



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**PROTOTIPO DE SISTEMA ACUAPÓNICO
AUTOMATIZADO CON UN FUNCIONAMIENTO
MÍNIMO VIABLE**

David Arbeláez López

Carlos David Roldán Vélez

Universidad de Antioquia

Ingeniería, Bioingeniería

Medellín, Colombia

2021



PROTOTIPO DE SISTEMA ACUAPÓNICO AUTOMATIZADO CON UN
FUNCIONAMIENTO MÍNIMO VIABLE

David Arbeláez López
Carlos David Roldán Vélez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Bioingeniero

Asesores (a):

Jonathan Gallego Londoño, M. Sc Bioingeniería (Trinity College Dublin) y M.Sc
Ingeniería Biomédica (RWTH Aachen University)

Línea de Investigación:
Electrónica Digital, Sensores y Agroecología

Universidad de Antioquia
Ingeniería, Bioingeniería.
Medellín, Colombia

2021

AGRADECIMIENTOS

En primer, lugar queremos agradecer a nuestros familiares y amigos por su incondicional apoyo tanto anímico como afectivo no solo durante este proyecto final de la carrera sino durante todos estos años que conllevaron el camino para llegar a esta instancia.

Agradecemos también a nuestros asesores Jonathan Gallego y Felipe Restrepo por todos los conocimientos que nos brindaron en este tiempo, por la disposición, interés por lograr que el proyecto logre sus objetivos y por habernos hecho las recomendaciones justas cuando lo necesitamos.

¡A todos, gracias!

David Arbeláez y David Roldán

CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
MARCO TEÓRICO.....	5
Hidroponía.....	5
Medios de cultivo	5
Solución nutritiva	5
Acuicultura	6
Calidad del agua	6
Diseño y construcción	6
Alimentación	7
Acuaponía.....	7
Variables de interés en sistemas acuapónicos.....	8
Elementos y requerimientos de funcionamiento necesarios en un sistema acuapónico a pequeña escala.....	16
Elementos.....	27
Sumidero (Tanque de Reserva)	36
Componentes principales en la automatización	39
METODOLOGÍA.....	41
Documentación de los requerimientos.....	41
Selección de los elementos	42
Diseño.....	43
Construcción.....	43
Evaluación y Seguimiento	46
RESULTADOS Y ANALISIS	47
Selección de elementos necesarios para la construcción y automatización	47
Diseño de prototipo mínimo viable con automatización, en pequeña escala.....	50
Evaluación del prototipo en funcionamiento	55

Mediciones de compuestos nitrogenados y pH, por colorimetría.....	56
Corrección sustrato del biofiltro	57
Evaluación del desarrollo de plantas	59
Evaluación de la automatización.....	64
Sistema de control	64
Sensores	64
Sensor de humedad	64
Sensor de pH	65
Sensor de nivel	68
Sensor de temperatura	69
Sensor de TSD.....	70
Sensor de luminosidad (fotorresistencia)	70
Actuadores	70
Electroválvulas	70
Alimentador de peces	72
Bombas de aire y agua	73
Regleta de LEDs	73
CONCLUSIONES	75
REFERENCIAS.....	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Variables de más importancia a medir en sistemas intensivos acuícolas [14].	9
Tabla 2 Parámetros ideales en acuaponía	17
Tabla 3 Diferentes especies de pez cultivadas en sistemas acuapónicos y sus condiciones óptimas de producción.	20
Tabla 4 . Métodos y frecuencia recomendados para medición de variables de interés [15].	24
Tabla 5 Rangos óptimos de variables de interés en sistemas acuapónicos [15].	25
Tabla 6 Rutina de alimentación para tilapia a 28°C [18].	25
Tabla 7 Comparación entre las diferentes unidades de cultivo, con sus fortalezas y debilidades [15].	29
Tabla 8 Características importantes de los sustratos de siembra para cultivo en camas [15].	32
Tabla 9 Casa de la calidad	47
Tabla 10 Alternativas seleccionadas para la construcción del sistema.	49
Tabla 11 Elementos seleccionados para el control y automatización del sistema.	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Circuito básico sistema de acuaponía	8
Figura 2 Caudales requeridos por kg de pez, según su tasa de alimentación y el delta de oxígeno entre la entrada y la salida del sistema [14]......	23
Figura 3 Algunos tipos de filtros mecánicos implementados en sistemas acuapónicos a pequeña y mediana escala [14, 15]......	34
Figura 4 Diseño de biofiltro para sistemas acuapónicos [15]......	35
Figura 5 Piedra de aire para sistemas de aireación.....	37
Figura 6 Diagrama de flujo actividades	41
Figura 7 Sistema de automatización.....	44
Figura 8 Primer diseño del sistema acuapónico y su construcción	51
Figura 9 Módulos principales del sistema (superior) y componentes automatización (inferior).....	52
Figura 10 Diseño final del sistema acuapónico.....	53
Figura 11 Construcción total del sistema acuapónico	54
Figura 12 Módulos del sistema. Cifón cama de siembra (A), mineralizador aeróbico (B), tanque peces (C), biofiltro (D), mineralizador anaeróbico (E), sedimentador (F), tanque reserva (G) y cama de siembra (H).....	55
Figura 13 Mediciones de compuestos nitrogenados primera etapa.....	57
Figura 14 Mediciones de pH primera etapa.	57
Figura 15 Mediciones de compuestos nitrogenados, segunda etapa.	58
Figura 16 Mediciones de pH, segunda etapa.....	59
Figura 17 Siembra de plantas primera etapa.	60
Figura 18 Desarrollo de plantas 4 meses posteriores a la siembra, primera etapa.	60
Figura 19 Frutos del sistema acuapónico primera etapa, tomate perla (A, B y E), cebollín (C), ají (D), albahaca (F).	61
Figura 20 Siembra de plantas, segunda etapa.....	62
Figura 21 Plantas sembradas segunda etapa, 20 días después (superior): pepino (A), fresa (B), cebollín (C), fruta del dragón (D), tomate perla (E), papayo (F) y maracuyá (G) y 2 meses después (inferior).	63
Figura 22 Sistema de control prototipo acuapónico y demás componentes de interconexión: Relés (A), Arduino UNO (B), circuito de interconexión(C), Omega Onion (D).....	66
Figura 23 Sensor de humedad implementado en el sistema acuapónico (SEN0193).	67
Figura 24 Sensor de pH implementado (SEN0169)......	67
Figura 25 Tabla de base de datos implementada en Omega Onion para la visualización de variables medidas.	68
Figura 26 Sensor de nivel óptico implementado (FS-IR02), en la imagen derecha se muestra el lugar en el cual los sensores de nivel fueron instalados (Tanque de reserva (1) y salida de cama de siembra (2)).	69
Figura 27 Sensor de temperatura implementado (DS18B20).....	69
Figura 28 Sensor de TSD implementado (SEN0244).	70
Figura 29 Electroválvulas instaladas en el sistema.	72
Figura 30 Alimentador de peces.....	73
Figura 31 Sistema iluminado por regleta de LEDs.	74

