

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA GRANJA DE ACUAPONÍA AUTOMATIZADA CON
ELEMENTOS DE IMPRESIÓN 3D**

DÚBER ALEXÁNDER MÉNDEZ PAMPLONA

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS MECATRÓNICOS
MEDELLÍN**

2025

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA GRANJA DE ACUAPONÍA AUTOMATIZADA CON
ELEMENTOS DE IMPRESIÓN 3D**

DÚBER ALEXÁNDER MÉNDEZ PAMPLONA

Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en Sistemas Mecatrónicos

Asesor metodológico

Juan Camilo Herrera Pineda

Magíster en Ingeniería Mecánica

Asesor Técnico

Sergio Hernando Ruiz Obando

Magíster en Tecnologías Digitales Aplicadas a la Educación

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TECNOLOGÍA EN SISTEMAS MECATRÓNICOS

MEDELLÍN

2025

Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Planteamiento del problema.....	12
1.1 Descripción.....	12
1.2 Formulación	13
2. Justificación	14
3. Objetivos.....	16
3.1 Objetivo general	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4. Marco teórico	17
4.1 Estado del arte	17
4.2 Referentes teóricos	18
4.2.1 Características del Sistema Acuapónico.....	18
4.2.2 Automatización de Granjas de Acuaponía	19
4.2.3 Sistemas de Filtración y Biorreactores.....	21
4.2.4 Ahorro de Costos y Accesibilidad.....	21
4.2.5 Componentes Sostenibles y Ecológicos	21
4.2.6 Integración de Tecnología de Impresión 3D y Automatización en Acuaponía	22
4.2.7 Dispositivos necesarios para la automatización en la Acuaponía	22
4.2.8 Programas utilizados en el proyecto.	34
5. Metodología	36
5.1 Tipo de proyecto.....	36
5.2 Método	36
5.3 Fases del Método.....	36
5.4 Instrumentos de recolección de información	37
5.4.1 Fuentes primarias.....	37
5.4.2 Fuentes secundarias	37
6. Resultados	38
6.1 Diseño de la estructura y modelado 3D	38
6.2 Diseño del sistema de monitoreo y control de variables.....	39

6.3 desarrollo del sistema de estructural usando técnica de prototipado rápido	39
6.4 Desarrollo del sistema de monitoreo y control usando dispositivos de control	41
6.5 Pruebas de funcionamiento a la granja de acuaponía.....	41
6.6 Avances consolidados y lecciones aprendidas	45
6.6.1. Diseño 3D y prototipado rápido.	45
6.6.2. Integración de hardware y software.....	45
6.6.3. Comedero automatizado propio.....	45
6.6.4. Diseño de la caja electrónica.	45
6.6.5. Identificación de riesgos.	45
7. Conclusiones	46
8. Recomendaciones	47
9. Referentes bibliográficos	49
10. Bibliografía	51
10. Anexos	53

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Tarjeta de Desarrollo ESP32.....	23
<i>Figura 2.</i> Sensor PH	24
<i>Figura 3.</i> Sensor de temperatura para el agua Termistor NTC 3950 10K.....	26
<i>Figura 4.</i> Sensor Ambiente DHT11.....	27
<i>Figura 5.</i> Motor NEMA 17.....	28
<i>Figura 6.</i> Driver controlador para el motor NEMA 17con disipador de calor	29
<i>Figura 7.</i> Pantalla LCD 20x4 parte frontal	30
<i>Figura 8.</i> Fuente suicheada de 12V 5A	30
<i>Figura 9.</i> Cables Macho Hembra.....	31
<i>Figura 10.</i> Placa universal para soldadura de componentes eléctricos	31
<i>Figura 11.</i> Dispensador de alimento para peces con tornillo sin fin	32
<i>Figura 12.</i> Bomba de aire para peces	33
<i>Figura 13.</i> Bomba para la recirculación del agua.....	33
<i>Figura 14.</i> Diseño 3D del montaje de la granja hecho con Fusión 360.....	38
<i>Figura 15.</i> Diseño caja protectora hecho con fusión 360	39
<i>Figura 16.</i> Diseño esquemático de conexión.....	39
<i>Figura 17.</i> Parte lateral del dispensador de alimentos para peces	40
<i>Figura 18.</i> Parte lateral del dispensador parametrizado en UltiMaker cura	41
<i>Figura 19.</i> Sistema conectado y funcional	41
<i>Figura 20.</i> Montaje físico de la granja.....	42
<i>Figura 21.</i> Camas para el cultivo de bacterias nitrificantes.....	43
<i>Figura 22.</i> Camas de cultivo para bacterias y peces.....	43
<i>Figura 23.</i> Sistema de monitoreo conectado y funcionando	44
<i>Figura 24.</i> Vista lateral de la granja	44
<i>Figura 25.</i> Sistema de monitoreo con la placa universal.....	45

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A. Código fuente del sistema automatizado de monitoreo y alimentación en granja acuapónica.....	53
Anexo B. Código fuente del sistema automatizado acuapónico (con explicación por partes)	59

Resumen

IMPLEMENTACIÓN DE UNA GRANJA DE ACUAPONÍA AUTOMATIZADA CON ELEMENTOS DE IMPRESIÓN 3D

DÚBER ALEXÁNDER MÉNDEZ PAMPLONA

Las granjas automatizadas de acuaponía con impresión 3D representan una solución innovadora ante los desafíos agrícolas actuales. La acuaponía integra la cría de peces con el cultivo de plantas en un ciclo cerrado que reduce el consumo de agua y elimina el uso de fertilizantes sintéticos, generando una producción más sostenible y eficiente. La automatización, apoyada en sensores y sistemas de control avanzados, permite monitorear y ajustar parámetros como el pH y la temperatura del agua, manteniendo un entorno óptimo para peces y plantas sin necesidad de intervención constante. Esta optimización favorece la productividad y eficiencia del sistema.

Por su parte, la impresión 3D cumple un papel esencial al facilitar la fabricación de componentes personalizados como estructuras de soporte, módulos de riego y bases para plantas. Esta tecnología reduce costos y tiempos de fabricación, al mismo tiempo que permite adaptar los diseños a las necesidades específicas del entorno. En Colombia, donde existe una abundante disponibilidad de recursos hídricos, este enfoque resulta particularmente prometedor, ya que permite el uso racional del agua y promueve prácticas agrícolas sostenibles.

Las granjas acuapónicas automatizadas mediante impresión 3D no solo mejoran la producción alimentaria, sino que también reducen el impacto ambiental. Al combinar tecnologías emergentes con principios ecológicos, este sistema agrícola ofrece una alternativa viable para el desarrollo de métodos de cultivo resilientes, responsables y alineados con los objetivos de sostenibilidad. De esta forma, se proyecta como una solución integral para afrontar los retos alimentarios del futuro con eficiencia y conciencia ambiental.

Palabras claves: acuaponía, hidroponía, peces, cultivo, automatización

Abstract

IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED AQUAPONIC FARM WITH 3D-PRINTED COMPONENTS

DÚBER ALEXÁNDER MÉNDEZ PAMPLONA

Automated aquaponic farms with 3D printing represent an innovative solution to today's agricultural challenges. Aquaponics integrates fish farming with plant cultivation in a closed-loop system that reduces water consumption and eliminates the use of synthetic fertilizers, resulting in more sustainable and efficient food production. Automation, supported by sensors and advanced control systems, allows for real-time monitoring and adjustment of parameters such as pH and water temperature, maintaining an optimal environment for both fish and plants without the need for constant human intervention. This optimization enhances the system's productivity and efficiency.

In turn, 3D printing plays a crucial role by enabling the production of customized components such as support structures, irrigation modules, and plant holders. This technology lowers costs and manufacturing times while allowing designs to be adapted to the specific needs of the environment. In Colombia, where there is an abundant availability of water resources, this approach is particularly promising, as it encourages the rational use of water and promotes sustainable farming practices.

Automated aquaponic farms with 3D printing not only improve food production but also reduce environmental impact. By combining emerging technologies with ecological principles, this agricultural system offers a viable alternative for the development of resilient, responsible, and sustainability-aligned farming methods. As such, it presents itself as a comprehensive solution to address future food challenges with both efficiency and environmental awareness.

Keywords: aquaponics, hydroponics, fish, cultivation, automation

Glosario

Acuaponía: sistema cerrado de cultivo de vegetales que integra acuicultura e hidroponía.

Automatización: el uso de sistemas y tecnologías de control para operar equipos y procesos con poca intervención humana. Esto puede incluir el control automatizado del riego, la alimentación, la temperatura y otros factores ambientales en las granjas.

Agricultura vertical: es un método para cultivar plantas en capas verticalmente apiladas, con frecuencia en entornos controlados, lo que permite un uso más eficiente del espacio.

Biofiltro: es un componente vital de los sistemas acuapónicos, utiliza bacterias beneficiosas para convertir los desechos tóxicos de los peces en nutrientes de origen vegetal.

Climatización: es el proceso de controlar la temperatura y otras condiciones ambientales en un entorno agrícola para maximizar el crecimiento de plantas y la cría de peces.

Hidroponía: técnica de cultivo que no necesita de la tierra.

Impresión 3D: técnica de fabricación digital que consiste en la adición de capas para la creación de objetos.

Sensor: dispositivo que detecta y reacciona a un estímulo físico como el producido por la temperatura, humedad, presión o nutrientes, el uso de sensores en granjas automatizadas es fundamental para monitorear y ajustar las condiciones de los cultivos en tiempo real.

Sostenibilidad: la capacidad de mantener procesos de producción agrícola sin agotar los recursos naturales o causar un daño significativo al medio ambiente. En comparación con la agricultura tradicional, las granjas automatizadas y acuapónicas se consideran soluciones más sostenibles.

Introducción

Hoy en día, la agricultura se enfrenta a desafíos significativos debido a la necesidad de desarrollar sistemas de producción sostenibles y eficientes. Si bien las prácticas agrícolas tradicionales han sido fundamentales para garantizar la seguridad alimentaria, presentan limitaciones importantes en cuanto al uso del agua, la eficiencia en la utilización de los recursos y la sostenibilidad a largo plazo. Ante este panorama, surge la necesidad de adoptar nuevos métodos de producción que permitan optimizar los sistemas agrícolas sin comprometer los recursos naturales. En este contexto, las granjas de acuaponía automatizadas y la integración de la tecnología de impresión 3D emergen como soluciones innovadoras para transformar el sector agrícola hacia un modelo más sustentable y tecnológicamente avanzado.

La acuaponía combina la acuicultura, es decir, la crianza de peces, con la hidroponía, o el cultivo de plantas sin suelo, en un sistema cerrado en el que los desechos de los peces sirven como nutrientes para las plantas, y estas purifican el agua que regresa al estanque. Este modelo reduce significativamente el consumo de agua, elimina el uso de fertilizantes sintéticos y permite una producción limpia, eficiente y de bajo impacto ambiental. No obstante, el éxito de estos sistemas depende en gran medida del control preciso de variables ambientales que influyen directamente en el desarrollo óptimo de peces y plantas.

