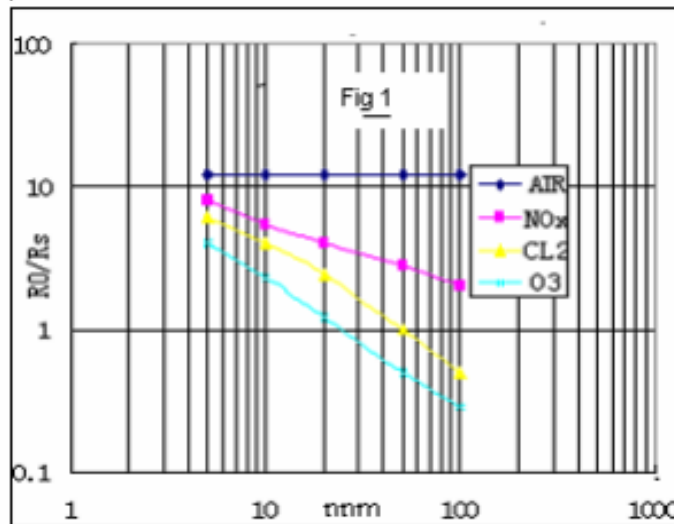


Figura 52. Características de sensibilidad [22].

La resistencia del sensor (R_s/R_0), R_s es la resistencia del sensor en 50 ppm de ozono bajo diferentes temperaturas, y humedad. R_0 es la resistencia del sensor en ambiente de 50ppm ozono, como se muestra en la Figura 53.

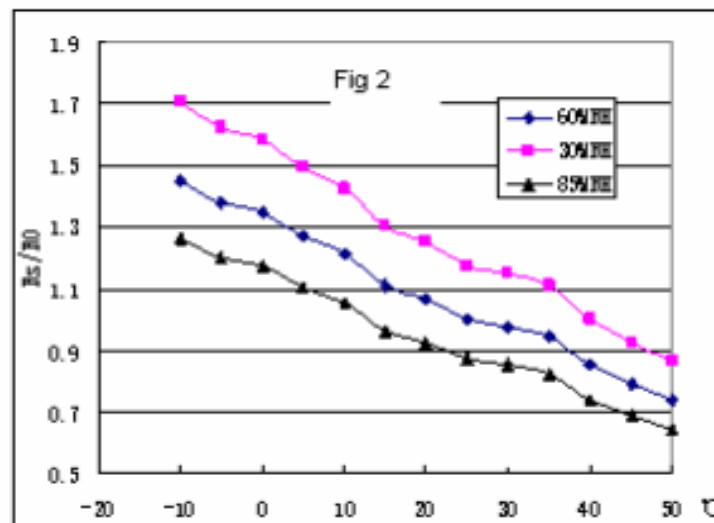


Figura 53. Influencia de temperatura y humedad [22].

11.3 IMPLEMENTACIÓN

Se realizó la conexión del sensor para la lectura de datos por medio de la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 como se muestra en la Figura 54.

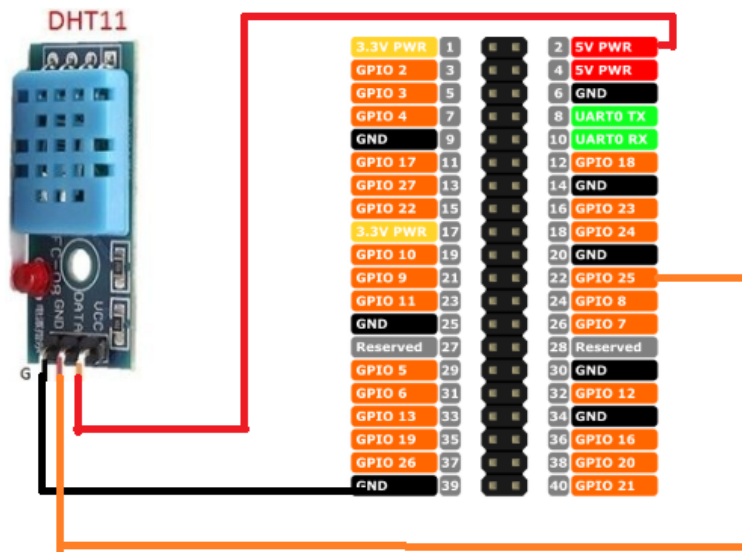


Figura 54. Plano conexión del sensor [38].

El sensor es conectado a la terminal GPIO 25 de la Raspberry Pi; para la lectura, se utiliza la librería Adafruit, con esto se pueden obtener datos de temperatura y humedad del ambiente. A continuación, en la Figura 55 se muestra el diagrama de flujo de la lectura del sensor de temperatura ambiente.

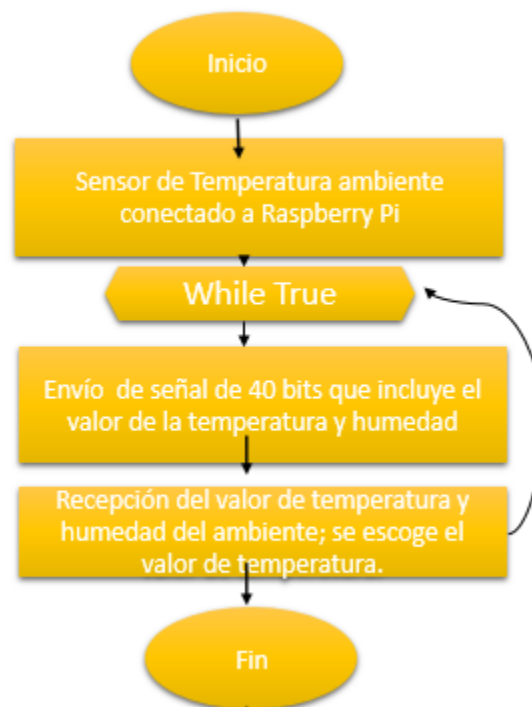


Figura 55. Diagrama de flujo de lectura de sensor temperatura ambiente.

Luego se realizó la conexión del sensor de ozono por un convertidor de nivel lógico TTL que reduce el voltaje, la lectura datos se hace de forma análoga por medio del ADC MCP3008, se usa el puerto 0 para leer y se conecta a RX0 de TTL, el otro lado está RX1 que esta al pin analógico A0 del sensor, luego se conecta la alimentación normal VCC y GND de TTL y ADC para la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 como se muestra en la Figura 56.

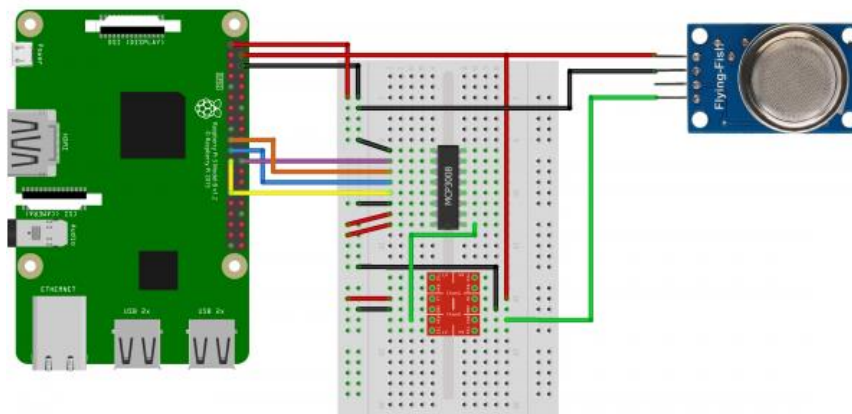


Figura 56. Plano de conexión [49].

A continuación, en la Figura 57 se muestra el diagrama de flujo del código de lectura del sensor de ozono.