RESUMEN

Con el fin de contribuir, a dar solución a la problemática existente en torno al sector agropecuario del país, la alimentación sana, el medio ambiente y la seguridad alimentaria, se construyó un prototipo de sistema acuapónico automatizado en pequeña escala, el cual presenta un funcionamiento mínimo viable. Construido en Santa fe de Antioquia, su parte estructural y mecánica fabricada mediante el uso de materiales reciclables y una automatización que permite el control y monitoreo de sus principales procesos, este sistema acuapónico permite entender cómo la producción de alimentos sanos se puede realizar de manera sostenible. Se realizó, una documentación minuciosa sobre los principios y elementos que permiten llevar a cabo un sistema acuapónico en pequeña escala exitoso. Se implementó un proceso de diseño basado en los Métodos de Diseño de Nigel Cross, con el cual fue posible determinar los elementos esenciales para la construcción, automatización y evaluación de desempeño de un sistema acuapónico en pequeña escala. Se elaboraron diseños CAD en SketchUp para plasmar el diseño final del sistema. Se construyó el sistema y se implementó su automatización, haciendo uso del microcontrolador Arduino UNO, el microprocesador Omega Onion, actuadores como: bombas, electroválvulas y regletas LED y sensores de: pH, TDS, temperatura, nivel, luminosidad y humedad de suelo. Se puso el prototipo en funcionamiento constante, lo cual permitió evaluar su desempeño y hacer las mejores pertinentes. Por último, se realizó un minucioso análisis sobre los resultados obtenidos, los cuales llevaron a conclusiones que permitirán la implementación de mejoras a partir de los aprendizajes y a un posterior escalamiento del proyecto.

Palabras clave: Acuaponía, acuaponía automatizada, automatización, variables, medición de parámetros.

INTRODUCCIÓN

El sector agropecuario en Colombia representa alrededor del 6% del producto interno bruto (PIB) nacional [1]. Sin embargo, muchos de sus suelos están degradados, entre otros por el uso indiscriminado de productos químicos, la agricultura extensiva en monocultivo y el uso excesivo de suelos para ganadería [2]. Esto provoca que la fertilidad de estos suelos colombianos esté afectada y por ende su productividad; los suelos han disminuido su productividad en un 40% [3]. Suelos improductivos, impiden a su vez que los agricultores perciban buena rentabilidad por sus labores, lo cual afecta la economía del país [4].

Para mitigar estos efectos negativos en los suelos, se deben implementar métodos de cultivo como los que plantea la agricultura sostenible. Al referirse a esta agricultura, se habla de un nuevo modelo agrícola más complejo y exigente en conocimientos, que requiere una mayor cantidad de mano de obra, pero que a la vez es mucho más productiva en calidad. Con la agricultura sostenible el cultivo necesita menos cantidad de energía física y química debido a la implementación de procesos y productos biológicos, además de otras tecnologías sostenibles que reducen el gasto energético; garantizando con esto que los suelos, el aire, los bosques, los animales, el desarrollo y la salud del hombre se conserven. En la agricultura sostenible prima sobre la fuerza física la observación y el control de los procesos [5].

Dentro de los métodos de agricultura sostenible se encuentran los cultivos para producción sin suelo, dentro de los cuales se encuentra la acuaponía: un sistema de cultivo en el cual crecen tanto peces como plantas, mediante una relación simbiótica de la cual se ven beneficiados ambos organismos. Los peces son alimentados y excretan desechos, que las bacterias descomponen en nutrientes. Las plantas utilizan algunos de estos nutrientes y en el proceso filtran el agua en el sistema. La acuaponía además aporta a la preservación de los recursos hídricos, pues brinda ahorros de hasta 90% de consumo de agua en las fincas productoras. Al mismo tiempo, permite producciones de hasta 4 veces las alcanzadas en la agricultura tradicional y que la producción de alimentos no dependa de las condiciones de los suelos, además de poderse implementar dentro de las mismas ciudades, garantizando alimentos frescos y minimizando los costos de la cadena de distribución y las emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente [6].

Aunque trae muchos beneficios y tiene una alta capacidad productiva, la acuaponía desarrollada en Colombia aún tiene ciertas falencias que se deben corregir, como lo son: los recursos energéticos y recurso humano debido al constante mantenimiento, monitoreo y utilización de motores, los cuales se hacen indispensables en el proceso e impiden lograr altas rentabilidades [7].

Existen varios ejemplos que indican cómo la acuaponía bien manejada, puede generar un impacto importante en la calidad de vida de los individuos y las comunidades. Los conceptos de la acuaponía urbana, de la acuaponía del patio de atrás (pequeña escala) y de las aldeas acuapónicas son particularmente ilustrativos. En el caso de la acuaponía urbana, los estudios hechos en Canadá indican que el sistema de techos verdes podría tener impacto benéfico en las ciudades en términos de reducción de los costos de la energía, reducción de los niveles de dióxido de carbono y óxido nitroso [8].