La automatización permite mantener bajo control dichas variables, como el pH del agua, la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto, mediante sensores y sistemas de control que minimizan la necesidad de intervención humana constante. A su vez, la impresión 3D ofrece la posibilidad de fabricar piezas específicas y adaptadas a cada sistema, desde estructuras de soporte hasta mecanismos de distribución de agua y nutrientes, lo que reduce costos y permite mayor adaptabilidad del diseño.

El presente trabajo adopta un método experimental y descriptivo, enfocado en el diseño e implementación de un sistema automatizado para el monitoreo y control de una granja acuapónica. A través de prototipos funcionales, se identifican los parámetros ambientales clave y se evalúa el rendimiento del sistema bajo condiciones reales. La tecnología de impresión 3D es

empleada para crear componentes a medida que mejoran la eficiencia del sistema, mientras que las pruebas experimentales permiten describir de manera precisa el comportamiento del conjunto y sus posibilidades de optimización.

Entre las principales limitaciones, se destacan el acceso a tecnologías avanzadas de automatización y sensores de alta precisión, los cuales pueden representar una inversión considerable para pequeños productores. La durabilidad de los componentes impresos en 3D bajo condiciones ambientales extremas también es un aspecto a evaluar. Otra limitación clave es la disponibilidad y calidad de las fuentes de agua en algunas regiones, ya que el éxito de la acuaponía depende en gran medida del acceso a agua limpia y de calidad constante. Además, la tecnología requerida para implementar sistemas de monitoreo avanzado y de fabricación aditiva (impresión 3D) puede no ser accesible en áreas rurales.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

El continuo aumento de la población mundial plantea importantes desafíos relacionados con la seguridad alimentaria, Se prevé que más de 600 millones de personas en todo el mundo se enfrentarán al hambre en 2030 (ONU, 2023) la utilización de los recursos naturales y la sostenibilidad ambiental. Se está enfatizando el uso de granjas de acuaponía automatizadas con impresión 3D como una forma de abordar estos problemas y satisfacer la creciente demanda de alimentos. Sin embargo, existen varios obstáculos como las políticas internas del país que impiden su ejecución efectiva y su capacidad para enfrentar los desafíos que plantea el crecimiento demográfico.

La puesta en marcha de granjas acuapónicas automatizadas mediante impresión 3D representa un progreso crucial para la agricultura sustentable, necesitando la incorporación de sensores y sistemas de control que conserven condiciones exactas de temperatura, pH y oxígeno, indispensables para el crecimiento óptimo de peces y vegetación. En este escenario, la tecnología 3D facilita la producción de elementos a medida a un precio asequible, simplificando la infraestructura de las granjas y ajustándola a las demandas particulares de cada sistema. Sin embargo, la elaboración y puesta en marcha de un sistema automatizado eficaz demanda un entendimiento profundo de los ciclos biológicos y ambientales que inciden en las especies implicadas, lo que incrementa la exactitud y fiabilidad en la tecnología de seguimiento.

En términos prácticos, la implementación de un sistema automatizado de granjas acuapónicas con impresión 3D se topa con retos logísticos, económicos y de formación. La inversión inicial en dispositivos de vigilancia, sensores y tecnología de impresión en 3D es considerable, y la presencia de personal formado es escasa, particularmente en áreas rurales. Adicionalmente, es vital que el sistema tenga flexibilidad y se ajuste a fluctuaciones en las condiciones meteorológicas y la calidad del agua, atributos que pueden variar de una zona a otra. La impresión 3D ofrece un beneficio al simplificar la producción de componentes personalizados; no obstante, su conservación y funcionamiento también demandan habilidades especializadas.

1.2 Formulación

¿Cómo implementar una granja de acuaponía automatizada y con componentes impresos en 3D que facilite el monitoreo y control continuo de factores ambientales, promoviendo un crecimiento óptimo de peces y plantas?

2. Justificación

La urgente necesidad de encontrar soluciones novedosas para la producción agrícola está impulsada por varios factores globales interconectados, incluido el rápido crecimiento de la población mundial, la falta de recursos hídricos disponibles y la creciente importancia de preservar la naturaleza. El uso de granjas de acuaponía automatizadas que incorporan tecnologías de vanguardia como la automatización y la impresión 3D ofrece una solución completa a estos problemas.

Se prevé en el año 2050 un aumento de la población mundial de 2.000 millones de personas, que más la actual población correspondiente a 7.700 millones, alcanzará la cifra de 9.700 millones de personas, (ONU, 2020) esta situación está ejerciendo una presión significativa sobre los sistemas de producción de alimentos existentes. El aumento de la población exige un incremento de la producción de alimentos, sin que ello implique una expansión desenfrenada de las tierras cultivables, que ya son propensas a la erosión del suelo y a la pérdida de biodiversidad. La combinación de acuicultura e hidroponía en un ciclo cerrado y eficiente habilita granjas de acuaponía automatizadas, que permiten la producción intensiva de alimentos en áreas más pequeñas y controladas.

Además, el agotamiento de los recursos hídricos, exacerbado por el cambio climático y el uso extensivo de las fuentes de agua, plantea importantes desafíos a la agricultura tradicional. Los sistemas de acuaponía pueden reciclar y reutilizar el agua de una manera no tradicional, lo que resulta en una reducción del uso de agua hasta en un 90 % en comparación con los métodos agrícolas tradicionales (FAO, 2022). La automatización de estos sistemas permite la gestión precisa de parámetros cruciales como el pH, la temperatura y los niveles de oxígeno disuelto, lo que resulta en un mejor uso del agua y una disminución del desperdicio.

El uso de la impresión 3D en la producción agrícola permite la producción eficiente de herramientas y componentes personalizados para la producción agrícola. La implementación de esta tecnología da como resultado una reducción de costos, tiempos de producción más rápidos y la capacidad de diseñar soluciones que aborden los desafíos específicos de cada entorno en

crecimiento Al utilizar estos avances tecnológicos, no solo abordan los requisitos inmediatos para la producción de alimentos, sino que también brindan nuevas oportunidades para el desarrollo de una agricultura más resiliente y sostenible que pueda enfrentar los desafíos del siglo XXI.

De acuerdo con lo anterior, se pretende implementar el prototipo de una granja de acuaponía automatizada con elementos de impresión 3D a partir de un conjunto de etapas correspondientes al diseño, implementación y pruebas de funcionamiento que permitan validar el correcto comportamiento del sistema automatizado.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Implementar una granja de acuaponía automatizada usando dispositivos de control y elementos de impresión 3D, que permita tanto la producción intensiva de alimentos, como la cría de peces en áreas pequeñas y controladas.

3.2 Objetivos específicos

Diseñar la granja de acuaponía usando software de diseño asistido por computador, con el fin del establecimiento de los elementos necesarios para su construcción, garantizando el desarrollo de un entorno adecuado para plantas y peces.

Diseñar el sistema de monitoreo y control de factores como la temperatura del agua, pH, oxígeno disuelto y nutrición en la granja de acuaponía, empleando software de diseño eléctrico y electrónico, con el propósito de la determinación de los instrumentos necesarios para su fabricación.

Desarrollar el sistema estructural usando técnicas de prototipado rápido, que faciliten la construcción de la granja de acuaponía.

Desarrollar el sistema de monitoreo y control usando dispositivos de control que posibiliten la regulación de las variables involucradas.

Realizar pruebas de funcionamiento a la granja de acuaponía por medio de equipos de medición, que validen las acciones de monitoreo y control del sistema desarrollado.

4.Marco teórico

4.1 Estado del arte

La combinación de acuicultura, piscicultura y cultivo hidropónico de plantas en el agua se conoce como acuaponía, que es un sistema de cultivo que permite el uso eficiente de los recursos en un ambiente controlado y cerrado. Los desechos producidos por los peces en este sistema son utilizados por las plantas como fertilizantes, y las plantas filtran el agua y luego la devuelven a la pecera.

El desarrollo de un prototipo de sistema acuapónico automatizado con un funcionamiento mínimo viable (López & Roldán Vélez) tiene como objetivo principal demostrar la eficiencia y viabilidad de integrar tecnologías modernas en la agricultura sostenible. Un sistema acuapónico combina la cría de peces y el cultivo de plantas en un entorno cerrado y recirculante, donde los desechos producidos por los peces sirven como nutrientes para las plantas, y estas, a su vez, filtran y limpian el agua para los peces. La automatización de este proceso implica el uso de sensores, controladores y actuadores para monitorear y ajustar parámetros clave como la temperatura, el pH, los niveles de oxígeno y la calidad del agua, asegurando condiciones óptimas para ambos componentes del sistema, la implementación de este prototipo no solo demuestra la factibilidad técnica del sistema, sino que también proporciona datos valiosos sobre su rendimiento y eficiencia. Estos datos son cruciales para optimizar el diseño y funcionamiento del sistema, permitiendo ajustes que maximicen la producción de alimentos con el menor consumo de recursos posible.

En este artículo publicado en México llamado Sistemas Hidropónicos Sustentables Basados en el Reciclaje de Botellas de PET e Impresión 3D (Vichique & Guevara) presenta una innovadora propuesta en el campo de la hidroponía, donde se combina el reciclaje de botellas de PET con diseños en impresión 3D para desarrollar un sistema tipo NFT (película de nutrientes). La idea central es ofrecer un nuevo método de cultivo de hortalizas que no solo ahorre más agua que los sistemas convencionales, sino que también tenga un impacto positivo en el medio ambiente, la metodología propuesta se basa en la experimentación pura para establecer una

relación causal entre la fiabilidad del sistema hidropónico y los resultados en las hortalizas cosechadas, evaluadas en términos de peso, tamaño y calidad. Además, se abordan aspectos técnicos como la construcción del sistema, las fórmulas nutricionales para las hortalizas y la presentación de evidencias gráficas que respalden el desarrollo de este sistema.

4.2 Referentes teóricos

4.2.1 Características del Sistema Acuapónico. En cuanto al principio detrás de la acuaponía, es la simbiosis de plantas y peces. Los desperdicios metabólicos de los peces tales como el amoníaco son transformados en nitratos con la ayuda de las bacterias nitrificantes presentes en el agua. Estos nitratos son vitales para el desarrollo de las plantas, lo que hace que las plantas sobrealimenten a los peces en un sistema completamente autosuficiente. La principal ventaja de la acuaponía es que es un sistema sumamente ecológico y eficiente en el uso del agua (FAO). Este ciclo cerrado utiliza significativamente menos agua que los sistemas agrícolas convencionales, y evita el uso de fertilizantes químicos o pesticidas (Goddek, 2019).