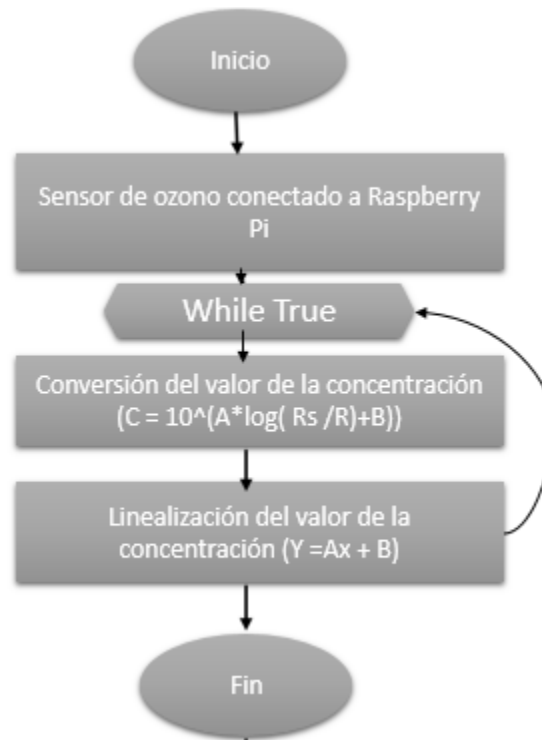


Figura 57. Diagrama de flujo de lectura del sensor de ozono.

12. VISUALIZACIÓN DE VARIABLES DEL SISTEMA ACUAPONÍCO GENERAL POR THINGSPEAK Y BLYNK

12.1 INTRODUCCIÓN

El monitoreo constante de variables en cualquier cultivo ya sea convencional, acuícola, hidropónico implica la visualización remota en tiempo real para conocer el estado en que se encuentra. Hoy en día existen diversas herramientas que permiten monitorear estos tipos de técnicas de cultivo como los hidropónicos (cultivo de plantas con disoluciones minerales en vez de tierra), en el sistema acuaponico a pequeña escala se realiza por medio del software libre Blynk como aplicativo móvil el cual nos proporciona la información en Gráficas de tiempo real y su arquitectura se muestra en la Figura 58, y ThingSpeak como aplicativo web.

Desde Blynk se envía referencia sobre la variable de control, como es pH, temperatura y nivel de agua y se recibe el censado de las mismas por medio de los sensores, monitoreando así las variables.

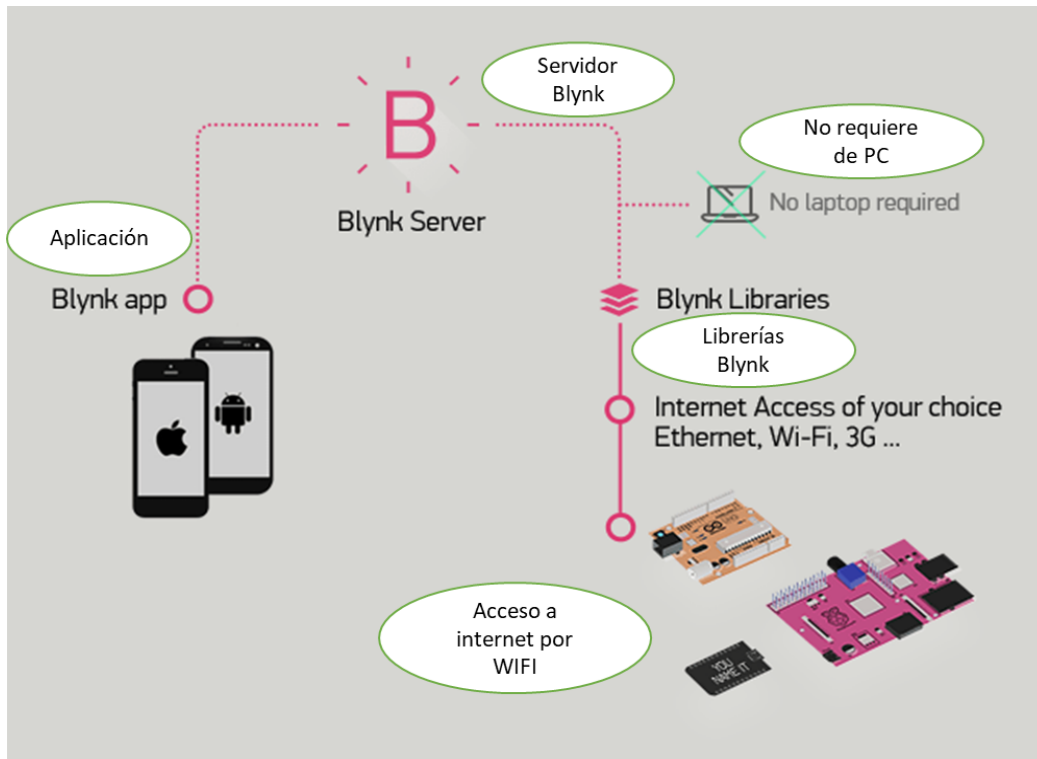


Figura 58. Conexión Blynk [50].

La plataforma web encargada de recibir y almacenar los datos en la nube es ThingSpeak como se muestra en la Figura 59, esta plataforma proporciona servicios gratuitos de almacenamiento y también de adquisición de datos por un tiempo aproximado de 18 segundos, es decir, que, si la subida de datos es mayor a esa velocidad, la plataforma comenzara a cobrar por cada segundo de subida. Para incorporar la aplicación de ThingSpeak al sistema, se debe tener en cuenta el código de acceso API KEY, este código es adquirido al momento de crear el canal, ya teniendo la cuenta de usuario.

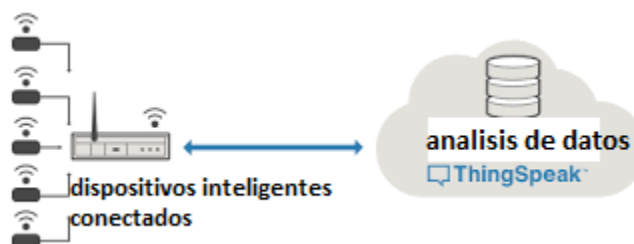


Figura 59. Conexión ThingSpeak [51].

Luego se realizó aplicación móvil para controlar y monitorear el sistema acuapónico de forma remota como se muestra en la Figura 60.

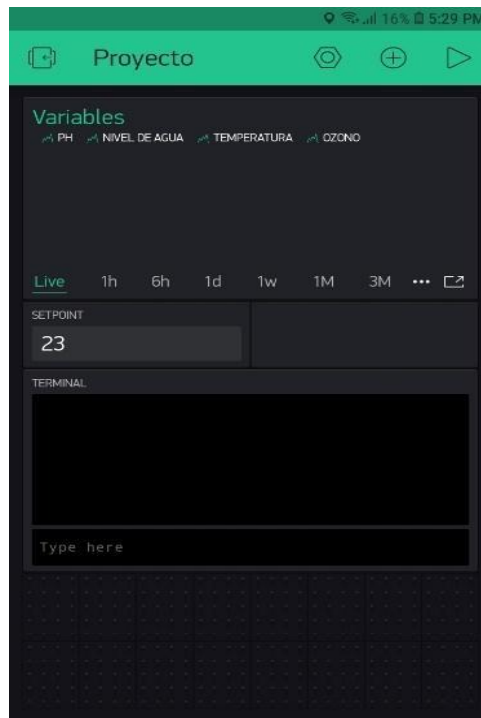
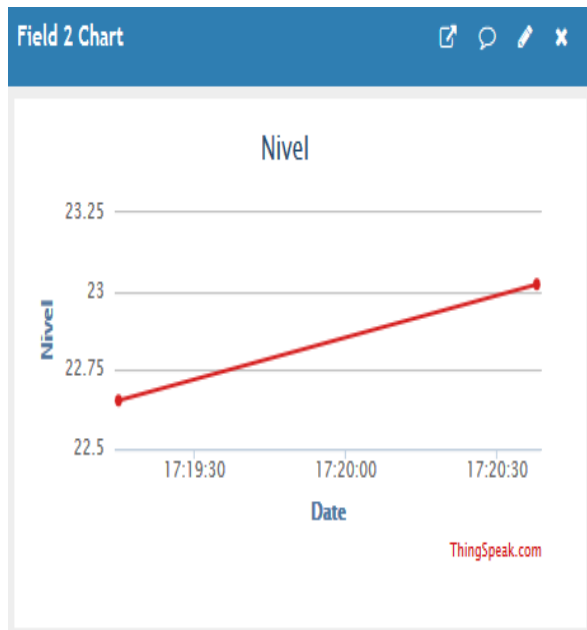


Figura 60. Interfaz gráfica móvil.