Mediante este proyecto se pretende implementar un sistema de acuaponía que permita cultivar peces y plantas de manera exitosa, optimizando recursos hídricos, humanos y energéticos mediante un sistema de automatización embebido, con el cual se puedan medir y controlar las variables necesarias para garantizar un prototipo mínimo viable de sistema de acuaponía, sostenible tanto ambiental como económicamente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo de un sistema de acuaponía automatizado que permita optimizar sus principales recursos necesarios para un funcionamiento mínimo viable, usando elementos computacionales y electromecánicos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentar los requerimientos de sistemas acuapónicos e identificar las variables que se necesitan controlar para su correcto desempeño.
- Seleccionar los elementos necesarios que permitan una automatización mínima viable del sistema.
- Diseñar el prototipo mínimo de viable de un sistema acuapónico y su automatización en pequeña escala, para simular su funcionamiento.
- Construir un producto en pequeña escala para verificar su adecuada operación

MARCO TEÓRICO

El término acuaponía se refiere a un sistema sostenible de producción de alimentos el cual es la combinación de los sistemas productivos acuicultura e hidroponía.

Hidroponía

La hidroponía deriva de las palabras griegas Hydro=Agua y Ponos=Labor o trabajo y traducido literalmente significa “trabajo en agua”. Constituye una técnica de producción de cultivos en la cual no se requiere del uso del suelo, el cual es reemplazado por agua con los nutrientes minerales esenciales disueltos en ella, a la cual se le denomina solución nutritiva. La solución nutritiva es quizá la parte más importante de toda técnica hidropónica, la formulación y supervisión de la solución nutritiva, junto a una adecuada elección de las fuentes minerales solubles, constituyen una de las bases para el éxito del cultivo hidropónico [9].

Medios de cultivo

Se puede hacer una distinción entre los sistemas hidropónicos:

Cultivos en sustrato líquido: en el cual no se implementa ningún tipo de sustrato. En este la solución nutritiva es llevada directamente a las raíces de las plantas y debe permanecer oxigenada constantemente al igual que las raíces. Las plantas son ancladas en un sistema de soporte de tal manera que sus raíces queden sumergidas.

Cultivos en sustrato sólido: en el cual las plantas se cultivan sobre algún sustrato sólido, que permita que las raíces se adhieran a él. Este tipo de sustrato debe permitir retener suficiente humedad, así como ser capaz de drenar el exceso de ésta y permitir la aireación adecuada. Ejemplos de algunos medios sólidos utilizados son la perlita, vermiculita, arena, arcilla expandida, gravilla, musgo, cascarilla de arroz, turba, etc [9].

Solución nutritiva

Una solución nutritiva es un medio que le provee a la planta el agua y los nutrientes necesarios para su buen crecimiento y desarrollo. Una solución nutritiva completa debe tener

los siguientes nutrientes; Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Azufre (S). Los mismos son conocidos como macronutrientes (gr/L). Otros elementos como el Hierro (Fe), Molibdeno (Mo), Boro (B), Zinc (Zn), Nickel (Ni) y Cobre (Cu), son los micronutrientes (mg/L). La planta no puede absorber estos elementos en su forma simple por lo que se les deben proveer en forma de iones, para que los pueda asimilar [9].

Acuicultura

La acuicultura es el cultivo de organismos acuáticos que implica intervenciones en el proceso de cría para aumentar la producción. Esta se puede practicar tanto en zonas costeras como del interior. Actualmente es considerado como el sector de producción de alimentos que más rápido ha crecido en los últimos años y se estima que aporta al 50% de la producción pesquera destinada a alimentación a nivel mundial, según reporta la FAO [10]. Para llevar a cabo un cultivo acuícola se deben tener presentes ciertas consideraciones con respecto a las condiciones y metodologías que garantizan un mejor desempeño en estos cultivos.

Calidad del agua

El agua deberá tener ciertas características fisicoquímicas y biológicas acorde a la especie a cultivar, ya que va a influir sobre su crecimiento y supervivencia. Adicionalmente, se debe verificar la ausencia de contaminantes como plaguicidas, metales pesados y bacterias patógenas que pueden comprometer la producción o afectar la calidad del producto final. Además, se deben controlar variables como la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, transparencia, pH, alcalinidad y dureza totales para garantizar una mejor calidad del agua en el proceso de producción [11].

Diseño y construcción

Uno de los aspectos básicos en la acuicultura es el disponer de un buen diseño. A través de una adecuada planificación de las instalaciones y sus características, se pueden evitar o prevenir muchos de los problemas que surgirán posteriormente durante la etapa productiva. Dentro de los aspectos básicos para un buen diseño, se encuentra la elección del tipo de estanquera correcto. El tipo, tamaño, forma y material de los estanques dependerá de los objetivos productivos de la granja, la especie a cultivar y su estado de desarrollo, el nivel de intensidad de la operación, el tipo de suelo y su topografía, la disponibilidad y origen del agua, así como la disponibilidad de servicios y de recursos económicos, entre otros aspectos. Es así como se pueden encontrar estanques de tierra, en materiales poliméricos,

geomembranas, concreto y jaulas flotantes, todos estos con diferentes dimensiones y formas [11].

Alimentación

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 [11].

Acuaponía

Teniendo claros los conceptos y definiciones sobre acuicultura e hidroponía, es posible definir la acuaponía, la cual es un sistema de producción sostenible, que integra la producción de cultivos sin suelo para criar plantas (hidroponía) y crianza de organismos acuáticos (acuicultura), siendo los peces los más usados para este tipo de aplicaciones. Los peces son alimentados y excretan desechos, que las bacterias descomponen en nutrientes. Las plantas utilizan algunos de estos nutrientes y en el proceso filtran el agua en el sistema. La mayoría de los sistemas de acuaponía son sistemas de recirculación acuícola donde el agua se recicla continuamente a través de una serie interconectada de tanques de peces y sistemas de tratamiento de desechos [12]. Estos desechos, los cuales básicamente son compuestos de amonio y amoniaco, son convertidos en el filtro biológico a nitritos por medio de las bacterias Nitrosomonas y estos convertidos a nitratos por las bacterias Nitrobacter, y estos nitratos son el compuesto necesario para la nutrición de las plantas [13]. En la Figura 1 se ilustra el circuito básico que comprende un sistema de acuaponía.