Ventajas de la Acuaponía: se estima que la acuaponía puede consumir un 80-90% menos de agua que las tierras de cultivo regulares, haciéndola una solución perfecta para su uso en áreas con pocos recursos hídricos (FAO, 2022) . Además, la acuaponía permite una producción intensiva de alimentos en un espacio reducido, ya que se pueden cultivar plantas y criar peces en el mismo sistema, optimizando el uso de la tierra.

Además, la acuaponía también reduce significativamente la cantidad de residuos que se generan en la producción de plantas y peces. Los desechos de los peces son convertidos en un fertilizante natural que ayuda a nutrir las plantas, lo que elimina la necesidad de fertilizantes químicos tóxicos. Esto no solo reduce la cantidad de residuos que se generan, sino que también minimiza la cantidad de aguas residuales que necesitan ser tratadas. Esto hace que la acuaponía sea una opción sostenible y eco amigable para la producción de plantas y peces (FAO, 2022).

Desafíos de la Acuaponía: no obstante, la acuaponía enfrenta ciertas dificultades, el equilibrio entre las especies de peces y plantas es uno de los principales, mantener un balance entre la

cantidad de peces y plantas y las condiciones del agua, como el pH y la temperatura, es esencial para que el sistema funcione de manera óptima, problemas como la acumulación de toxinas en el agua requieren monitoreo y ajustes constantes (Goddek, 2019).

El conocimiento técnico necesario para manejar el sistema correctamente es otro desafío, aunque la acuaponía es muy eficaz, los agricultores necesitan aprender mucho sobre biología acuática, horticultura y sistemas de recirculación (Grozea, 2011).

4.2.2 Automatización de Granjas de Acuaponía. La automatización de granjas de acuaponía ha revolucionado este método de cultivo al permitir un control más preciso, eficiente y sostenible del sistema. La integración de tecnologías como sensores, sistemas de control automatizado, software de gestión y robots de mantenimiento permite monitorear y gestionar continuamente las condiciones del agua, el crecimiento de las plantas y la salud de los peces sin la necesidad de intervención manual constante.

Monitoreo de parámetros del Agua: dado que influirá en el crecimiento y supervivencia de las especies a cultivar, el agua debe tener características fisicoquímicas y biológicas apropiadas. Además, se debe inspeccionar para asegurarse de que no haya contaminantes como plaguicidas, metales pesados y bacterias patógenas, ya que estos pueden dañar la producción o afectar la calidad del producto final. Además, se deben controlar variables como temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, transparencia, pH, alcalinidad y dureza total para garantizar una mejor calidad del agua durante el proceso de producción (FAO, 2022).

Sistemas de Alimentación Automatizada: la alimentación de los peces es esencial para mantener la productividad del sistema en granjas acuapónicas, debido a que permiten distribuir alimentos a intervalos regulares y en cantidades precisas, las máquinas alimentadoras automáticas son un componente esencial de la automatización, esto mejora el crecimiento de los peces y evita la sobrealimentación, que puede causar una acumulación excesiva de desechos y afectar la calidad del agua. (Grozea, 2011).

El alimento representa el costo operativo más elevado en una empresa acuícola, por lo que su

manejo y suministro adecuado influirá directamente en la rentabilidad del cultivo. Las prácticas deficientes de alimentación pueden resultar en la presencia de enfermedades nutricionales e influir negativamente en el factor de conversión alimenticia, afectando la rentabilidad del cultivo. Los alimentos deberán ser nutricionalmente completos, es decir, contener todos los nutrientes esenciales incluyendo proteínas, ácidos grasos, carbohidratos y vitaminas, los cuales son necesarios para el buen desarrollo de los animales en las diferentes fases del cultivo. También deben tener una buena eficiencia de conversión, calculada como la relación entre el peso del alimento necesario para producir un kilo de pescado (Cuéllar-Anjel).

Control de Iluminación y Clima: el manejo del clima es crucial en los sistemas acuapónicos cerrados, la automatización de la iluminación artificial y el control del clima mediante sensores de humedad y temperatura ayuda a mantener las condiciones ideales para el crecimiento de las plantas. La programación automatizada de luces y ventiladores reduce los costos operativos al ahorrar energía (FAO, 2022).

Uso de Iot en la agricultura de precisión: la agricultura de precisión aspira a perfeccionar y potenciar los procesos agrícolas para asegurar la máxima productividad. Esto demanda mediciones distribuidas rápidas y fiables que proporcionen a los agricultores una visión más precisa de la situación presente en su zona de cultivo, gestionar la maquinaria automatizada, y realizar una gestión eficaz de recursos como energía, agua y abonos para la fertilización de las plantas y el desarrollo flora de las plantas (talavera).

Robótica en la Recolección y Mantenimiento: la recolección de plantas y el mantenimiento de unidades acuapónicas son algunos de los trabajos en los que la robótica ha comenzado a ser utilizada. Robots con cámaras y sensores pueden moverse a través del sistema, detectar problemas y realizar tareas de limpieza o recolección sin la necesidad de intervención humana (Bailey, n.d.).

Impresión 3D en Acuaponía: la impresión 3D ha comenzado a desempeñar un papel clave en la acuaponía, aportando soluciones innovadoras para la construcción de componentes personalizados y optimizados para estos sistemas. Esta tecnología permite la creación de estructuras y dispositivos que se ajustan a las necesidades específicas de las granjas acuapónicas,

mejorando la eficiencia, reduciendo costos y haciendo que los sistemas sean más accesibles.

Creación de Estructuras Personalizadas: la impresión 3D tiene un uso importante en Acuaponía para la creación de componentes personalizados como bandejas de cultivo, sistemas de tuberías y tanques. En lugar de depender de componentes prefabricados, los agricultores pueden crear componentes que se ajusten perfectamente a sus instalaciones y espacio disponible, maximizando así la eficiencia del sistema. Esto es especialmente útil en proyectos a pequeña escala o en espacios urbanos donde el espacio es limitado y los diseños personalizados son necesarios.

4.2.3 Sistemas de Filtración y Biorreactores. El uso de la impresión 3D ha permitido la creación de sistemas de filtración más eficientes que pueden mejorar la calidad del agua en las granjas acuapónicas. Estos sistemas pueden diseñarse para maximizar el flujo de agua y la superficie de contacto para las bacterias nitrificantes al filtrar los desechos producidos por los peces y convertirlos en nutrientes beneficiosos para las plantas. (Goddek, 2019) Además, los biorreactores impresos en 3D pueden ayudar a optimizar los procesos biológicos en las granjas, garantizando un reciclaje más efectivo de los nutrientes.

4.2.4 Ahorro de Costos y Accesibilidad: los agricultores acuapónicos pueden reducir significativamente los costos de sus sistemas mediante la impresión 3D, especialmente durante la fase de construcción. Los componentes impresos en 3D suelen ser más baratos que los componentes industriales convencionales y también pueden fabricarse in situ, lo que reduce los costos de transporte y logística. (Grozea, 2011).

4.2.5 Componentes Sostenibles y Ecológicos: la impresión 3D con materiales biodegradables o reciclados también ofrece un enfoque más sostenible para la acuaponía. Los recursos de fibras naturales son renovables en numerosos países. desarrollados ya que son económicas, no representan riesgos para la salud de la población. Los filamentos hechos de bioplásticos o materiales reciclados están siendo desarrollados, lo que permite la creación de componentes duraderos y ecológicos. Esto está en línea con los principios de sostenibilidad de la acuaponía, que buscan reducir el impacto ambiental y promover la eficiencia de los recursos

(Campaña) .

4.2.6 Integración de Tecnología de Impresión 3D y Automatización en Acuaponía: la combinación de la impresión 3D y la automatización en sistemas acuapónicos representa un avance significativo en la eficiencia, sostenibilidad y accesibilidad de esta tecnología. Al unir estas dos innovaciones, los agricultores pueden diseñar, construir y operar sistemas acuapónicos más eficientes, personalizados y optimizados, lo que permite maximizar la productividad y minimizar el uso de recursos.

4.2.7 Dispositivos necesarios para la automatización en la Acuaponía. La automatización ha emergido como una herramienta clave en los sistemas de acuaponía para mejorar la eficiencia, reducir la carga de trabajo y optimizar los procesos involucrados en la producción simultánea de peces y plantas. Los agricultores pueden monitorear y controlar las condiciones del sistema de manera más precisa y eficiente al integrar sensores, actuadores y controladores automáticos, lo que resulta en un uso más eficiente de los recursos y una mayor productividad.

El monitoreo constante de los parámetros vitales del sistema, como el pH, la temperatura del agua y la temperatura ambiental, es uno de los principales beneficios de la automatización en la acuaponía. Estos valores se miden a través de sensores electrónicos específicos, como el sensor de pH (modelo PH-4502C), un termistor NTC 10k Ω sumergido para la medición de temperatura del agua, y un sensor DHT11 para captar la temperatura ambiental. Estos sensores se conectan a una unidad de control central basada en la placa ESP32, que permite la lectura en tiempo real de cada variable, garantizando así condiciones estables y óptimas para el crecimiento saludable tanto de los peces como de las plantas.

ESP32: representa el "núcleo" del sistema automatizado. Es responsable de captar las señales de los sensores, procesar la información y realizar las acciones pertinentes, como encender ventiladores, exhibir datos en pantallas, o transmitir datos a una plataforma de IoT. Además, posibilita la conexión sin cables Wi-Fi o Bluetooth, lo que simplifica la supervisión a distancia desde una aplicación o servidor (electronica).

Este dispositivo cuenta con un procesador de doble núcleo (dual-core) que permite el procesamiento en paralelo y alcanza una frecuencia de hasta 240 MHz. Ofrece conectividad inalámbrica mediante Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth BLE, lo que lo hace ideal para aplicaciones de IoT. Dispone de más de 30 pines digitales y analógicos (GPIO), así como entradas analógicas (ADC) con una resolución de hasta 12 bits. Su bajo consumo energético lo convierte en una opción adecuada para sistemas alimentados por energía solar. Es compatible con entornos de programación como Arduino IDE, MicroPython y PlatformIO, y puede ser alimentado con 3.3V o mediante USB a 5V.



Figura 1. Tarjeta de Desarrollo ESP32

Fuente: elaboración propia

Sensor de pH: el pH del agua es uno de los parámetros más cruciales en la acuaponía porque tanto las plantas como los peces necesitan niveles específicos de pH para crecer de manera óptima. Los sensores de pH automatizados miden este parámetro continuamente y envían alertas si se sale del rango óptimo. Los sistemas automatizados pueden ajustar el nivel agregando compuestos ácidos o alcalinos para mantener el equilibrio, asegurando la salud de los organismos del sistema cuando el pH es inadecuado (FAO, 2022).