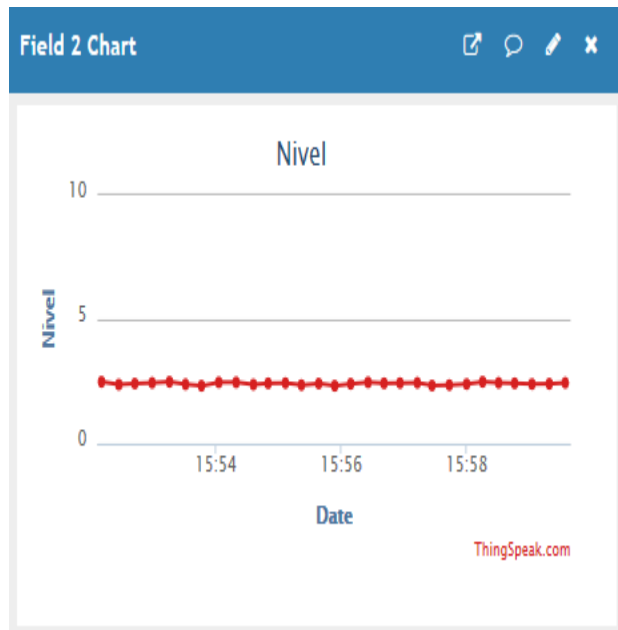
El código para lectura y subida de datos a la nube está en el anexo D.

12.2 NIVEL DE AGUA

Esta es una de las variables más importantes para aplicarle no solo control sino también monitoreo constante. Este monitoreo se realiza programando la Raspberry Pi para que a la vez de controlar la variable pueda subir datos a la nube y poder ser visualizada en una plataforma web y móvil. En la Figura 61, se observa el monitoreo en ThingSpeak.



a)



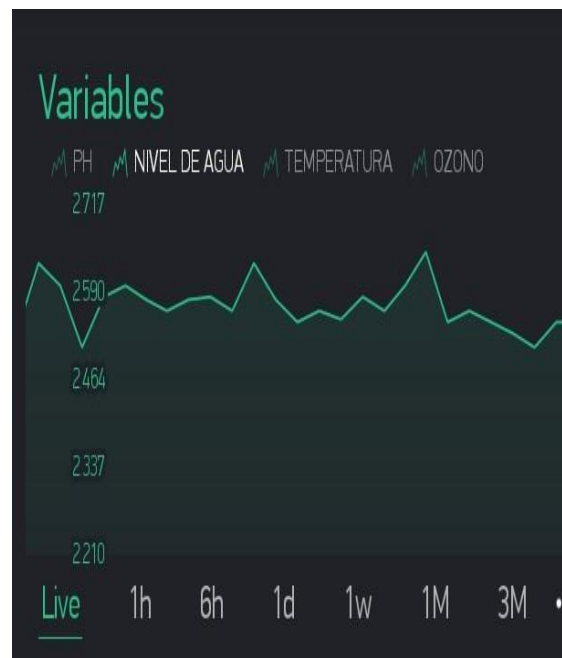
b)

Figura 61. Gráfica de nivel de agua en ThingSpeak a) tomando valores variables y b) valores constantes.

Desde Blynk se envía la referencia sobre la variable de control de nivel y en un chart, se pueden observar en tiempo real los cambios que se ven en el sistema respecto a la variable (ver Figura 62).



a)



b)

Figura 62. Gráfica de nivel de agua en Blynk a) tomando valores variables y b) valores constantes.

12.3 TEMPERATURA EN EL AGUA

Principalmente además de realizar acciones de control en el sistema, para la variable de temperatura se debe hacer uso del monitoreo, este se realiza programando la Raspberry Pi para que a la vez de controlar la variable pueda subir datos a la nube y poder ser visualizada en una plataforma web y móvil.

A continuación, en la Figura 63 se muestra el comportamiento de la variable en ThingSpeak.

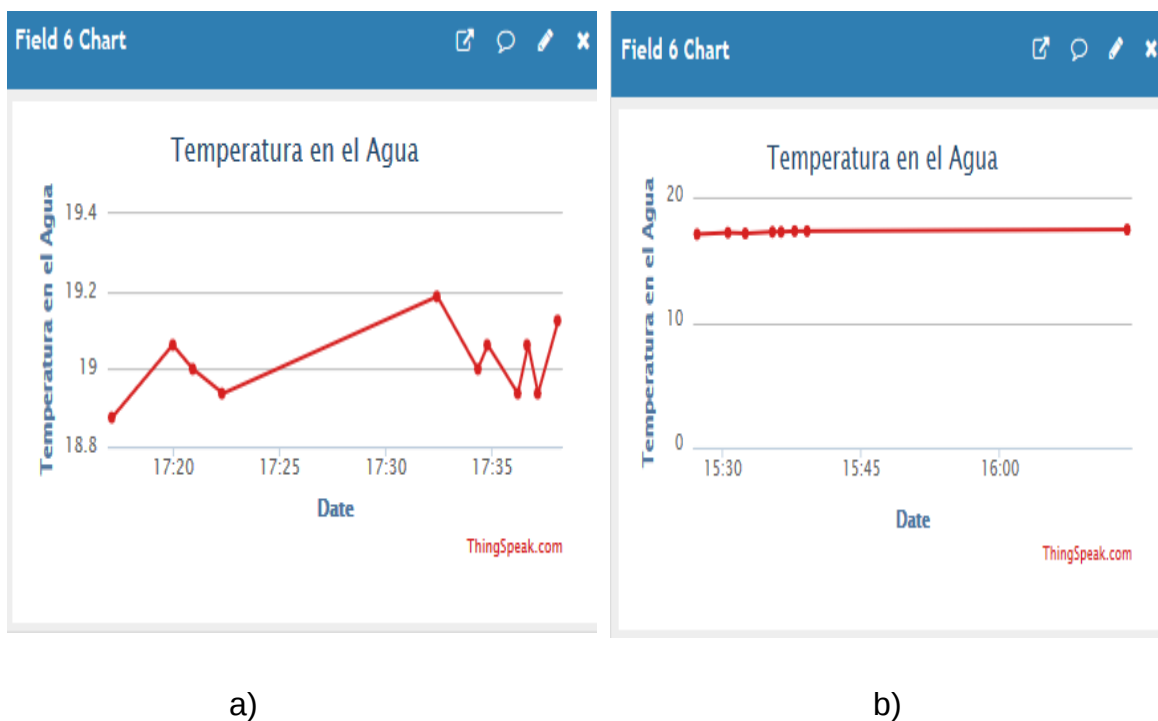


Figura 63. Gráfica de temperatura del agua en ThingSpeak a) tomando valores variables y b) valores constantes.

Desde Blynk se envía el set point o referencia sobre la variable de control temperatura y en un chart, se pueden observar en tiempo real los cambios que se ven en el sistema respecto a la variable (ver Figura 64).