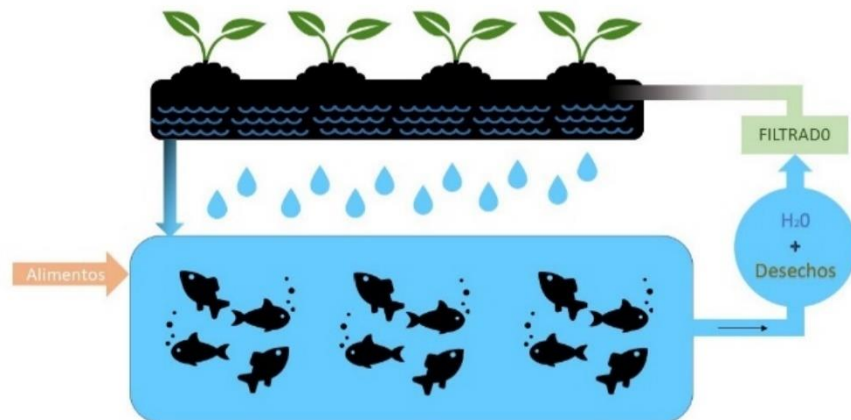


Figura 1 Circuito básico sistema de acuaponía

Variables de interés en sistemas acuapónicos

Las mediciones más importantes para realizar semanalmente en un sistema acuapónico, según mencionan varios autores, son: pH, oxígeno disuelto (OD), temperatura, alcalinidad (dureza carbonatada) y compuestos nitrogenados (Amonia, nitritos y nitratos) [14, 15, 16]. Sin embargo, medir únicamente pH, nitrato, alcalinidad y temperatura del agua, puede ser suficiente, debido a que estos resultados indicarán si el sistema está en equilibrio [15]. Cada parámetro tiene un impacto en los tres organismos en la unidad (plantas, peces y bacterias), y la correcta comprensión de los efectos de cada parámetro es crucial [20]. Parámetros como temperatura, salinidad, pH y OD deben medirse a diario y entre mayor sea la intensidad del cultivo, mayor será la necesidad de conocer y controlar estos mismos [18]. En adición, algunos estudios reportados mencionan que mediante una cuidadosa atención del manejo de los parámetros de calidad del agua como OD, nitrógeno amoniacal y nitrito, es posible cultivar ciertas especies de pez a altas densidades, sin olvidar la medición de otras variables de calidad del agua de importancia para el sistema como la temperatura, el pH y la alcalinidad [14].

Tabla 1 se presentan las variables de más importancia a medir en sistemas intensivos acuícolas y la prioridad de su medición en el tiempo para propiciar una oportuna respuesta [14].

Tabla 1 Variables de más importancia a medir en sistemas intensivos acuícolas [14].

Prioridad	Variable
Alta (Respuesta rápida – minutos)	Suministro eléctrico
	Nivel de agua en tanques
	Oxígeno disuelto – aireación/oxigenación
Media (Respuesta moderada – horas)	Temperatura
	Dióxido de carbono
	pH
Baja (Cambios lentos normalmente – días)	Alcalinidad
	Amonia
	Nitritos
	Nitratos

pH

El pH tiene un gran impacto en todos los aspectos de la acuaponía, especialmente en las plantas y las bacterias. Para las plantas el pH controla el acceso a micro y macronutrientes, en un pH entre 6.0 – 6.5, todos los nutrientes están disponibles, pero fuera de este rango los nutrientes se vuelven difíciles de acceder para las plantas, de hecho, un pH de 7.5 puede conducir a deficiencias nutricionales de hierro, fosforo y manganeso. Las bacterias nitrificantes experimentan problemas por debajo de un pH de 6, y la capacidad de las bacterias para convertir el amoniaco en nitrato se puede reducir en condiciones de pH ácido. Esto puede llevar a una reducción de la biofiltración [15].

La respiración de los peces aumenta el dióxido de carbono (CO₂) en el agua, este dióxido de carbono disminuye el pH, ya que se convierte naturalmente en ácido carbónico (H₂CO₃) en contacto con el agua. Entonces mientras mayor sea la densidad de población de peces, se liberará más dióxido de carbono, lo que implica que el pH global disminuya. Este efecto se incrementa cuando los peces están más activos, como cuando las temperaturas son más cálidas [15].

Contrario a lo que sucede con los peces, la fotosíntesis del plancton, algas y plantas acuáticas remueve el dióxido de carbono del agua y sube el pH. El efecto de las algas en el pH sigue un patrón diario, donde el pH aumenta durante el día a medida que las plantas acuáticas

realizan la fotosíntesis y eliminan el ácido carbónico, y luego cae durante la noche mientras las plantas respiran y liberan ácido carbónico, por lo tanto, el pH es mínimo al amanecer y máximo al atardecer [15].

Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno es esencial para los tres organismos que fundamentan la acuaponía. Plantas, peces y bacterias necesitan oxígeno para vivir. El nivel de oxígeno disuelto describe la cantidad de moléculas de oxígeno dentro del agua y este es medido en miligramos por litro. Este parámetro es el que muestra efectos más drásticos y rápidos en la acuaponía, pudiendo los peces morir en horas tras estar expuestos a una baja concentración del mismo. Es por esto, que la aireación y movimiento del agua son aspectos críticos en todos los sistemas de acuaponía. Los niveles óptimos de OD para que cada organismo prospere son 5–8mg/litro. Aunque especies como las carpa y la tilapia pueden tolerar concentraciones de OD de 2-3mg/litro, es más seguro tener niveles altos de este parámetro ya que los tres organismos exigen el uso de este. La mayoría de las plantas necesitan altos niveles de OD (> 3mg/litro) dentro del agua. Las plantas usan sus tallos y hojas para absorber oxígeno durante la respiración, pero las raíces también necesitan oxígeno. Sin oxígeno, las plantas pueden experimentar pudrición de la raíz, una situación en la que las raíces mueren y los hongos crecen [15].