El pH tiene un impacto significativo en todas las facetas de la acuaponía, especialmente en las plantas y las bacterias. El pH regula el acceso a micro y macronutrientes para las plantas; cuando el pH está entre 6.0 y 6.5, todos los nutrientes están disponibles, pero cuando el pH está fuera de este rango, es más difícil para las plantas acceder a ellos. Un pH de 7.5 puede causar deficiencias nutricionales de hierro, fósforo y manganeso. Las bacterias nitrificantes tienen dificultades por debajo de un pH de 6, y en condiciones de pH ácido, la capacidad de las bacterias para convertir el amoníaco en nitrato puede disminuir. (FAO, 2022) .

De acuerdo con lo descrito anteriormente, en este proyecto se utilizará el sensor de pH – PH-4502C , el cual presenta las siguientes características que cumplen con lo necesario para realizar el proceso descrito anteriormente (electronica).

Esta sonda de pH presenta un rango de medición de 0.00 a 14.00 PH, con un punto cero de 7 ± 0.5 PH y un error de álcali de 0.2 PH. Ofrece un porcentaje teórico de pendiente del 98.5 % y una resistencia interna de aproximadamente 250 M Ω . Su tiempo de respuesta es de un minuto y funciona correctamente en un rango de temperatura entre 0 y 60 °C. Está equipada con un conector BNC, cuenta con un cable de aproximadamente 70 cm de longitud y presenta un diseño en color negro.



Figura 2. Sensor PH
Fuente: elaboración propia

Sensor de temperatura: la temperatura del agua afecta directamente el metabolismo de los peces y el crecimiento de las plantas. Los sensores de temperatura permiten monitorear y ajustar la temperatura automáticamente, lo que es especialmente útil en sistemas ubicados en climas extremos o en instalaciones interiores. Si la temperatura del agua se desvía del rango adecuado,

los sistemas de calefacción o refrigeración pueden activarse automáticamente para restablecer el equilibrio.

La temperatura afecta todos los elementos de los sistemas de acuaponía. Por lo general, se debe conservar entre 18 y 30 °C. Las fluctuaciones elevadas incrementan la vulnerabilidad de los peces a las enfermedades. No obstante, es necesario ajustar los controles de temperatura para prevenir que este valor se encuentre entre dos valores muy similares. (FAO, 2022).

De acuerdo con lo descrito anteriormente, en este proyecto se utilizará el sensor de temperatura Termistor NTC 3950 10K, el cual presenta las siguientes características que cumplen con lo necesario para realizar el proceso descrito anteriormente (electronica).

Este termistor cuenta con una resistencia de $10K \pm 1\%$ a 25 °C y un coeficiente B25/50 de $3950 \pm 1\%$. Su constante de tiempo térmica es de hasta 15 segundos y su rango de temperatura de funcionamiento va desde -40 °C hasta 150 °C. Posee un coeficiente de disipación de energía de 5 mW/°C en aire estático y una potencia nominal máxima de 45 mW. La constante de tiempo térmico en condiciones de aire estático es de 7 segundos, con un coeficiente de temperatura de resistencia que varía entre -2% y -5%. En cuanto a aislamiento, ofrece una resistencia de aislamiento de al menos 100 MΩ con 500 V DC, y soporta una tensión de 1800 V AC durante 5 segundos sin presentar fallos, a una corriente de 0.5 mA. Finalmente, incluye un cable de 1 metro de longitud para facilitar su instalación.



Figura 3. Sensor de temperatura para el agua Termistor NTC 3950 10K
Fuente: elaboración propia

Sensor de ambiente DHT11: facilita la medición de la temperatura ambiente del ambiente donde funciona el sistema de acuaponía. A pesar de que el control del agua es primordial en estos sistemas, las condiciones atmosféricas (principalmente la temperatura) tienen un impacto considerable en la transpiración de las plantas, la evaporación del agua y el rendimiento global del cultivo. El DHT11, debido a su habilidad para supervisar el aire alrededor, se transforma en un elemento esencial para regular ventiladores, cubrir el sistema o tomar decisiones vinculadas a la climatización del ambiente, especialmente en entornos cerrados como invernaderos o laboratorios. (electronica).

Este sensor digital de temperatura y humedad opera en un rango de temperatura de 0 °C a 50 °C, con una precisión de ± 2 °C y una resolución de 1 °C. Funciona con una alimentación de entre 3.3V y 5V, y su consumo de corriente es de aproximadamente 2.5 mA durante el proceso de lectura. Se recomienda realizar lecturas cada segundo para un rendimiento óptimo. La comunicación se realiza mediante una interfaz digital de un solo hilo, utilizando un único pin de datos para la transmisión de información.

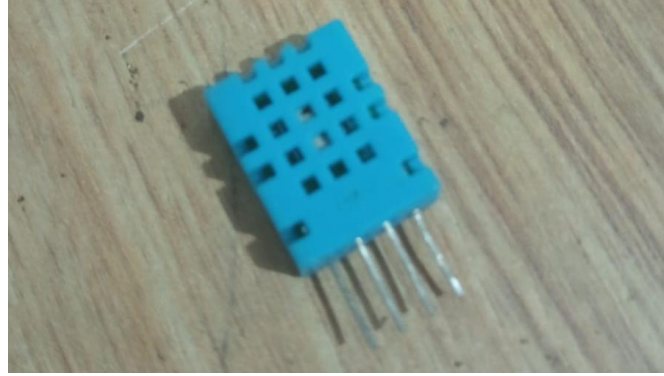


Figura 4. Sensor Ambiente DHT11

Fuente: elaboración propia

Motor NEMA 17: Stepper Motor se distingue por su sólido diseño y exactitud, destacando por un ángulo de paso de 1.8° que permite movimientos minuciosos de 200 pasos por revolución. Este movimiento minucioso facilita las labores que demandan precisión. Funcionando a 4 voltios con una corriente de 1.2 amperios por fase, proporciona un par de retención de 3.2 kg-cm, lo que asegura su fiabilidad. Su habilidad para mantener la posición bajo carga subraya su fiabilidad. (electronica). Conectado por cuatro hilos, se puede utilizar para CNC, Automatización, impresoras 3D y aplicaciones en general como robótica y control.

Este motor paso a paso ofrece 200 pasos por revolución y un torque de $0.4 \text{ N}\cdot\text{m}$, lo que lo hace ideal para aplicaciones de precisión. Funciona con un voltaje nominal de 2 V y consume 1.2 A por fase, con una resistencia de $1.7 \Omega \pm 10\%$ y una inductancia de $4.5 \text{ mH} \pm 20\%$ por fase. Dispone de cuatro cables identificados por colores (Verde: A1, Rojo: A2, Amarillo: B1, Rojo: B2) para facilitar su conexión. Su estructura corresponde al estándar NEMA 17 y su peso aproximado es de 250 gramos.



Figura 5. Motor NEMA 17

Fuente: elaboración propia

Driver Controlador: es necesario un controlador de motor, como el A4988 o el DRV8825, para que el ESP32 pueda manejar el motor paso a paso. Estos módulos de tamaño reducido facilitan la alimentación del motor con la corriente adecuada y la conversión de señales digitales en pasos regulados (electronica) .

Este controlador de motor paso a paso permite microstepping, lo que posibilita subdividir los pasos en mitades, cuartos, hasta dieciseisavos, logrando así movimientos más suaves y precisos. Soporta un voltaje de alimentación del motor de hasta 35 V y una corriente máxima de salida de 2 A por bobina, siempre que se utilice un disipador adecuado. Cuenta con entradas STEP y DIR, las cuales pueden ser controladas desde una ESP32 para gestionar la dirección y el número de pasos del motor con alta precisión.

Este controlador de motor paso a paso permite microstepping, lo que posibilita subdividir los pasos en mitades, cuartos, hasta dieciseisavos, logrando así movimientos más suaves y precisos. Soporta un voltaje de alimentación del motor de hasta 35 V y una corriente máxima de salida de 2 A por bobina, siempre que se utilice un disipador adecuado. Cuenta con entradas STEP y DIR, las cuales pueden ser controladas desde una ESP32 para gestionar la dirección y el número de pasos del motor con alta precisión.



Figura 6. Driver controlador para el motor NEMA 17 con disipador de calor
Fuente: elaboración propia

Pantalla LCD 20x4 con I2C: permite visualizar datos en tiempo real: temperatura del agua, temperatura ambiente, pH, estado de bombas, etc. La interfaz I2C reduce el número de pines requeridos (electronica).

Este display LCD cuenta con una configuración de 20 caracteres por 4 líneas, lo que permite visualizar información de forma clara y estructurada. Funciona con un voltaje de 5 V y utiliza una interfaz I2C, que requiere solo dos cables (SDA y SCL) para la comunicación, lo que simplifica su conexión al microcontrolador. Es comúnmente utilizado para mostrar variables directamente en el sistema, eliminando la necesidad de utilizar un monitor remoto para la visualización de datos.



Figura 7. Pantalla LCD 20x4 parte frontal

Fuente: elaboración propia

Fuente de Alimentación switchada: proporciona energía estable a todo el sistema, se pueden usar de todo tipo dependiendo del consumo, En este caso utilizaremos de 12 voltios para alimentar el driver del motor NEMA17. También se puede utilizar baterías para el sistema.



Figura 8. Fuente suicheada de 12V 5A

Fuente: elaboración propia

Cables: necesarios para la alimentación y transmisión de datos desde los sensores hacia la ESP32.



Figura 9. Cables Macho Hembra
Fuente: elaboración propia

Placa de conexión universal: esta nos sirve para poder soldar componentes y borneras de conexión.

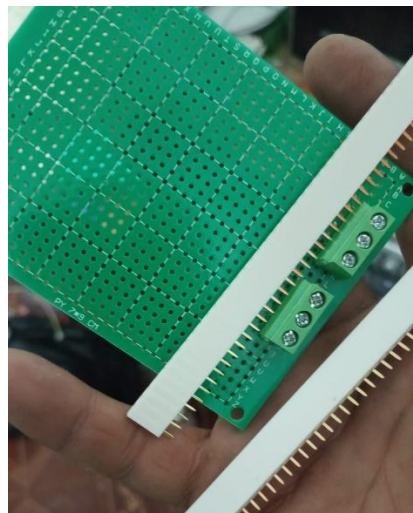


Figura 10. Placa universal para soldadura de componentes eléctricos
Fuente: elaboración propia

Dispensador de comida para peces: el dispensador automático de alimentos para peces es un elemento crucial en los sistemas automatizados de acuicultura, pues facilita la programación y supervisión exacta de las raciones y periodos de ingesta sin necesidad de intervención humana. En este proyecto, se ha diseñado e impreso el dispensador en 3D, lo que brinda múltiples beneficios: menor costo, facilidad para personalizar y la capacidad de producir piezas de reemplazo de manera rápida.