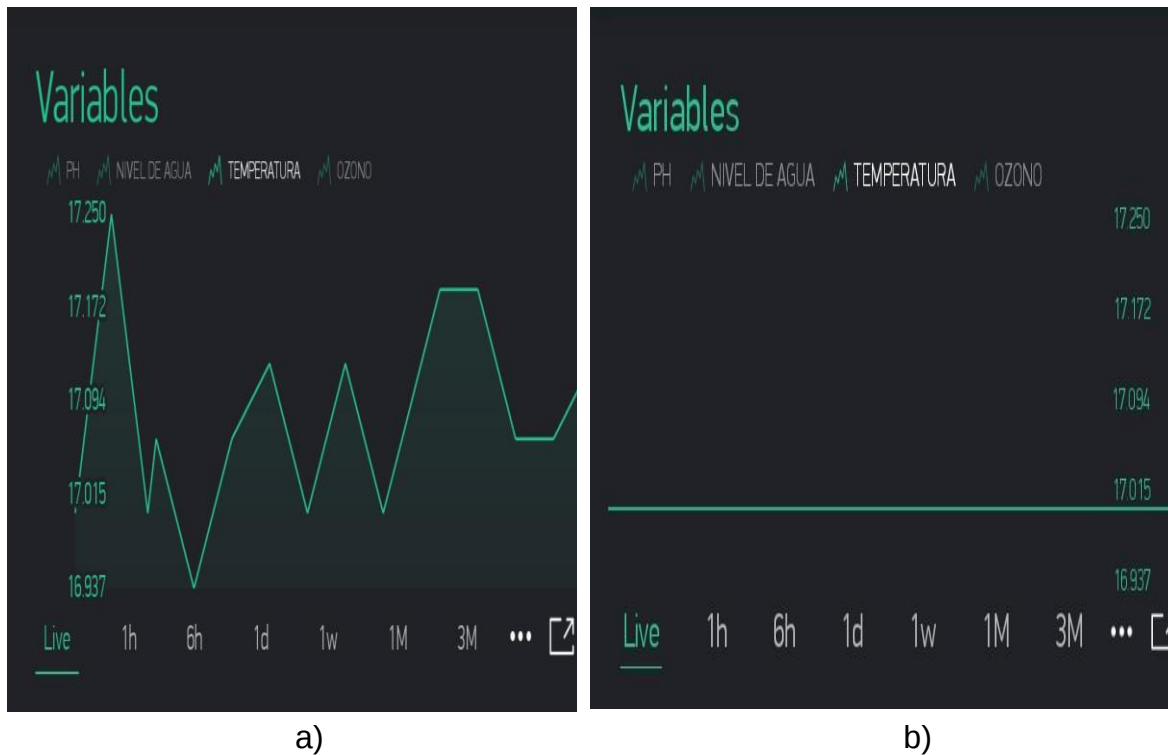
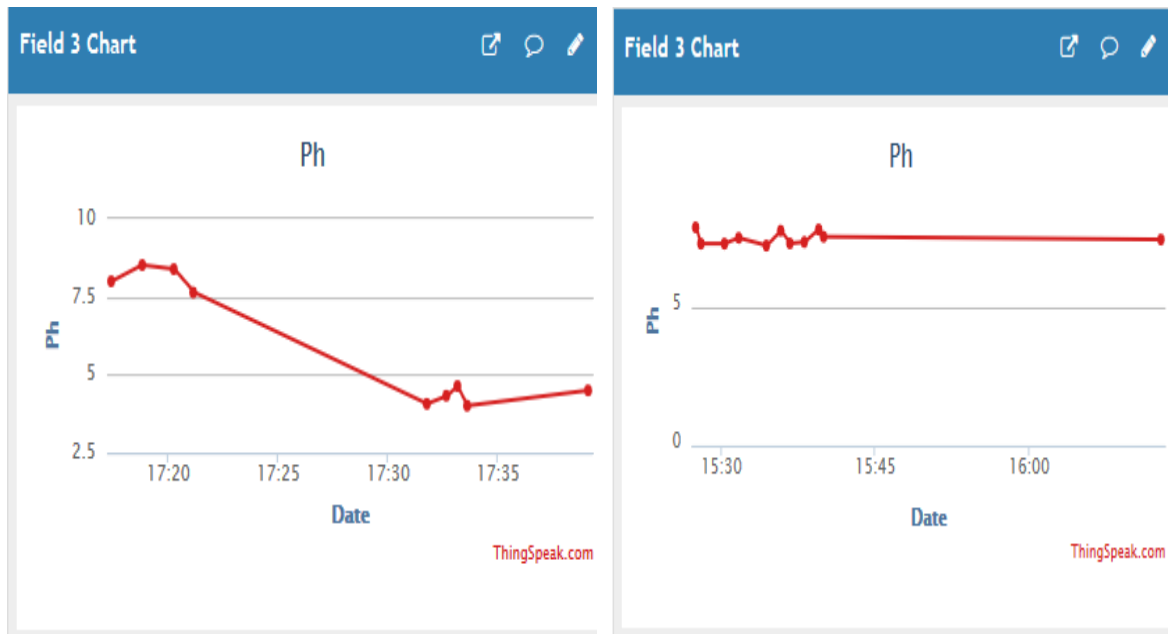


Figura 64. Gráfica de temperatura del agua en la aplicación Blynk a) tomando valores variables y b) valores constantes.

12.4 PH

La variable de pH requiere de mucho tiempo para llegar a un punto de establecimiento según se fije la referencia requerida, debido a la realimentación que hay en el sistema, el pH puede llegar a alterarse y es allí donde el control es reflejado, para que el control entre en funcionamiento se debe enviar la referencia desde Blynk, y posteriormente el constante monitoreo tanto en esta aplicación como en la plataforma web. A continuación, en la Figura 65 se muestra el comportamiento de la variable en ThingSpeak.

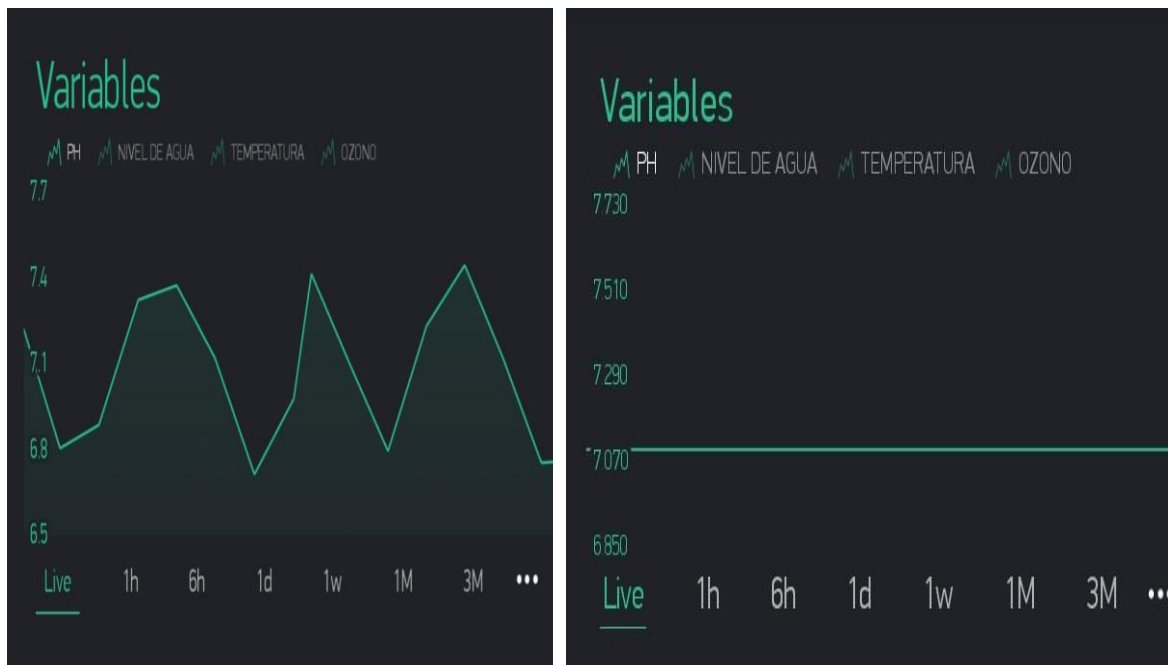


a)

b)

Figura 65. Gráfica de pH en ThingSpeak a) tomando valores variables y b) valores constantes.

Desde Blynk se envía la referencia sobre la variable de control de pH y en un chart, se pueden observar en tiempo real los cambios que se ven en el sistema respecto a la variable (ver Figura 66).



a)

b)

Figura 66. Gráfica pH en la aplicación Blynk a) tomando valores variables y b) valores constantes.