La disponibilidad de oxígeno disuelto (OD) suele ser el primer factor que limita el aumento de la capacidad de carga y la producción en sistemas de recirculación intensiva. Utilizando solo la aireación como un medio para proporcionar oxígeno disuelto, un sistema puede soportar solo alrededor de 40kg por m³ (0.33lb de pescado por galón) de agua [14]. Por lo tanto, garantizar niveles adecuados de OD es crucial para la acuaponía. Aunque monitorear los niveles de OD es muy importante, puede ser un desafío, porque los dispositivos precisos para medición de este parámetro pueden ser muy costosos o difíciles de encontrar. A menudo es suficiente que las unidades de pequeña escala confíen en el monitoreo frecuente del comportamiento de los peces y el crecimiento de las plantas, y garanticen que las bombas de agua y aire circulen y aireen constantemente el agua [15].

El oxígeno disuelto (OD) es uno de los parámetros de mayor costo y difíciles de monitorear continuamente. Por lo tanto, la decisión de si el OD debe ser monitoreado continuamente o no, depende de los costos generales a aceptar. Normalmente, el valor real de OD (mg/L) no es necesario, solo si está por encima o por debajo de un punto de ajuste dado. Sin embargo, para proporcionar una señal digital simple, se requieren una sonda costosa y una interfaz de hardware sofisticada. La disponibilidad y los costos tanto de las sondas de oxígeno como del hardware han disminuido drásticamente en los últimos años, pero siguen siendo altos para

muchas operaciones de acuicultura. Sin embargo, si se usa oxígeno puro, se debe controlar el OD continuamente [14].

Temperatura

La temperatura influye de igual manera en todos los aspectos de los sistemas de acuaponía. En general se debe mantener en un rango de 18-30°C. Las variaciones altas condicionan a los peces, haciéndolos más susceptibles a las enfermedades [6], sin embargo, los controles de temperatura se deberán ajustar para no mantener este parámetro entre dos valores muy cercanos entre si [14]. Por otro lado, la temperatura tiene efectos en el OD y también en la toxicidad (ionización) de la amonía: con temperaturas elevadas se tiene menor cantidad de OD y más amonía desionizada (tóxica) [15]. Esta relación inversamente proporcional de la temperatura con la solubilidad del oxígeno en el agua juega un papel importante en los procesos biológicos del sistema y deberá tenerse en cuenta en todo momento, objetivando el manejo preventivo o correctivo; así como la directa relación de dicho factor con la toxicidad de los compuestos nitrogenados [16]. En adición, las altas temperaturas pueden restringir la absorción de calcio en las plantas.

La combinación de peces y plantas debe ser elegida de tal forma que ambos organismos se adecuen a la temperatura del ambiente donde el sistema este ubicado, ya que hacer cambios de temperatura en el agua es bastante difícil y costoso. Los sistemas también son más productivos si las fluctuaciones de temperatura en el día son mínimas [15]. Además, como este factor determinará la tasa metabólica de los peces, el productor deberá buscar mantenerlo en rangos óptimos para obtener un buen crecimiento de la especie seleccionada y no deberá sólo “ajustarse” a rangos de sobrevivencia. Dentro de los rangos de temperatura que toleran las especies de peces, las tasas de crecimiento aumentan a medida que la temperatura aumenta, hasta alcanzar el valor óptimo de cada una. Sobre esta temperatura, los procesos metabólicos y requerimientos energéticos se incrementan al igual que las conversiones de alimento en carne (Factor Relativo de Conversión Alimentaria-FCR), perjudicando la rentabilidad [16].

Alcalinidad (KH)

La dureza carbonatada (KH), también conocida como alcalinidad, es una medida de la capacidad de amortiguamiento o tampón (buffer) del agua. Esta tiene una relación estrecha con el pH, por lo cual es necesaria su medición [15]. La capacidad tampón tiene consecuencias tanto positivas como negativas. En el lado positivo, el ciclo de nitrógeno produce ácido nítrico (nitrato) y sin la capacidad tampón, el pH del estanque bajaría a lo largo del tiempo rápidamente, lo cual es una desventaja para los organismos de un sistema

acuapónico. Con suficiente capacidad tampón, el pH se mantiene estable, lo cual favorece al correcto funcionamiento del sistema. En el lado negativo, el agua de grifo que por lo general presenta alta dureza tiene una gran capacidad tampón. Si el pH del agua es demasiado alto para el pez, la capacidad tampón hace difícil bajar el pH a valores más adecuados. Intentos ingenuos de modificar el pH del agua normalmente fallan porque se ignoran los efectos tampón [21].

Dureza (GH)

La dureza general, expresa la medida de iones positivos (cationes) en el agua, compuestos principalmente por calcio (Ca^+) y magnesio (Mg^+), y en menor medida por hierro (Fe^+) [16] y no tiene un impacto importante en los procesos de la acuaponía a pequeña escala [15]. Tanto los iones de Ca^{2+} como los de Mg^{2+} son nutrientes esenciales para las plantas, y ellos son absorbidos por las plantas a medida que el agua fluye. El agua de lluvia tiene baja dureza dado que estos iones no se encuentran en la atmósfera. El agua dura puede ser una buena fuente de micronutrientes para la acuaponía y no tiene efectos sobre la salud de los organismos [15].