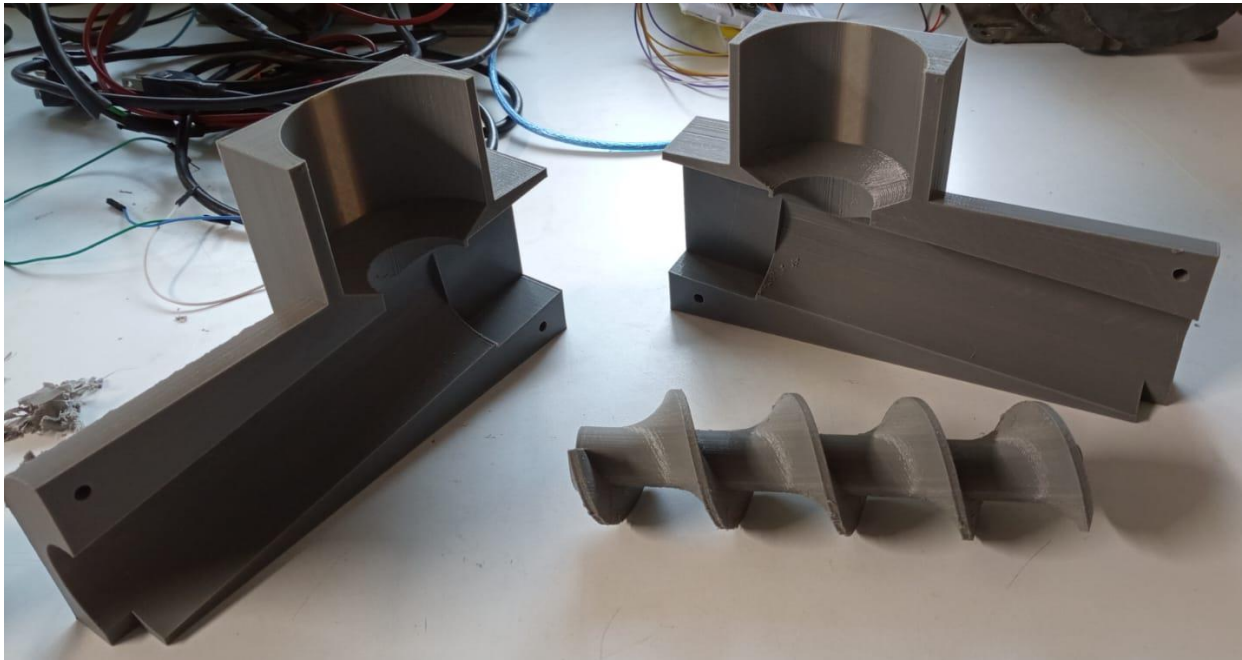


Figura 11. Dispensador de alimento para peces con tornillo sin fin
Fuente: elaboración propia

Otros equipos necesarios: si bien los elementos de automatización son necesarios para la granja automatizada, también tenemos otros elementos necesarios como bombas de aire, bombas de agua, tanques de cultivo, tubos de agua, plásticos y lonas, para poder mantener un ambiente controlado en un espacio cerrado.

Bombas de aire: al tener los peces en un sistema cerrado de crianza es necesario estas suministrando aire en el espacio donde se esté realizando el cultivo debido a que no cuenta con una fuente natural de oxigenación y se pueden ver afectados tanto los peces como las plantas.



Figura 12. Bomba de aire para peces

Fuente: elaboración propia

Bombas de agua: dentro de los cultivos en sistemas cerrados es muy necesario estar haciendo recambios de agua para evitar la contaminación del ambiente de los peces y así esto no mueran por lo tanto es necesario contar con una bomba de agua que nos ayude en este proceso del recambio.



Figura 13. Bomba para la recirculación del agua

Fuente: elaboración propia

Tubos de agua: estos tubos cumplen con la función de transportar y mantener el agua dentro del sistema y no se derrame facilitando todo el proceso de los recambios de agua y riego de las plantas.

Tanques de cultivos: en estos tanques podemos realizar los cultivos tanto de las plantas como

de los peces ya que estos últimos su ecosistema natural es el agua.

Plástico: este nos sirve para mantener cubierto los cultivos evitando cambios bruscos de temperatura o del pH en el agua por las lluvias

4.2.8 Programas utilizados en el proyecto. Si bien los sensores y dispositivos electrónicos son elementos físicos que necesitan dentro del sistema de automatización de la granja, también existe una parte importante de del proyecto como son los softwares que se utilizaron, a continuación, mencionaré los softwares utilizados.

Arduino IDE: gracias a esta interfaz podemos realizar el código de programación que permite realizar el proceso de automatización de la granja, por medio de esta interfaz se puede realizar cambios y ajustes al código de los sensores para que estos sean más precisos.

Fusión 360: con este programa el cual se puede obtener de manera paga o en este caso con licencia educativa, podemos realizar diseño en general de piezas que podemos utilizar después tanto en este proyecto como en nuestros próximos proyectos o en nuestras vidas cotidianas.

Proteus: si bien existen muchos programas en el diseño de circuitos y esquemáticos por decisión personal en este proyecto utilizamos proteus, el cual nos permite realizar esquemas de conexión para facilitar el ensamble del sistema.

Ultimaker Cura: este programa facilita la comunicación entre maquinas generando el archivo necesario para la impresora, también permite establecer las especificaciones en la que la impresora va a trabajar y como queremos que quede nuestras piezas.

Mantenimiento Preventivo Automatizado: el uso de sensores también permite la implementación de mantenimiento preventivo en sistemas acuapónicos. Si un sensor detecta una anomalía en los niveles de pH, nutrientes o flujo de agua, puede enviar una alerta para que el operador revise el sistema antes de que se produzca un fallo grave. Esto no solo ayuda a evitar problemas importantes, sino que también reduce la necesidad de intervenciones manuales

constantes, lo que es clave para la sostenibilidad a largo plazo de estos sistemas (FAO, 2022).

Escalabilidad y Reducción de la Mano de Obra: la automatización facilita la escalabilidad de los sistemas de acuaponía. A medida que aumentan las demandas de producción, los sistemas automatizados se encargan de la mayoría de las tareas diarias, lo que permite a los agricultores ampliar sus sistemas sin aumentar significativamente su fuerza laboral. Esto es especialmente útil en operaciones comerciales donde la reducción de los costos laborales es un factor clave para la rentabilidad.

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto

Este proyecto es de tipo experimental y aplicado. Se trata de un proyecto experimental porque se diseña y construye un prototipo de sistema acuapónico automatizado utilizando impresión 3D, lo cual permite evaluar y optimizar los procesos productivos en un entorno controlado. Es de tipo aplicado porque busca resolver un problema práctico de la industria agrícola, aportando una solución innovadora que puede mejorar la sostenibilidad y eficiencia en la producción de alimentos.

5.2 Método

El método adoptado es de investigación y desarrollo (I+D), dividido en varias fases de diseño, construcción, y pruebas. Se realiza un estudio de la literatura existente sobre acuaponía y tecnología de impresión 3D, seguido de la planificación y creación del sistema automatizado, que incluye sensores y controladores para la gestión de factores críticos como pH, temperatura, y nutrientes.

5.3 Fases del Método

Investigación documental: Estudio de las técnicas de acuaponía y tecnologías de automatización e impresión 3D aplicadas a la agricultura.

Diseño del sistema: Selección y modelado de los componentes necesarios, como tanques, camas de cultivo, sensores y partes impresas en 3D para la automatización.

Construcción del prototipo: Ensamblaje del sistema acuapónico, instalación de sensores y configuración del sistema de monitoreo y control automatizado.

Pruebas y optimización: Evaluación del funcionamiento del sistema en cuanto a eficiencia en

el uso de recursos y producción de biomasa, realizando ajustes según los datos obtenidos.

5.4 Instrumentos de recolección de información

5.4.1 Fuentes primarias. Observación directa: Se lleva a cabo la observación del funcionamiento del sistema para documentar el comportamiento de los peces y plantas bajo el sistema automatizado. Mediciones directas: Uso de sensores para capturar datos de pH, temperatura, oxígeno disuelto y de consumo de nutrientes. Registro de datos automatizado: El sistema de monitoreo recopila y almacena datos automáticamente, facilitando el análisis continuo del rendimiento y la sostenibilidad del sistema.

5.4.2 Fuentes secundarias. Revisión bibliográfica: Investigación de literatura académica y técnica relacionada con acuaponía, sistemas de automatización en agricultura y la aplicación de impresión 3D en el diseño de componentes agrícolas. Estudios de caso: Análisis de granjas acuapónicas que han implementado soluciones similares para establecer parámetros de referencia y comparar eficiencias. Bases de datos y artículos científicos: Consultas en bases de datos académicas, como ScienceDirect, IEEE Xplore y Google Scholar, para obtener estudios previos sobre el impacto de la automatización en la acuaponía y el uso de impresión 3D.

6. Resultados

Desde sus comienzos, me enfrente a este proyecto con gran fervor y resolución. Se organizaron sesiones de aprendizaje acerca de acuaponía, automatización y modelado 3D, y se pidieron consultorías expertas en electrónica y programación. Se obtuvieron todos los dispositivos requeridos: una placa ESP32, termistores NTC 10 k Ω , un sensor de pH (adquirido en China), un sensor DHT11 para la medición de temperatura y humedad ambiental, un motor NEMA 17 de paso a paso con su controlador A4988, y filamento PLA para la impresión en 3D. Además, se creó una caja de protección para los componentes electrónicos, inspirada en Fusion 360; sin embargo, debido a la escasez de tiempo y la elección personal, se hizo en madera para proteger la ESP32.

6.1 Diseño de la estructura y modelado 3D

El bosquejo inicial de la granja se llevó a cabo en Fusion 360; en este programa se proyectaron un tanque para tilapias, una cama hidropónica para la producción de chile picante y dos camas de cultivo para las bacterias nitrificantes. Igualmente, en esa misma plataforma digital se diseñó el dosificador de alimento automático a medida, y la caja protectora para la esp32. Estos dos últimos STL obtenidos se procesaron en Ultimaker Cura con un relleno del 10%, una capa de 0.2 mm y una temperatura de extrusión de 205 °C, asegurando así piezas robustas y ligeras.