12.5 TEMPERATURA EN EL AMBIENTE

Esta variable supervisa la temperatura ambiente del sistema. Este monitoreo se realiza programando la Raspberry Pi pueda subir datos a la nube y poder ser visualizada en una plataforma web y móvil como se muestra en la Figura 67.

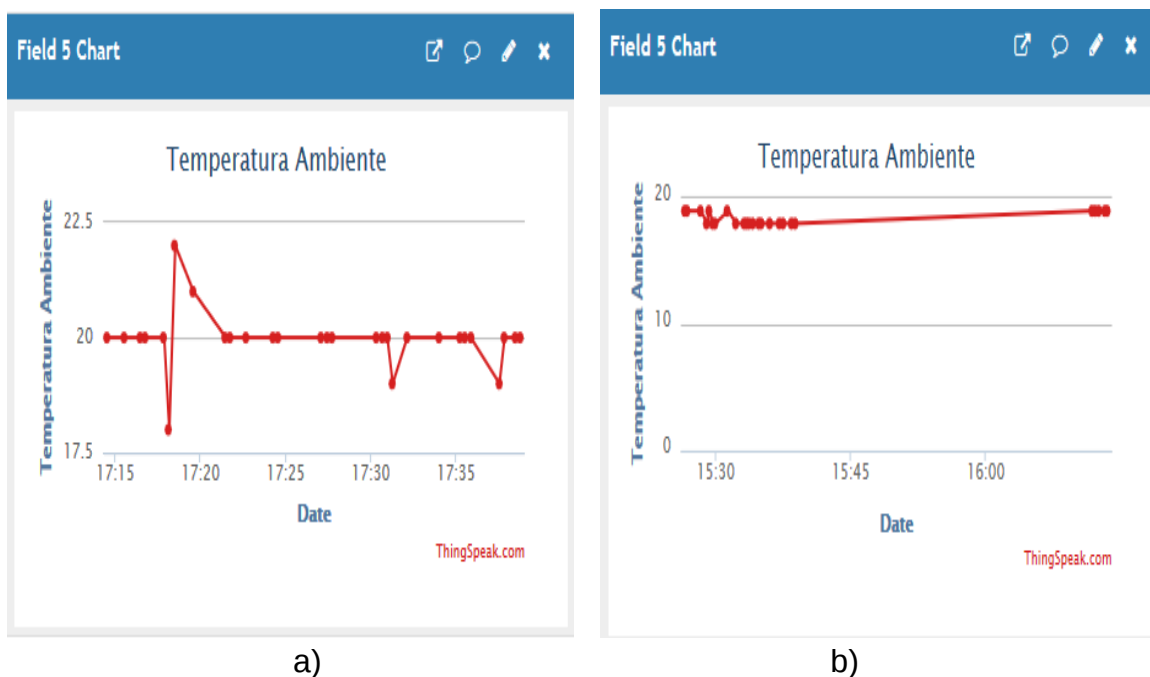
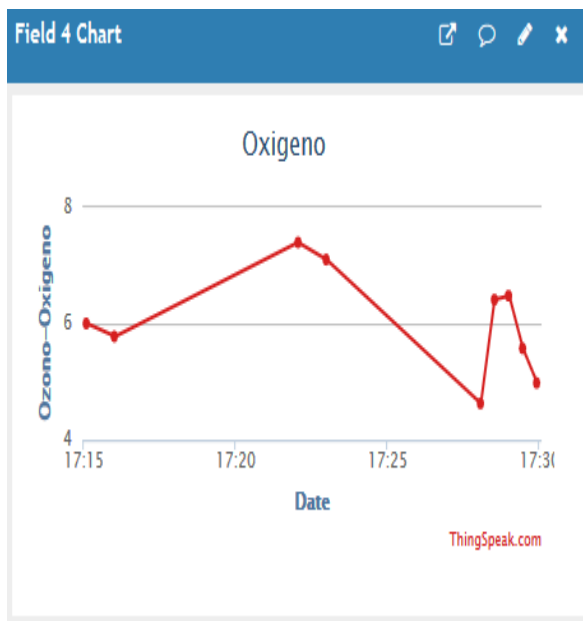


Figura 67. Gráfica de temperatura ambiente en ThingSpeak a) tomando valores variables y b) valores constantes.

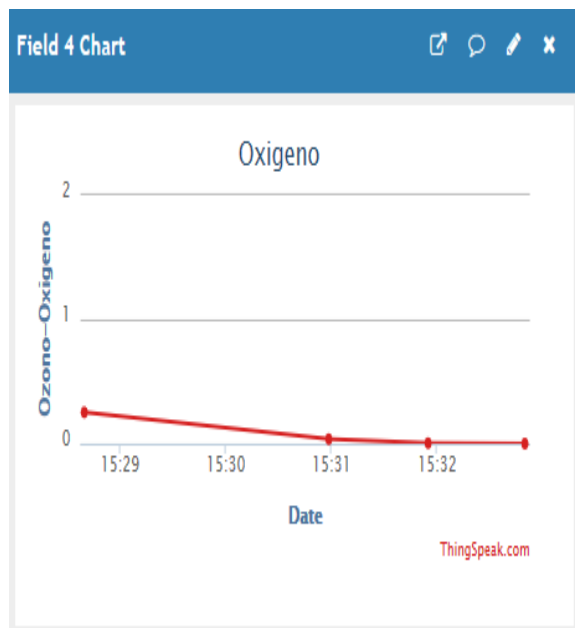
La visualización de la variable por la plataforma móvil se realiza por la aplicación Blynk en su versión más reciente (v2.4). Esta aplicación puede ser descargada y a través de ella se puede configurar para la tarjeta que se desee.

12.6 OZONO

El monitoreo de esta variable es muy importante, ya que genera un aproximado del oxígeno disuelto del sistema. Este monitoreo se realiza programando la Raspberry Pi pueda subir datos a la nube y poder ser visualizada en una plataforma web y móvil como se muestra en la Figura 68.



a)



b)

Figura 68. Gráfica de ozono en ThingSpeak a) tomando valores variables y b) valores constantes.

La visualización de la variable por la plataforma móvil se realiza por la aplicación Blynk en su versión más reciente (v2.4). Esta aplicación puede ser descargada y a través de ella se puede configurar para la tarjeta que se desee (ver Figura 69).



a)



b)

Figura 69. Gráfica ozono en la aplicación Blynk a) tomando valores variables y b) valores constantes.

13. CONCLUSIONES GENERALES

Se diseñó el sistema acuapónico para medir algunas variables ambientales aplicadas al mismo.

Se implementaron estrategias de control para las variables de nivel de agua y ph en el tanque, los cuales cumplieron con el propósito de mantener dichas variables en el valor deseado. Dada una dinámica lenta propia de los sistemas acuapónicos, se observó que controladores on-off pueden ser aplicados con el fin de mantener rangos de nivel de agua y ph adecuados.

Para el caso del control de temperatura en el tanque, se encontró que una solución comercial de bajo costo como lo es un calentador sumergible es suficiente para mantener la variable dentro de los rangos adecuados, presentando rechazo ante perturbaciones externas. Con el fin de variar la referencia de temperatura, se diseñó un mecanismo de acceso remoto mediante un servomotor conectado a un dispositivo Raspberry.

La aplicación de Blynk permitió observar y hacer cambios de referencia en tiempo real, proporcionando información al usuario de los datos de las variables del sistema acuapónico. Al igual que en ThingSpeak, los datos pueden ser monitoreados.

El uso de la Raspberry Pi promueve el desarrollo de aplicaciones mediante un lenguaje de programación versátil como lo es Python, gracias a este lenguaje, el desarrollo de la lectura y el control de las variables mencionadas fue posible, puesto que se encuentra documentación completa que facilita la buena comprensión al programar.

En el momento de construir el sistema acuapónico, se evidenciaron algunos problemas para instalar y acoplar los actuadores en el cultivo acuapónico, pero se resolvieron por medio del uso de herramientas como: pegante, segueta, chupas adhesivas, tubería PVC.