Nitrógeno amoniacal total (NAT) – Amonia

El nitrógeno es el cuarto parámetro crucial para la calidad del agua en sistemas de acuaponía. Es un requerimiento para toda la vida y hace parte de todas las proteínas. El nitrógeno entra a los sistemas de acuaponía en la comida de los peces, usualmente etiquetada como proteína pura y medida en porcentajes. Mucha de esta proteína es usada por el pez para su crecimiento y el resto es liberada por el mismo como desechos. Estos desechos se encuentran principalmente en forma de amoníaco (NH_3) y son liberados a través de las branquias, la orina y como desechos sólidos los cuales son convertidos en amoníaco debido a la actividad microbiana. Aunque tóxicos para los peces, los compuestos nitrogenados son nutritivos para las plantas y de hecho son los componentes básicos para los fertilizantes [15].

La exposición prolongada a niveles altos de amoníaco podrá causar daños en el sistema nervioso central y las agallas de los peces, lo que provocará una falta de equilibrio, con respiración y convulsiones descontroladas. El daño en las agallas a menudo se evidencia con una coloración rojiza e inflamación y posteriormente se restringirá el correcto funcionamiento de algunos procesos fisiológicos, conduciendo a una supresión del sistema inmunológico y llevando a la muerte. Otro síntoma incluye rayas rojas en el cuerpo, letargo y jadeos en la superficie del agua. Además, niveles más bajos durante tiempos prolongados puede provocar en los peces estrés, mayor incidencia de enfermedades y una mayor pérdida de peces. La toxicidad de la amonía va a depender tanto del pH, como de la temperatura del

agua. Químicamente la amonia puede existir en el agua de dos formas, ionizada (amonio – NH_4^+) o desionizada (amoníaco – NH_3). Juntas, estas dos formas son llamadas nitrógeno amoniacal total (NAT) [15].

La actividad de las bacterias nitrificantes disminuye drásticamente con altos niveles de amonia. Esta puede ser usada como un agente antibacterial y niveles superiores a 4mg/litro reducirá drásticamente el efecto de las bacterias nitrificantes. Esto puede provocar una situación de deterioro exponencial cuando un biofiltro de tamaño insuficiente se ve abrumado por el amoníaco, las bacterias mueren y el amoníaco aumenta aún más [15].

Las pruebas de amoniaco y nitrito también son extremadamente útiles para diagnosticar problemas en la unidad, especialmente en unidades nuevas o si un aumento en la mortalidad de los peces plantea problemas de toxicidad en el sistema. Aunque no son esenciales para el monitoreo semanal en unidades establecidas, pueden proporcionar indicadores muy sólidos de qué tan bien las bacterias están convirtiendo los desechos de los peces y la salud del biofiltro. Las pruebas de amoníaco y nitrato son la primera acción si se observa algún problema con los peces o las plantas [15].

Nitritos (NO_2^-)

Similar a como sucede con el amoniaco, se pueden generar problemas con la salud de los peces a concentraciones tan bajas como 0.25mg/litro. Altos niveles pueden llevar rápidamente a la muerte de los peces e incluso niveles bajos en largos periodos de tiempo, puede llevar a un incremento en el estrés de los peces, enfermedades o la muerte. Niveles tóxicos de nitritos evitan el transporte de oxígeno dentro del torrente sanguíneo de los peces, lo que hace que la sangre adopte un color marrón [15].

Nitratos (NO_3^-)

Los nitratos son mucho menos tóxicos que las otras formas de nitrógeno presentes en los sistemas acuapónicos y es la forma de nitrógeno más accesible para las plantas, siendo la producción de este compuesto la meta del biofiltro. Los peces pueden tolerar niveles por encima de los 300mg/litro. Los altos niveles ($>250\text{mg/litro}$) tienen un efecto negativo para las plantas, este genera un crecimiento vegetativo excesivo y una acumulación peligrosa de nitratos en las hojas, lo que es peligroso para la salud humana. Es recomendable mantener los niveles de nitratos entre 5-150mg/litro y cambiar el agua cuando los niveles sean altos [15].

Dióxido de Carbono (CO₂)

La respiración de los peces y bacterias aumenta el dióxido de carbono (CO₂) en el agua [14, 15], este compuesto disminuye el pH, ya que se convierte naturalmente en ácido carbónico (H₂CO₃) en contacto con el agua, por lo cual mientras mayor sea la densidad de población de peces, se liberará más dióxido de carbono, lo que implica que el pH global disminuya. Este efecto se incrementa cuando los peces están más activos, como cuando las temperaturas son más cálidas [15].

A medida que aumentan las densidades de almacenamiento y disminuyen las tasas de intercambio de agua, el dióxido de carbono disuelto se convertirá en un factor limitante para la producción. Cuando las densidades de almacenamiento son inferiores a 30 o 60 kg/m³, los sistemas de aireación convencionales generalmente proporcionarían una eliminación suficiente de CO₂ en el proceso de transferencia de oxígeno al agua con piedras de aire y agitación superficial o caídas de agua. Sin embargo, a medida que las capacidades de carga aumentan hasta 100kg/m³ para así ser económicamente competitivas, el control proactivo de la eliminación de CO₂ debe incluirse en cualquier sistema exitoso de producción de peces [14].

Total de Sólidos Disueltos (TSD)

Otro parámetro por considerar para la calidad del agua es la salinidad. Esta nos indica la concentración de sal en el agua, que incluyen la sal de mesa (cloruro de sodio - NaCl), así como los nutrientes de las plantas, que en realidad son sales. Los niveles de salinidad tendrán una gran influencia al decidir qué agua usar porque la alta salinidad puede afectar negativamente la producción de vegetales, especialmente si es de origen de cloruro de sodio, ya que el sodio es tóxico para las plantas [15].