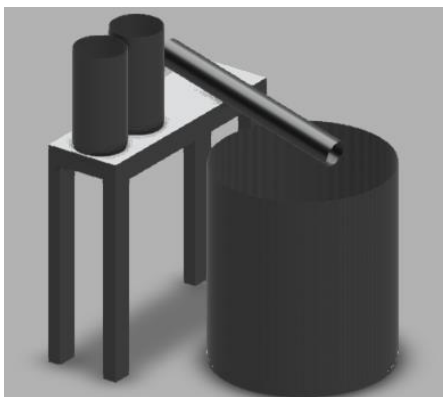


Figura 14. Diseño 3D del montaje de la granja hecho con Fusión 360
Fuente: elaboración propia

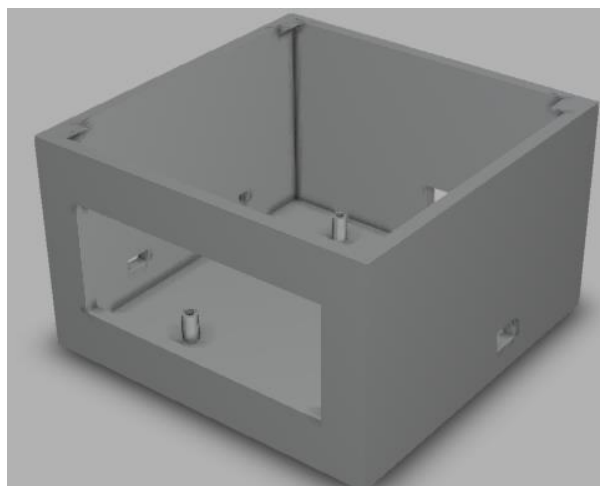


Figura 15. Diseño caja protectora hecho con fusión 360
Fuente: elaboración propia

6.2 Diseño del sistema de monitoreo y control de variables

Se creó un sistema automatizado de vigilancia ambiental que incorporaba sensores para registrar el pH, la temperatura del agua y las condiciones del entorno (temperatura y humedad del aire). Se elaboraron esquemas de vinculación electrónica entre los sensores y la tarjeta ESP32, escogida por su conexión Wi-Fi y capacidad para procesar información. El sistema estaba configurado para recolectar información en tiempo real.

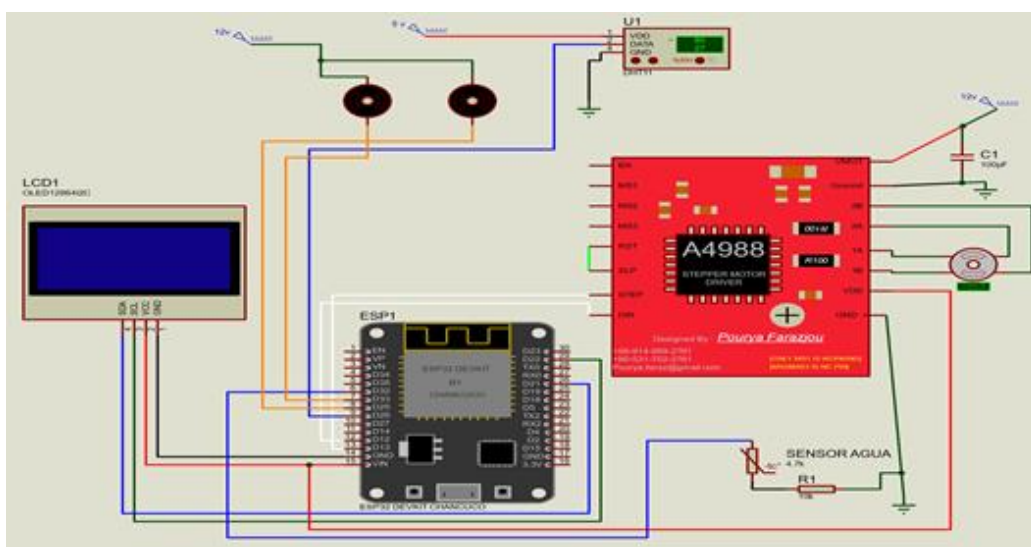


Figura 16. Diseño esquemático de conexión
Fuente: elaboración propia

6.3 desarrollo del sistema de estructural usando técnica de prototipado rápido

Como un componente del sistema automatizado de la granja de acuaponía, se desarrolló un dosificador automático para peces, este dosificador de alimento fue diseñado en Fusión 360 y fabricado en PLA, diseñado específicamente a través de métodos de producción aditiva es accionado por un motor Nema 17 y controlado por un Driver A4988. Fue diseñado con un ángulo de 15 grados de inclinación para evitar que el alimento se desplace hacia el motor, posee una tolva capaz de albergar hasta 100 gramos de alimento para peces. Este elemento desempeña un papel crucial en el sistema, pues facilita la programación de la distribución de alimentos de manera regular, previniendo la sobrealimentación, el derroche y la exigencia de una intervención humana continua, todo ello en consonancia con los principios de eficiencia y sostenibilidad del proyecto.

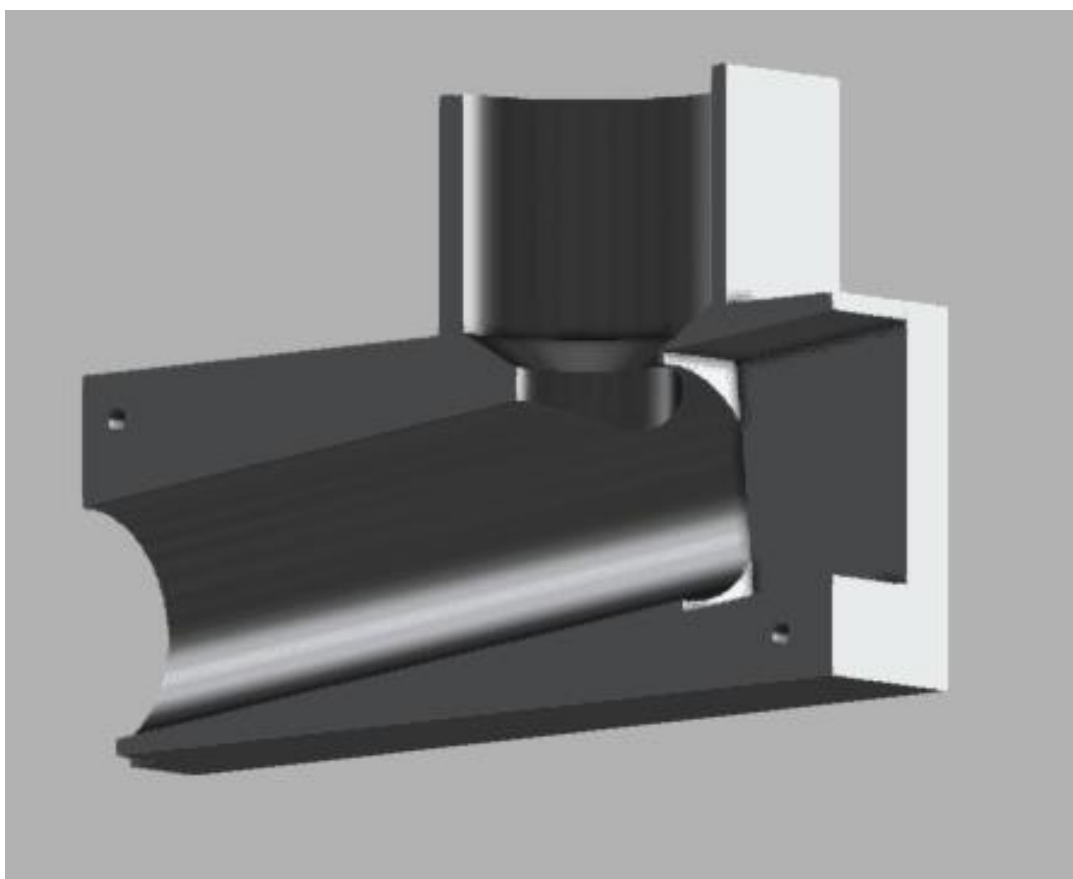


Figura 17. Parte lateral del dispensador de alimentos para peces
Fuente: elaboración propia

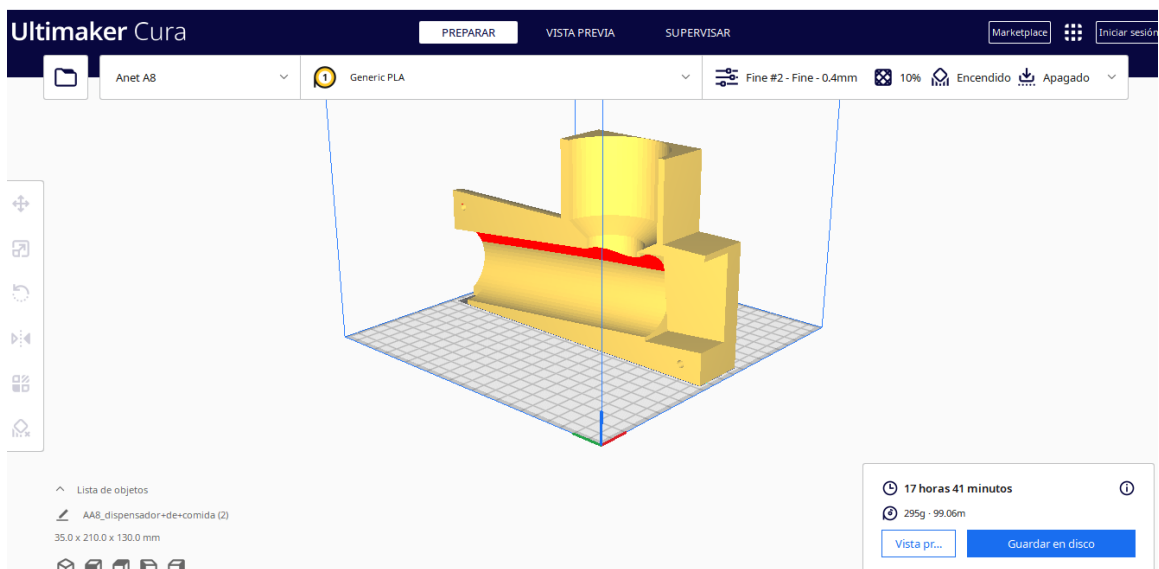


Figura 18. Parte lateral del dispensador parametrizado en UltiMaker cura
Fuente: elaboración propia

6.4 Desarrollo del sistema de monitoreo y control usando dispositivos de control

En condiciones controladas de laboratorio, los sensores de temperatura del agua y el DHT11 demostraron su fiabilidad, proporcionando las medidas anticipadas. La caja de madera protegía todos los elementos sin obstaculizar las mediciones. No obstante, al tratar de calibrar el sensor de pH, se halló que la sonda presentaba un fallo, no registrando datos, lo que obstaculizó la corrección automática del pH en tiempo real.



Figura 19. Sistema conectado y funcional
Fuente: elaboración propia

6.5 Pruebas de funcionamiento a la granja de acuaponía

Se llevaron a cabo evaluaciones personales de los elementos estructurales y electrónicos. Las conexiones eléctricas y la lectura de los sensores de temperatura (termistor) y ambiente (DHT11) se llevaron a cabo correctamente, evidenciando datos constantes en las circunstancias de laboratorio. Sin embargo, por la dificultad de conseguir medidas fiables del pH y un suceso desafortunado el cual fue la interrupción del servicio de energía durante un tiempo aproximado de 4 horas que provocó la muerte de los peces debido a un desbalance en los parámetros del agua, no se logró llevar a cabo una validación total del sistema en situaciones reales. En consecuencia, el proyecto no pudo ser exhibido de manera física, restringiéndose a una comprobación teórica y operativa a nivel de prototipo.