14. TRABAJOS FUTUROS

El sistema acuapónico está listo para que áreas de Ingeniería Ambiental lo puedan utilizar para incorporar cualquier tipo de peces y hortalizas de clima caliente, se puede llevar a un tamaño más escalable, cambiando la estructura, material, tamaño de los tanques, también se puede implementar un sistema para cultivar peces y hortalizas de clima frío para evitar un control de temperatura.

Estos sistemas se pueden implementar por medio de campañas de proyección social, compañías privadas y públicas que promuevan el uso de la agricultura urbana orgánica, en lugares como terrazas de casas, apartamentos amplios, edificios empresariales.

Se pueden implementar sistemas acuapónicos que controlen las variables más esenciales: temperatura, pH y oxígeno disuelto del agua, con el uso de sensores inalámbricos, solucionando así problemas de cableado, también aplicando el concepto de IoT (Internet de las cosas).

15. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Nuñez, «bioeconomia,» 14 05 2010. [En línea]. Available: <https://www.bioeconomia.com.ar/2018/05/18/acuaponia-el-futuro-de-los-alimentos/>.
- [2] FAO, «Organizacion de las Naciones Unidas para la alimentacion y la agricultura,» 19 agosto 2015. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/zhc/detail-events/es/c/325888/>.
- [3] RES, «ecointeligencia,» 17 marzo 2015. [En línea]. Available: <https://www.ecointeligencia.com/2015/03/acuaponia-equilibrio-peces-tomates/>.
- [4] DefinicionABC, «Cultivo,» [En línea]. Available: <https://www.definicionabc.com/general/cultivo.php>.
- [5] Concepto.de, «Dato,» [En línea]. Available: <https://concepto.de/dato/>.
- [6] Thefreedictionary, «Hidroponia,» [En línea]. Available: <https://es.thefreedictionary.com/hidropónica>.
- [7] Ecured, «Hortalizas,» [En línea]. Available: <https://www.ecured.cu/Hortalizas>.
- [8] SAP, «Internet of Things,» [En línea]. Available: <https://www.sap.com/latinamerica/trends/internet-of-things.html>.
- [9] Brainly, «Que es el Ozono,» [En línea]. Available: <https://brainly.lat/tarea/7512517>.
- [10] L. Dictionaries, «pH,» [En línea]. Available: <https://www.lexico.com/es/definicion/ph>.
- [11] Concepto.de, «Programacion,» [En línea]. Available: <https://concepto.de/programacion/>.
- [12] Desarrolloweb, «Python,» [En línea]. Available: <https://desarrolloweb.com/articulos/1325.php>.
- [13] CourseHero, «Raspberry Pi,» [En línea]. Available: www.shareasale.com/r.cfm?b=661825&u=742098&m=55976&afftrack=at106062_a138768_m12_p11888_cCO&urllink=www.coursehero.com%2Ffile%2Fp5v9b4q%2FRaspberry-Pi-es-un-ordenador-de-placa-reducida-o-placa-%25C3%25BAnica-SBC-de-bajo-coste%2F.
- [14] Definicion.de, «Red,» [En línea]. Available: <https://definicion.de/red/>.
- [15] RAE, «Sensor,» [En línea]. Available: <http://www.rae.es/>.
- [16] Upcommons, «Sistemas de Control,» [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5>.
- [17] Significados.com, «Retroalimentacion Negativa y Positiva,» [En línea]. Available: <https://www.significados.com/retroalimentacion-positiva-y-negativa/>.
- [18] RAE, «Temperatura,» [En línea]. Available: <http://www.rae.es/>.
- [19] Pau, «Nautical News Today,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.nauticalnewstoday.com/acuaponia-alimentaria-sostenible/>.
- [20] A. Colagrosso, «Instalación y manejo de sistemas de cultivo acuapónicos a pequeña escala,» Bogota, 2014.
- [21] A. Cardoso, Eco inteligencia, 14 octubre 2014. [En línea]. Available: <https://www.ecointeligencia.com/2015/03/acuaponia-equilibrio-peces-tomates/#lightbox/1/>. [Último acceso: 20 agosto 2017].
- [22] O. Polanco Rengifo, «informe de gestion,» MInagricultura, Bogota D.C, 2015.
- [23] A. I. Valen, «Decreto Numero 1780 de 2015,» Ministerio de agricultura y desarrollo rural, Colombia, 2015.
- [24] H. I. Y. K. y J. I. , «A reliable wireless control system for tomato hydroponics,» *IEEE*, 5 Mayo 2016.
- [25] A. Y. Tovar, K. B. D y V. H. Andaluz, «Automatic control of drip irrigation on hydroponic agriculture: Daniela tomato production,» *Automatica (ICA-ACCA)*, 12 Diciembre 2016.
- [26] M.F.Saaid, A.Sanuddin y M. Ali, «Automated pH controller system for hydroponic cultivation,» *IEEE*, nº 15523293, 12 April 2015.
- [27] D. S. Domingues, H. W. Takahashi y C. A. Camara, «Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production,» *Computers and electronic agriculture*, pp. 53-61, Junio 2012.
- [28] B. Delaide, S. Goddek y J. Gott, «1. Lettuce (Lactuca sativa L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics,» *Scopus*, 2016.
- [29] Bäuml B., Krishnasamy K y Nair J, «Hydroponic system for the treatment of anaerobic liquid,» *PubMed*, 2012.
- [30] C. Peuchpanngarm y P. Srinithiworawong, «DIY sensor-based automatic control mobile application for hydroponics,» *IEEE*, 2016.
- [31] J. Haissam y B. Delaide, «12. Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system,» *sciencedirect*, 2015.

- [32] P. Fowler, D. Baird y R. Bucklin, «Microcontrollers in Recirculating Aquaculture Systems,» *UOF*, 1994.
- [33] H. Hu, L. Xu y R. Wei, «Nonlinear adaptive Neuro-PID controller design for greenhouse environment based on RBF network,» *IEEE*, 2010.
- [34] Permautosuficiencia.blogspot, «Hidroponia y Acuaponia,» [En línea]. Available: <http://permautosuficiencia.blogspot.com/2016/12/hidroponia-y-acuaponia-como-cultivar.html>.
- [35] Gob, «acuacultura-tanque,» [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuacultura-tanque-circular-de-geomembrana>.
- [36] Intesc, «Intesc,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.intesc.mx/productos/sensor-ultrasonico/>.
- [37] Vistronica, «Vistronica,» 2019. [En línea]. Available: https://www.vistronica.com/sensores/gas/modulo-sensor-de-ozono-mq-131-detail.html?gclid=EAlaIqObChMIqO7PqOay5AIVA4bICh3h7g5PEAYYBCABEgLe1fD_BwE.
- [38] Microsoft, «Windows Dev Center,» 27 08 2017. [En línea]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/iot-core/learn-about-hardware/pinmappings/pinmappingsrpi>.
- [39] Geekfactory, «Geekfactory,» [En línea]. Available: <https://www.geekfactory.mx/tienda/sensores/ds18b20-sensor-de-temperatura-sumergible/>.
- [40] Seasaquarium, «Elreinodelosanimales,» [En línea]. Available: <https://elreinodelosanimales.com/filtros-calentadores-y-aireadores/413-calentador-sea-star-hx-906.html>.
- [41] UNAM, «Efecto Seebeck y Peltier,» [En línea]. Available: https://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria21/feria382_01_efecto_seebec_y_peltier.pdf.
- [42] D. Dibra, M. Stecher, A. Lindemann, J. Lutz y C. Kadow, «Seebeck difference - temperature sensors integrated into smart power technologies,» de *21st International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's*, Barcelona, Spain, 2009.
- [43] DFRobot, «DFRobot,» 2012. [En línea]. Available: https://wiki.dfrobot.com/PH_meter_SKU__SEN0161_.
- [44] A. M. Martin, 2012. [En línea]. Available: <http://materias.fi.uba.ar/6305/download/SOLUCIONES%20REGULADORAS%20DE%20pH.pdf>.
- [45] Carbotecnia, «que es el ph del agua,» [En línea]. Available: <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-el-ph-del-agua/>.
- [46] Quizlet, «Quizlet,» 2019. [En línea]. Available: <https://quizlet.com/230601489/conocimientos-previos-flash-cards/>.
- [47] Sostenibilidaddep, «que es el ozono,» [En línea]. Available: <https://www.sostenibilidaddep.es/pages/index/que-es-el-ozono>.
- [48] Lenntech, «Porque es importante el oxigeno disuelto en el agua,» [En línea]. Available: <https://www.lenntech.es/por-que-es-importante-el-oxigeno-disuelto-en-el-agua.htm>.
- [49] R. P. TUTORIALS, «Configure and read out the Raspberry Pi gas sensor (MQ-X),» [En línea]. Available: <https://tutorials-raspberrypi.com/configure-and-read-out-the-raspberry-pi-gas-sensor-mq-x/>.
- [50] Blynk, «How Blynk Works,» [En línea]. Available: <https://docs.blynk.cc/>.
- [51] J. P. P. y. M. Merino, «Definicionde,» 2011. [En línea]. Available: <https://definicion.de/red-inalambrica/>.