Los nutrientes disueltos colectivamente se miden como sólidos disueltos totales (TSD), expresados como mg/L, o como la capacidad de la solución nutritiva para conducir una corriente eléctrica (CE), expresada como millimhos/cm (mMho/cm). En una solución hidropónica, el rango recomendado para TSD es de 1000 a 1500 (1.5 a 3.5 mMho/cm). En un sistema de acuaponía, niveles considerablemente más bajos de TSD (200 a 400 mg/L) o CE (0.3 a 0.6 mMho) producirán buenos resultados porque los nutrientes se generan continuamente. Una preocupación con los sistemas acuapónicos es la acumulación de nutrientes. Las altas tasas de alimentación, el bajo intercambio de agua y las áreas de cultivo de plantas insuficientes pueden conducir a la acumulación rápida de nutrientes disueltos a niveles potencialmente fitotóxicos. La fitotoxicidad se encuentra a concentraciones de TSD superiores a 2000mg/L o CE superiores a 3.5mMho [14]. Los principales iones que

contribuyen al aumento de la conductividad son nitrato (NO_3^-), fosfato (PO_4^{2-}), sulfato (SO_4^{2-}), K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} . Los niveles de NO_3^- , PO_4^{2-} y SO_4^{2-} son generalmente suficientes para un buen crecimiento de la planta, mientras que los niveles de K^+ y Ca^{+2} son generalmente insuficientes para el crecimiento máximo de la planta. El potasio se agrega al sistema en forma de hidróxido de potasio (KOH) mientras que el Ca se agrega como hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] [14].

Humedad relativa de sustrato

La humedad del suelo es realmente determinante en la producción de vegetales. Si se maneja de manera correcta se alcanzan mejores productividades y rentabilidades [23].

La programación del riego es simplemente la aplicación de agua a los cultivos en el momento “adecuado” y en la cantidad “adecuada,” y se considera una buena práctica de gestión. Por lo general, la programación del riego la establece la decisión del productor agrícola en la mayoría de los casos, o mediante el uso de un calendario predeterminado de programas de riego basado en las necesidades de agua de las campañas anteriores. Con el fin de establecer una adecuada programación del riego, varios factores son tomados en cuenta, tales como: la capacidad de evapotranspiración de la planta, las características del suelo y la distribución de las raíces [24].

Los sensores de humedad del suelo han sido exitosamente utilizados para controlar el contenido volumétrico de agua y orientar la programación del riego. Sin embargo, una correcta interpretación de las lecturas de humedad del suelo es muy importante para garantizar el manejo adecuado del riego y evitar riego excesivo. Es muy importante que el operario de riego entienda este concepto de humedad del suelo, para establecer una estrategia de control de riego con el fin último de suministrar una humedad de suelo óptima para el crecimiento de la planta, productividad, y reducir la pérdida de nutrientes por lixiviación [24].

Intensidad de luz

Los factores climáticos también influyen en la producción de vegetales hidropónicos. La producción es generalmente mejor en regiones con máxima intensidad y duración de la luz [14]. Las plantas necesitan luz para la fotosíntesis, ésta se puede aportar mediante iluminación artificial, en la medida que no se disponga de la luz natural suficiente, a través de energías limpias (aerogeneradores, placas solares, etc.) [22].

Por otro lado, para los sistemas acuapónicos, es importante prevenir el crecimiento de algas dado que son problemáticas y para ello es necesario minimizar al máximo la entrada de luz a los estanques. Esto se da por varias razones. Primero, ellas consumen los nutrientes disponibles en el agua, compitiendo con lo vegetales. Además, las algas actúan como fuente y sumidero de OD, produciendo el oxígeno durante el día mediante el proceso de fotosíntesis y consumiéndolo en la noche en el proceso de respiración. Estas pueden reducir considerablemente los niveles de OD en el agua durante la noche, lo que podría ocasionar la muerte de los peces. Finalmente, las algas pueden taponar los drenajes y bloquear los filtros de la unidad, generando un problema con la circulación del agua [15].

Elementos y requerimientos de funcionamiento necesarios en un sistema acuapónico a pequeña escala

Requerimientos

Suministro de agua

El origen del agua destinada para un sistema acuapónico deberá conocerse para así evitar problemas de funcionamiento, debido a que dependiendo de las condiciones de esta se deberán tomar determinadas acciones.

La recolección de agua de lluvia es considerada una buena medida para reducir costos. Esta fuente de agua no posee ningún tipo de sales al ser destilada en forma natural, y la falta de dureza, puede ser compensada con el agregado de Carbonatos. Al utilizar este recurso, se deberá tener precaución en determinadas zonas afectadas por las denominadas lluvias ácidas. Cuando el agua es extraída de pozos, o acuíferos, su calidad dependerá en gran medida del material con que esté compuesto el suelo que atraviesa. En zonas con piedras calizas o suelos rocosos, suelen tratarse de aguas duras y aunque ello no represente un problema (ya que los sistemas de recirculación consumen alcalinidad), puede necesitarse la adición de ácidos para alcanzar un pH deseable para el sistema. La recolección de agua desde el sistema de redes municipales es otra posibilidad, pero deberá considerarse el depósito previo del agua a utilizar por lo menos durante 48hs, con la finalidad de disipar el cloro que, generalmente, es empleado para su potabilización; pudiendo también airearse para acelerar ese proceso [15, 16].

Condiciones Ambientales

Luz

La selección del sitio es un aspecto importante que debe considerarse antes de instalar una unidad de acuaponía. Es importante recordar que algunos de los componentes del sistema, especialmente los medios de agua y piedra son pesados y difíciles de mover, por lo que vale la pena construir el sistema en su ubicación final. Los sitios seleccionados deben estar en una superficie estable y nivelada, en un área protegida del clima severo pero expuesta a la luz solar sustancial [15].

Dependiendo de las especies de plantas a cultivar se necesita mucha o poca luz solar. Los peces si necesitan estar en sombra constantemente para evitar crecimiento de algas y para mantener una temperatura constante [15].

Temperatura

La temperatura afecta también todos los aspectos de los sistemas de acuaponía. En general se debe mantener en un rango de 18-30 ° C. En la Tabla 2 se muestran los rangos ideales para el correcto funcionamiento de un sistema acuapónicos [15].