6.5.1. Fallo en el sistema de aireación: debido a la interrupción de energía el sistema de aireación se apagó, por lo tanto, no se le pudo suministrar la cantidad de oxígeno requerido para que los alevines sobrevivieran.



Figura 20. Montaje físico de la granja
Fuente: elaboración propia



Figura 21. Camas para el cultivo de bacterias nitrificantes
Fuente: elaboración propia



Figura 22. Camas de cultivo para bacterias y peces
Fuente: elaboración propia



Figura 23. Sistema de monitoreo conectado y funcionando
Fuente: elaboración propia



Figura 24. Vista lateral de la granja
Fuente: elaboración propia



Figura 25.. Sistema de monitoreo con la placa universal

Fuente: elaboración propia

6.6 Avances consolidados y lecciones aprendidas

A pesar de estas dificultades, el proyecto tuvo avances significativos:

6.6.1. Diseño 3D y prototipado rápido. se demostró que Fusion 360 y Ultimaker Cura permiten fabricar piezas personalizadas de forma eficiente y económica.

6.6.2. Integración de hardware y software. el uso de Proteus para esquemáticos, Arduino IDE para programación y la ESP32 como controlador central generaron un prototipo funcional en laboratorio.

6.6.3. Comedero automatizado propio. El mecanismo impreso y controlado por motor paso a paso validó el concepto de dispensado preciso sin intervención manual.

6.6.4. Diseño de la caja electrónica. Aunque se fabricó en madera, cumplió su función de proteger componentes y facilitar el acceso para mantenimientos.

6.6.5. Identificación de riesgos. La falla en el sensor de pH y la falta de respaldo energético evidenciaron la necesidad de utilizar componentes de mayor calidad y prever soluciones de emergencia eléctrica.

7. Conclusiones

La creación de una granja automatizada de acuaponía con componentes impresos en 3D posibilitó la exploración de tecnologías en auge como la producción aditiva, la automatización con microcontroladores y la supervisión de variables fisicoquímicas en un sistema agrícola autosustentable. Pese a las dificultades técnicas y logísticas, el proyecto consiguió establecer una arquitectura funcional durante su etapa de laboratorio, incorporando sensores, actuadores y modelos 3D a medida enfocados en el cultivo de chile picante y la crianza de peces.

Una de las mayores fortalezas del proyecto fue la independencia en el diseño del comedero automático, creado desde el inicio con herramientas como Fusion 360 y gestionado con ESP32 y motores paso a paso, lo que evidencia la capacidad de la impresión 3D para producir soluciones ajustadas a requerimientos particulares. Igualmente, la implementación de herramientas como Arduino IDE y Proteus facilitó la consolidación de un sistema de control integral, apto para administrar parámetros vitales como la temperatura, la humedad y la alimentación automatizada.

No obstante, el proyecto también se topó con restricciones considerables. La interrupción permanente del suministro eléctrico fue la más grave, ya que obstaculizó el funcionamiento constante del sistema, impactando directamente en la aireación del depósito y causando la muerte de los alevines. Además, el sensor de pH defectuoso comprado desde China obstaculizó una adecuada supervisión del agua, restringiendo la eficacia del sistema automatizado. A pesar de estos obstáculos, el trabajo facilitó la validación de varias fases de diseño, integración y prueba del sistema, estableciendo así cimientos firmes para iteraciones futuras.

8. Recomendaciones

Implementación de una fuente energética de respaldo: para asegurar el funcionamiento ininterrumpido del sistema en caso de interrupciones eléctricas, se aconseja incorporar una fuente de energía ininterrumpida (UPS) o un sistema de baterías solares que garantice la operación de la bomba, el aireador y el controlador ESP32.

Fases de pruebas más prolongadas: es crucial llevar a cabo ensayos más amplios del sistema de seguimiento en situaciones simuladas antes de introducir peces o plantas auténticas. Esto facilitaría la identificación de fallos y su corrección sin comprometer la vida de los organismos.

Adquirir sensores de mayor calidad: es fundamental seleccionar sensores de pH, temperatura y humedad de fabricantes confiables, idealmente con garantía y calibración certificada, evitando productos de baja calidad o sin soporte técnico.

Utilizar gabinetes resistentes al ambiente: pese a que la caja de madera cumplió su objetivo inicial, se aconseja producir en versiones futuras un gabinete impreso en 3D con filamento impermeable (como PETG o ABS) para resguardar los elementos electrónicos de la humedad y las condiciones meteorológicas.

Profundizar en el control de nutrientes: para un seguimiento más exhaustivo del sistema acuapónico, se recomienda incluir sensores de conductividad eléctrica (EC) y oxígeno disuelto. Esto facilitaría el ajuste preciso de la recirculación y aireación, evitando así posibles problemas futuros.

Incluir control remoto o interfaz gráfica: la integración de una aplicación móvil o panel web facilitaría el monitoreo en tiempo real, el ajuste de variables y el registro de históricos, lo cual fortalecería la toma de decisiones.

Capacitar al usuario final: en proyectos reales o institucionales, es clave capacitar a los operadores del sistema en el manejo básico del software, el mantenimiento de componentes y la

interpretación de datos.

9. Referentes bibliográficos

- Campaña, O. G. (s.f.). *scielo*. Recuperado el 15 de octubre de 2024, de <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rpolit/v42n1/2477-8990-rpolit-42-01-00017.pdf>
- Cuéllar-Anjel, J. (s.f.). *Academia*. Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de https://www.academia.edu/38201870/Manual_de_buenas_pr%C3%A1cticas_pisc%C3%ADcolas
- FAO. (2022). Recuperado el 25 de Septiembre de 2024, de <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i4021es>
- FAO. (2022). Recuperado el 25 de Septiembre de 2024, de <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i4021es>
- Goddek, 2. (2019). *researchgate*. Recuperado el 6 de Agosto de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/333935097_Aquaponics_The_Basics
- Grozea. (2011). *researchgate*. Recuperado el 15 de agosto de 2024, de www.researchgate.net/publication/228442364_Increasing_the_Economical_Efficiency_and_Sustainability_of_Indoor_Fish_Farming_by_Means_of_Aquaponics-Review
- López, A., & Roldán Vélez. (s.f.). *UdeA*. Recuperado el 20 de abril de 2024, de https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/18469/10/RoldanDavid_ArbelaezDavid_2021_PrototipoDeSistemaAcuap%C3%B3nicoAutomatizado.pdf
- ONU. (s.f.). Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de <https://www.un.org/es/un75/shifting-demographics>
- ONU. (s.f.). Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>
- ONU. (2020). Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de <https://www.un.org/es/un75/shifting-demographics>
- ONU. (2023). Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>
- talavera. (s.f.). *Sciencedirect*. Recuperado el 15 de noviembre de 2024, de <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.015>
- Vichique, & Guevara, H. B. (s.f.). *Researchgate*. Recuperado el 20 de Abril de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/375787530_Sistemas_Hidroponicos_Sustentabl

es_Basados_en_el_Reciclaje_de_Botellas_de_PET_e_Impresion_3D

10. Bibliografía

- Campaña, O. G. (s.f.). *scielo*. Recuperado el 15 de octubre de 2024, de <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rpolit/v42n1/2477-8990-rpolit-42-01-00017.pdf>
- Cuéllar-Anjel, J. (s.f.). *Academia*. Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de https://www.academia.edu/38201870/Manual_de_buenas_pr%C3%A1cticas_pisc%C3%ADcolas
- FAO. (2022). Recuperado el 25 de Septiembre de 2024, de <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i4021es>
- FAO. (2022). Recuperado el 25 de Septiembre de 2024, de <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i4021es>
- Goddek, 2. (2019). *researchgate*. Recuperado el 6 de Agosto de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/333935097_Aquaponics_The_Basics
- Grozea. (2011). *researchgate*. Recuperado el 15 de agosto de 2024, de www.researchgate.net/publication/228442364_Increasing_the_Economical_Efficiency_and_Sustainability_of_Indoor_Fish_Farming_by_Means_of_Aquaponics-Review
- López, A., & Roldán Vélez. (s.f.). *UdeA*. Recuperado el 20 de abril de 2024, de https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/18469/10/RoldanDavid_ArbelaezDavid_2021_PrototipoDeSistemaAcuap%C3%B3nicoAutomatizado.pdf
- ONU. (s.f.). Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de <https://www.un.org/es/un75/shifting-demographics>
- ONU. (s.f.). Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>
- ONU. (2020). Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de <https://www.un.org/es/un75/shifting-demographics>
- ONU. (2023). Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>
- talavera. (s.f.). *Sciencedirect*. Recuperado el 15 de noviembre de 2024, de <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.015>
- Vichique, & Guevara, H. B. (s.f.). *Researchgate*. Recuperado el 20 de Abril de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/375787530_Sistemas_Hidroponicos_Sustentabl

es_Basados_en_el_Reciclaje_de_Botellas_de_PET_e_Impresion_3D

10. Anexos

Anexo A. Código fuente del sistema automatizado de monitoreo y alimentación en granja acuapónica

A continuación, se presenta el código fuente implementado en la placa ESP32, encargado de automatizar funciones esenciales dentro de una granja acuapónica, como la alimentación periódica de peces mediante un motor paso a paso, y la lectura en tiempo real de parámetros ambientales como temperatura del aire, humedad relativa y temperatura del agua.

El sistema incluye una pantalla LCD 20x4 con interfaz I2C, donde se visualizan los datos en todo momento, brindando al usuario información precisa sin necesidad de un dispositivo externo. Se omite el uso del módulo de tarjeta microSD para simplificar el diseño del circuito, reduciendo costos, espacio y posibles fallas asociadas a la escritura de archivos. Este enfoque está orientado a proyectos educativos o prototipos funcionales en donde no es necesario almacenar datos históricos.