16. ANEXOS

ANEXO A

Programación de control y monitoreo de nivel de agua

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: utf-8 -*-import sys
import RPi.GPIO as GPIO
import os
import time
from time import sleep
import BlynkLib

global sp
sp=0
VACEAR = 37
LLENAR = 35
GPIO_TRIGGER = 11
GPIO_ECHO = 13
GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
GPIO.setup(VACEAR, GPIO.OUT)
GPIO.setup(LLENAR, GPIO.OUT)
GPIO.setup(GPIO_TRIGGER, GPIO.OUT)
GPIO.setup(GPIO_ECHO, GPIO.IN)
x=0
e=0
#sp=8

BLYNK_AUTH = '24798e90faba4d4cbf906a3063f62d6a'
blynk = BlynkLib.Blynk(BLYNK_AUTH)

@blynk.VIRTUAL_WRITE(4)
def v1_write_handler(value):
    global sp
    for it in value:
        sp=float(it)

@blynk.VIRTUAL_READ(1)
def v1_read_handler():
    dt3=sensado()
    blynk.virtual_write(1, dt3)
    return dt3

def nivel():
    sens=v1_read_handler()
    blynk.run()
    x=float(sens)
    e=sp-x
```

```

    if e > 0.5:
        GPIO.output(LLENAR, GPIO.HIGH)
        sleep(1)
        GPIO.output(VACEAR, GPIO.LOW)
    elif e < -0.5:
        GPIO.output(VACEAR, GPIO.HIGH)
        sleep(1)
        GPIO.output(LLENAR, GPIO.LOW)
    else:
        GPIO.output(VACEAR, GPIO.LOW)
        GPIO.output(LLENAR, GPIO.LOW)

    print("Sp=%s"%sp)
    print("ym=%s"%sens)
    print("Error=%s" %e)

    sleep(1)

def sensado():

    GPIO.output(GPIO_TRIGGER, True)

    time.sleep(0.00001)
    GPIO.output(GPIO_TRIGGER, False)

    StartTime = time.time()
    StopTime = time.time()

    while GPIO.input(GPIO_ECHO) == 0:
        StartTime = time.time()

    while GPIO.input(GPIO_ECHO) == 1:
        StopTime = time.time()

    TimeElapsed = StopTime - StartTime
    distance = (TimeElapsed * 34000) / 2.0
    distances = 38-distance
    print('distance')
    print(distance)

    return distances

try:
    while True:

        nivel()
except KeyboardInterrupt:

    GPIO.cleanup()

```

ANEXO B

Programación de control y monitoreo de temperatura

```
matplotlib.use('Agg')

import PID
from Control_temp import PID
import time
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.interpolate import spline
import os
import glob
import RPi.GPIO as GPIO
from time import sleep
import blynklib

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
GPIO.setup(18, GPIO.OUT)
pwm=GPIO.PWM(18, 50)
pwm.start(0)

os.system('modprobe w1-gpio')
os.system('modprobe w1-therm')

#pin7raspberry
base_dir = '/sys/bus/w1/devices/'
device_folder = glob.glob(base_dir + '28*')[0]
device_file = device_folder + '/w1_slave'

P = 0.333
I = 0.93
D = 0.044
pid = PID.PID(P, I, D)

pid.SetPoint = 0.0
pid.setSampleTime(0.000094) # a second

global blynk
BLYNK_AUTH = '49628eb0b8a942ae9e67f831f636f366'
blynk = blynklib.Blynk(BLYNK_AUTH)

class control_temperatura():
    global sp
    sp=0

    def read_temp_raw(self):
        f = open(device_file, 'r')
        lines = f.readlines()
        f.close()
        return lines
```

```

def read_temp(self):
    lines = self.read_temp_raw()
    while lines[0].strip()[-3:] != 'YES':
        time.sleep(0.2)
        lines = self.read_temp_raw()
    equals_pos = lines[1].find('t=')
    if equals_pos != -1:
        temp_string = lines[1][equals_pos+2:]
        temp_c = float(temp_string) / 1000.0
        return temp_c

```

```

def SetAngle(self, angle):

    self.angle=angle
    duty = self.angle / 18 + 2.5
    GPIO.output(18, True)
    pwm.ChangeDutyCycle(duty)
    sleep(1)
    GPIO.output(18, False)
    pwm.ChangeDutyCycle(0)

```

```

def control_tmp(self):

    print('PID controller is running..')
    @blynk.handle_event('write V1')
    def write_virtual_pin_handler(pin, value):
        #self.value=value
        global sp
        for it in value:
            print(it)
            sp=float(it)

    total_sampling = 0
    sampling_i = 0
    feedback = 0

    measurement = 0
    feedback_list = []
    time_list = []
    setpoint_list = []
    temp_list=[]

    try:
        while True:
            #global blynk

            pid.update(feedback)
            output = pid.output

            temp= self.read_temp()
            blynk.run()

```

```

        if temp is not None:

            if pid.SetPoint > 0:
                feedback += temp + output
                x=((feedback*180)/47)
                time.sleep(2)
                self.SetAngle(int(x))
                print(x)

            print('i={0} desired.temp={1:0.1f} temp={2:0.1f}
pid.out={3:0.1f} feedback={4:0.1f}'
                .format(sampling_i, pid.SetPoint, temp, output,
feedback))

            if output > 0:
                print('turn on watering system')

            elif output < 0:
                print('turn off watering system')

        if sampling_i > 20:
            pid.SetPoint = sp

        time.sleep(1)
        sampling_i += 1
        total_sampling +=1

        temp_list.aplicacionend(temp)
        feedback_list.aplicacionend(feedback)
        setpoint_list.aplicacionend(pid.SetPoint)
        time_list.aplicacionend(sampling_i)

        #if sampling_i >= total_sampling:
        #break
        if pid.SetPoint==temp:
            break

except KeyboardInterrupt:
    print("exit")
    pwm.stop()

print("pid controller done.")
print("generating a report...")
time_sm = np.array(time_list)
time_smooth = np.linspace(time_sm.min(), time_sm.max(), 300)
feedback_smooth = spline(time_list, feedback_list, time_smooth)
temp_smooth=spline(time_list, temp_list, time_smooth)

fig1 = plt.gcf()
fig1.subplots_adjust(bottom=0.15, left=0.1)

plt.plot(time_smooth, temp_smooth, color='red')
plt.plot(time_list, setpoint_list, color='blue')
plt.xlim((0, total_sampling))
plt.ylim((min(feedback_list) - 0.5, max(feedback_list) + 0.5))
plt.xlabel('time (s)')
plt.ylabel('PID (PV)')

```

```

plt.title('temperatura PID Controller')

plt.grid(True)

fig1.savefig('/home/pi/Documents/proyecto/Control_temp/temp.png',
dpi=100)
print("finish")
pwm.stop()
GPIO.cleanup()

```

ANEXO C

Programación de control y monitoreo de pH