Este código fue cargado en una ESP32 y validado con sensores reales, mostrando resultados confiables y repetibles.

```
#include <WiFi.h>
#include <Stepper.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <math.h>

// Pines motor paso a paso
#define STEPS_PER_REV 200
#define STEP_PIN 13
#define DIR_PIN 12
```

```
// Intervalo de alimentación
const unsigned long INTERVALO_ALIMENTACION = 6UL * 60 * 60 * 1000; // 6 horas
unsigned long tiempoAnterior = 0;

// Sensor DHT11
#define DHTPIN 26
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

// Termistor NTC 3950
#define TERMISTOR_PIN 34
#define SERIES_RESISTOR 10000
#define NOMINAL_RESISTANCE 10000
#define NOMINAL_TEMPERATURE 25.0
#define BETA_COEFFICIENT 3950

// Pantalla LCD I2C
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

// Sensor de pH
#define PH_PIN 35
float calibration_value = 21.34; // Ajustar según calibración
int buffer_arr[10], temp;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  analogReadResolution(12);

  pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
}
```

```
lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.setCursor(1, 0);
lcd.print("Sistema activo");

dht.begin();
}

void loop() {
  unsigned long tiempoActual = millis();
  if (tiempoActual - tiempoAnterior >= INTERVALO_ALIMENTACION) {
    tiempoAnterior = tiempoActual;
    alimentarPeces();
  }

  monitorearSensores();
  delay(5000);
}

void alimentarPeces() {
  Serial.println("Dispensando alimento...");
  digitalWrite(DIR_PIN, HIGH);
  for (int i = 0; i < STEPS_PER_REV / 2; i++) {
    digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(500);
    digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(500);
  }
  delay(1000);
  digitalWrite(DIR_PIN, LOW);
}
```

```
for (int i = 0; i < STEPS_PER_REV / 2; i++) {  
    digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);  
    delayMicroseconds(500);  
    digitalWrite(STEP_PIN, LOW);  
    delayMicroseconds(500);  
}  
Serial.println("Alimentación completada.");  
}
```

```
void monitorearSensores() {  
    float temperatura = dht.readTemperature();  
    float humedad = dht.readHumidity();  
    float tempAgua = leerTemperaturaNTC();  
    float ph = leerPH();
```

```
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.print("Temp: ");  
    lcd.print(temperatura, 1);  
    lcd.print((char)223);  
    lcd.print("C  ");
```

```
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print("Humedad: ");  
    lcd.print(humedad, 1);  
    lcd.print("%  ");
```

```
    lcd.setCursor(0, 2);  
    lcd.print("Agua: ");  
    lcd.print(tempAgua, 1);  
    lcd.print((char)223);  
    lcd.print("C  ");
```

```

lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("pH: ");
lcd.print(ph, 2);
lcd.print("    ");

```

```

Serial.print("Temp: "); Serial.print(temperatura);
Serial.print(" C, Humedad: "); Serial.print(humedad);
Serial.print(" %, Temp Agua: "); Serial.print(tempAgua);
Serial.print(" C, pH: "); Serial.println(ph);
}

```

```

float leerTemperaturaNTC() {
  int adcValue = analogRead(TERMISTOR_PIN);
  if (adcValue <= 0 || adcValue >= 4095) {
    return -1000.0;
  }

  float voltage = adcValue * 3.3 / 4095.0;
  float resistance = SERIES_RESISTOR * ((3.3 / voltage) - 1.0);

  float steinhart;
  steinhart = resistance / NOMINAL_RESISTANCE;
  steinhart = log(steinhart);
  steinhart /= BETA_COEFFICIENT;
  steinhart += 1.0 / (NOMINAL_TEMPERATURE + 273.15);
  steinhart = 1.0 / steinhart;
  steinhart -= 273.15;

  return steinhart;
}

```

```
float leerPH() {
  unsigned long int avgval = 0;

  for (int i = 0; i < 10; i++) {
    buffer_arr[i] = analogRead(PH_PIN);
    delay(30);
  }

  // Ordenamiento burbuja
  for (int i = 0; i < 9; i++) {
    for (int j = i + 1; j < 10; j++) {
      if (buffer_arr[i] > buffer_arr[j]) {
        temp = buffer_arr[i];
        buffer_arr[i] = buffer_arr[j];
        buffer_arr[j] = temp;
      }
    }
  }

  for (int i = 2; i < 8; i++) {
    avgval += buffer_arr[i];
  }

  float volt = (float)avgval * 3.3 / 4095.0 / 6.0;
  float ph_act = -5.70 * volt + calibration_value;
  return ph_act;
}
```

Anexo B. Código fuente del sistema automatizado acuapónico (con explicación por partes)

Este anexo presenta el código fuente completo utilizado en el sistema automatizado acuapónico, desarrollado con una ESP32. El programa permite monitorear la temperatura ambiente, la humedad, la temperatura del agua y el nivel de pH. Además, activa automáticamente un motor paso a paso para alimentar peces cada seis horas. Todos los datos se muestran en una pantalla LCD I2C 20x4.

A continuación, se describe el código por secciones:

1. Inclusión de librerías

```
#include <WiFi.h>
#include <Stepper.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <math.h>
```

Estas bibliotecas permiten controlar los diversos dispositivos del sistema:

WiFi.h: se incluye por defecto en la ESP32, aunque en este proyecto no se usa activamente.

Stepper.h: controla el motor paso a paso.

DHT.h: permite comunicarse con el sensor DHT11.

Wire.h: necesaria para la comunicación I2C con la pantalla.

LiquidCrystal_I2C.h: controla la pantalla LCD 20x4 mediante I2C.

math.h: se utiliza para funciones matemáticas como el logaritmo natural (para el cálculo

de temperatura del termistor).

2. Definiciones y constantes

```
#define STEPS_PER_REV 200
#define STEP_PIN 13
#define DIR_PIN 12
#define INTERVALO_ALIMENTACION 6UL * 60 * 60 * 1000
unsigned long tiempoAnterior = 0;
```

Se definen los parámetros del motor y el intervalo de alimentación automática (6 horas). También se asignan los pines para controlar el motor paso a paso.

3. Sensores DHT11 y termistor NTC

```
#define DHTPIN 26
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```

```
#define TERMISTOR_PIN 34
#define SERIES_RESISTOR 10000
#define NOMINAL_RESISTANCE 10000
#define NOMINAL_TEMPERATURE 25.0
#define BETA_COEFFICIENT 3950
```

Configuración para el sensor DHT11 (que mide temperatura y humedad ambiente) y para el sensor de temperatura del agua basado en un termistor NTC 3950.

4. Sensor de pH

```
#define PH_PIN 35
float calibration_value = 21.34;
int buffer_arr[10], temp;
```

Configuración para el sensor de pH conectado al pin analógico 35. Se usa una variable de calibración empírica y un arreglo para almacenar múltiples lecturas que luego se promedian para mejorar la precisión.

5. Pantalla LCD I2C

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
```

Se configura la pantalla LCD 20x4 usando la dirección I2C típica 0x27.

6. Función setup()

```
void setup() {  
  Serial.begin(115200);  
  analogReadResolution(12);  
  
  pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);  
  pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);  
  
  lcd.init();  
  lcd.backlight();  
  lcd.setCursor(1, 0);  
  lcd.print("Sistema activo");  
  
  dht.begin();  
}
```

Inicializa la comunicación serial, la resolución del ADC, los pines del motor, la pantalla LCD, y el sensor DHT11. Muestra un mensaje inicial en la pantalla indicando que el sistema está activo.

7. Función loop()

```
void loop() {
```

```

unsigned long tiempoActual = millis();
if (tiempoActual - tiempoAnterior >= INTERVALO_ALIMENTACION) {
    tiempoAnterior = tiempoActual;
    alimentarPeces();
}

monitorearSensores();
delay(5000);
}

```

Es el ciclo principal del programa. Cada 6 horas se activa la función para alimentar peces. Luego, cada 5 segundos, se actualizan las lecturas de sensores en pantalla.

8. Función alimentarPeces()

```

void alimentarPeces() {
    Serial.println("Dispensando alimento...");
    digitalWrite(DIR_PIN, HIGH);
    for (int i = 0; i < STEPS_PER_REV / 2; i++) {
        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
        delayMicroseconds(500);
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
        delayMicroseconds(500);
    }

    delay(1000);

    digitalWrite(DIR_PIN, LOW);
    for (int i = 0; i < STEPS_PER_REV / 2; i++) {
        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
        delayMicroseconds(500);
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
    }
}

```

```

    delayMicroseconds(500);
  }
  Serial.println("Alimentación completada.");
}

```

Activa el motor paso a paso en un sentido para dispensar alimento, espera 1 segundo, y luego gira en sentido contrario para regresar el sistema a su posición inicial.

9. Función `monitorearSensores()`

```

void monitorearSensores() {
  float temperatura = dht.readTemperature();
  float humedad = dht.readHumidity();
  float tempAgua = leerTemperaturaNTC();
  float ph = leerPH();

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Temp: ");
  lcd.print(temperatura, 1);
  lcd.print((char)223);
  lcd.print("C  ");

  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Humedad: ");
  lcd.print(humedad, 1);
  lcd.print("%  ");

  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("Agua: ");
  lcd.print(tempAgua, 1);
  lcd.print((char)223);
  lcd.print("C  ");
}

```

```

lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("pH: ");
lcd.print(ph, 2);
lcd.print("    ");

```

```

Serial.print("Temp: "); Serial.print(temperatura);
Serial.print(" C, Humedad: "); Serial.print(humedad);
Serial.print(" %, Temp Agua: "); Serial.print(tempAgua);
Serial.print(" C, pH: "); Serial.println(ph);
}

```

Lee los sensores de ambiente, agua y pH. Muestra los resultados en la pantalla LCD y también los imprime por el puerto serial para fines de monitoreo o depuración.

10. Función leerTemperaturaNTC()

```

float leerTemperaturaNTC() {
  int adcValue = analogRead(TERMISTOR_PIN);
  if (adcValue <= 0 || adcValue >= 4095) {
    return -1000.0;
  }

  float voltage = adcValue * 3.3 / 4095.0;
  float resistance = SERIES_RESISTOR * ((3.3 / voltage) - 1.0);

  float steinhart;
  steinhart = resistance / NOMINAL_RESISTANCE;
  steinhart = log(steinhart);
  steinhart /= BETA_COEFFICIENT;
  steinhart += 1.0 / (NOMINAL_TEMPERATURE + 273.15);
  steinhart = 1.0 / steinhart;

```

```
steinhart -= 273.15;
```

```
return steinhart;
```

```
}
```

Convierte la lectura analógica del termistor a una temperatura en grados Celsius usando la fórmula de Steinhart-Hart.

11. Función leerPH()

```
float leerPH() {
```

```
    unsigned long int avgval = 0;
```

```
    for (int i = 0; i < 10; i++) {
```

```
        buffer_arr[i] = analogRead(PH_PIN);
```

```
        delay(30);
```

```
    }
```

```
    for (int i = 0; i < 9; i++) {
```

```
        for (int j = i + 1; j < 10; j++) {
```

```
            if (buffer_arr[i] > buffer_arr[j]) {
```

```
                temp = buffer_arr[i];
```

```
                buffer_arr[i] = buffer_arr[j];
```

```
                buffer_arr[j] = temp;
```

```
            }
```

```
        }
```

```
    }
```

```
    for (int i = 2; i < 8; i++) {
```

```
        avgval += buffer_arr[i];
```

```
    }
```

```
float volt = (float)avgval * 3.3 / 4095.0 / 6.0;  
float ph_act = -5.70 * volt + calibration_value;  
return ph_act;  
}
```

Promedia 10 lecturas del sensor de pH para obtener un valor más estable. Luego calcula el voltaje correspondiente y aplica una fórmula de calibración lineal para obtener el valor final de pH.