```

#!/usr/bin/python
import sys
import RPi.GPIO as GPIO
import os
from time import sleep
import spidev
import BlynkLib
global sp

alcalino=38
acidez=40

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
GPIO.setup(acidez,GPIO.OUT)
GPIO.setup(alcalino,GPIO.OUT)
a=GPIO.PWM(alcalino,50)
a.start(7.45)
b=GPIO.PWM(acidez,50)
b.start(7.45)

BLYNK_AUTH = '24798e90faba4d4cbf906a3063f62d6a'
blynk = BlynkLib.Blynk(BLYNK_AUTH)

x=0
e=0
sp=0
delay=1
ph_channel=1
offset=0.0

spi=spidev.SpiDev()
spi.open(0,0)
spi.max_speed_hz=1000000

def readdac(adcnun):
    if adcnun > 7 or adcnun < 0:
        return -1

```

```

    r = spi.xfer2([1, 8 + adcnum << 4, 0])
    data = ((r[1] & 3) << 8) + r[2]
    return data

def lecturaph(data,place):
    volts=((data*3.3)/(float(1024)))
    volts=round(volts,place)
    ph_value=(volts*3.5) + offset
    ph_value=round(ph_value,place)
    #print("volt", volts)
    return ph_value

@blynk.VIRTUAL_WRITE(4)
def v4_write_handler(value):
    global sp
    for it in value:
        sp=float(it)

@blynk.VIRTUAL_READ(0)
def v0_read_handler():

    ph_level=readdac(ph_channel)
    dt3=lecturaph(ph_level,2)
    blynk.virtual_write(0, dt3)
    return dt3

def control():
    sens=v0_read_handler()
    blynk.run()
    x=float(sens)

    e=sp-x
    if e > 0.5:
        b.ChangeDutyCycle((1.20*100)/20)
        sleep(1)
        b.ChangeDutyCycle((2.45*100)/20)

    elif e<-0.5:
        a.ChangeDutyCycle((1.20*100)/20)
        sleep(1)
        a.ChangeDutyCycle((2.45*100)/20)

    else:
        a.ChangeDutyCycle((0.65*100)/20)
        b.ChangeDutyCycle((0.65*100)/20)

    print("Sp=%s"%sp)
    print("ym=%s"%sens)
    print("Error=%s" %e)
    sleep(1)

while True:

```

```
control()
GPIO.cleanup()
```

ANEXO D

➤ Lectura y subida de datos de todas las variables

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: utf-8 -*-

import multiprocessing
import threading
import os
import sys
import RPi.GPIO as GPIO
import time
import glob
import urllib3
import spidev
from mq import *
import Adafruit_DHT

DHT_DATA_PIN = 22
dht11_sensor = Adafruit_DHT.DHT11

WORKER_NUMBER = 1
threads_cont = 1

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
GPIO.setup(7, GPIO.IN)
GPIO.setup(3, GPIO.OUT)
#set GPIO Pins
GPIO_TRIGGER = 11
GPIO_ECHO = 13
GPIO.setup(GPIO_TRIGGER, GPIO.OUT)
GPIO.setup(GPIO_ECHO, GPIO.IN)
#print ('Starting')

delay=10
ldr_channel=1
temp_channel=1

spi=spidev.SpiDev()
spi.open(0,0)
spi.max_speed_hz=1000000

os.system('modprobe w1-gpio')
os.system('modprobe w1-therm')

base_dir = '/sys/bus/w1/devices/'
device_folder = glob.glob(base_dir + '28*')[0]
```

```

device_file = device_folder + '/w1_slave'

threads_cont = 1
procesos_cont = 1

global dt

##funciones de procesos

def nube_temp():

    PID = os.getpid()
    def read_temp_raw():

        f = open(device_file, 'r')
        lines = f.readlines()
        f.close()
        return lines

    def read_temp():
        lines = read_temp_raw()
        while lines[0].strip()[-3:] != 'YES':
            time.sleep(10)
            lines = read_temp_raw()
        equals_pos = lines[1].find('t=')
        if equals_pos != -1:
            temp_string = lines[1][equals_pos+2:]
            temp_c = float(temp_string) / 1000.0
            time.sleep(10)
            #print (temp_c)
            return temp_c

    while True:
        temp=read_temp()
        print(temp)

        g =
        'https://api.ThingSpeak.com/update?api_key=QF6XZRB3X62LRV63&field6=%s'%
temp
        htp = urllib3.PoolManager()
        respnse = htp.request('GET', g)
        respnse.close()
        time.sleep(17)

def nube_ozono():
    PID = os.getpid()
    mq = MQ();

    while True:

        perc = mq.MQPercentage()
        sys.stdout.write("\r")
        sys.stdout.write("\033[K")
        sys.stdout.write("OZONO: %g ppm" % (perc["GAS_OZONE"]))
        sys.stdout.flush()
        time.sleep(10)

```

```

    g =
'https://api.ThingSpeak.com/update?api_key=QF6XZRB3X62LRV63&field4=%s'%
perc["GAS_OZONE"]
    http = urllib3.PoolManager()
    response = http.request('GET', g)
    response.close()
    time.sleep(17)

def nube_nivel():
    PID = os.getpid()
    def distance():

        GPIO.output(GPIO_TRIGGER, True)

        time.sleep(0.00001)
        GPIO.output(GPIO_TRIGGER, False)

        StartTime = time.time()
        StopTime = time.time()

        while GPIO.input(GPIO_ECHO) == 0:
            StartTime = time.time()

        while GPIO.input(GPIO_ECHO) == 1:
            StopTime = time.time()

        TimeElapsed = StopTime - StartTime
        distance = (TimeElapsed * 34000) / 2.0
        distances=35-distance

        time.sleep(10)

    return distances

    while True:
        dist=distance()
        print(dist)
        g =
'https://api.ThingSpeak.com/update?api_key=QF6XZRB3X62LRV63&field2=%s'%
dist
        http = urllib3.PoolManager()
        response = http.request('GET', g)
        response.close()
        time.sleep(17)

def nube_ph():
    PID = os.getpid()

    def readdac(adcnun):
        uno=4|2|((adcnun & 4) >> 2)
        dos=(adcnun & 3) << 6

        adc=spi.xfer2([uno,dos,0])

```

```

data=((adc[1] & 15) << 8) + adc[2]
return data

def lecturaph(data,place):
ph_value=((data*3.3)/(float(1024)))
ph_values=round(ph_value,place)
return ph_values

while True:
ph_level=readdac(temp_channel)
ph_value=lecturaph(ph_level,2)
print(ph_value)
time.sleep(delay)

g =
'https://api.ThingSpeak.com/update?api_key=QF6XZRB3X62LRV63&field3=%s'%
ph_value
htp = urllib3.PoolManager()
respnse = htp.request('GET', g)
respnse.close()
time.sleep(17)

def nube_ambiente():
while True:
humidity, temperature = Adafruit_DHT.read_retry(dht11_sensor,
DHT_DATA_PIN)
print("Temperatura Ambiente", temperature)
time.sleep(0.1)

g =
'https://api.ThingSpeak.com/update?api_key=QF6XZRB3X62LRV63&field5=%s'%
temperature
htp = urllib3.PoolManager()
respnse = htp.request('GET', g)
respnse.close()
time.sleep(17)

print ('Starting %d processes...' % WORKER_NUMBER)

jobs = []
for i in range(WORKER_NUMBER):

temp = multiprocessing.Process(target=nube_temp, args=())
nivel = multiprocessing.Process(target=nube_nivel, args=())
ph = multiprocessing.Process(target=nube_ph, args=())
ozono = multiprocessing.Process(target=nube_ozono, args=())
temp2 = multiprocessing.Process(target=nube_ambiente, args=())

jobs.aplicacionend(temp)
jobs.aplicacionend(nivel)
jobs.aplicacionend(ph)
jobs.aplicacionend(ozono)

```

```
jobs.aplicacionend(temp2)

temp.start()
nivel.start()
ph.start()
ozono.start()
temp2.start()

for j in range (WORKER_NUMBER):
    jobs[j].join

[2]
```