Tabla 2 Parámetros ideales en acuaponía

	Temp (°C)	pH	Amonia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Nitrato (mg/L)	OD (mg/L)
Rango	18 - 30	6 - 7	< 1	< 1	5 – 150	> 5

Presión Atmosférica

La solubilidad del oxígeno en el agua depende de la temperatura, de la presión parcial del oxígeno, de la presión atmosférica, de la salinidad del agua y de la superficie expuesta [22].

Humedad relativa

Depende de las plantas a cultivar [15].

Especies a Cultivar (Peces y Plantas)

Las especies a cultivar dependen de las condiciones del lugar donde se va a construir el sistema y deben ser apropiadas tanto para plantas como peces. En general, regiones donde la temperatura media diaria del aire durante todo el año es de 20-30 °C son ideales para peces tropicales, como la tilapia y las plantas tolerantes al calor. Las elecciones de cultivos y peces afectan significativamente los costos si se necesita un control climático para que coincida con las condiciones ideales de crecimiento de ambos componentes. Además, las regiones donde las temperaturas medias diarias del aire son favorables, pero fluctúan ampliamente durante el día y la noche (es decir, las tierras altas y las regiones montañosas), serían particularmente problemáticas para la producción de peces. Esto se debe a que los grandes cambios causan estrés a los animales [15].

En Medellín la temperatura generalmente varía de 16 °C a 26 °C y rara vez baja a menos de 15 °C o sube a más de 27 °C. A continuación, se describen brevemente algunas especies de plantas que pudieran ser cultivadas en climas templados como en Medellín y su vez en lugares un poco más calientes como Santa Fe de Antioquia:

Menta: Se obtiene mejores resultados en climas templados, por lo general en regiones frías se cultiva bajo cubiertas plásticas. Se requiere alta intensidad lumínica [25].

Tomillo: se adapta idealmente a temperaturas de entre 8-24°C, con buen comportamiento en climas fríos y templado, requiere buenas condiciones de luminosidad por lo que debe sembrarse a campo abierto [25].

Hierbabuena: La hierbabuena es una planta que prefiere climas húmedos y templados para su desarrollo normal. Requiere espacios bien iluminados. Aunque es muy sensible al frío y se hiela fácilmente, resiste mejor las bajas temperaturas que los grandes calores. Por estar dotada de raíces superficiales, no resiste la sequía [27].

Albahaca: Las semillas de albahaca necesitan una temperatura razonablemente alta y estable para iniciar la germinación (20–25°C). Una vez trasplantado en las unidades, la albahaca crece mejor en condiciones cálidas a muy cálidas y en plena exposición al sol. Sin embargo, se obtienen hojas de mejor calidad a través de un ligero sombreado. Con temperaturas diarias superiores a 27°C, las plantas deben ventilarse o cubrirse con redes de sombra (20 por ciento) durante las estaciones de radiación solar fuerte para evitar quemaduras en las puntas [15].

Lechuga: La lechuga es un cultivo de invierno. Para el crecimiento de la cabeza, la temperatura del aire nocturno debe ser de 3–12°C, con una temperatura diurna de 17–28°C. El crecimiento generativo se ve afectado por el fotoperíodo y la temperatura: la luz diurna prolongada y las condiciones cálidas (> 18°C) durante la noche provocan la formación de pernos. La temperatura del agua > 26°C también puede favorecer la aglomeración y el amargor de las hojas. La planta tiene baja demanda de nutrientes; Sin embargo, las mayores concentraciones de calcio en el agua ayudan a prevenir la quema de las puntas en las hojas en los cultivos de verano. El pH ideal es 5.8–6.2, pero la lechuga aún crece bien con un pH tan alto como 7, aunque pueden aparecer algunas deficiencias de hierro debido a la biodisponibilidad reducida de este nutriente por encima de la neutralidad [15].

Orégano: Es una planta arbustiva de ciclo corto, con altura de 0.5 hasta 1.50 m semitolerante a las bajas temperaturas. En condiciones naturales crece sobre suelos pedregosos en el matorral desértico micrófilo y rosetófilo, en altitudes que van desde los 1800 a los 2500 msnm, en áreas de escurrimiento (bajadas de cerros, lomeríos, laderas y arroyos) de lugares con clima seco semicálidos, con temperatura media anual de 18 a 20°C [26].

Acelga: Las temperaturas óptimas de la acelga son de 16 a 24°C, mientras que la temperatura mínima para el crecimiento es de 5°C. Aunque tradicionalmente es un cultivo de fines de invierno/primavera (que tolera heladas moderadas), las acelgas también pueden crecer bien a pleno sol durante las temporadas suaves de verano. Se sugiere una red de sombra a temperaturas más altas. La acelga tiene una tolerancia moderada a la salinidad, lo que la convierte en una planta ideal para el agua salina [15].

Ají: Los pimientos son una verdura fructífera de verano que prefiere condiciones cálidas y exposición total al sol. Las temperaturas de germinación de las semillas son altas: 22–34°C. Las semillas no germinarán bien a temperaturas <15°C. Las temperaturas diurnas de 22–28°C y las temperaturas nocturnas de 14–16°C favorecen las mejores condiciones de fructificación bajo una humedad relativa de 65–60 por ciento. Las temperaturas óptimas a nivel de la raíz son 15–20°C. En general, las temperaturas del aire por debajo de 10–12°C detienen el crecimiento de las plantas y causan una deformación anormal de los frutos, haciéndolos no comercializables. Las temperaturas > 30–35°C conducen a abortos florales o precipitaciones. En general, los pimientos más picantes se pueden obtener a temperaturas más altas. Las hojas superiores de la planta protegen la fruta que cuelga debajo de la exposición al sol. Al igual que con otras plantas fructíferas, el nitrato apoya el crecimiento vegetativo inicial (rango óptimo: 20–120mg/litro), pero se necesitan mayores concentraciones de potasio y fósforo para la floración y fructificación [15].

Pepino: Los pepinos crecen mejor con largos días cálidos y húmedos con abundante sol y noches cálidas. Las temperaturas óptimas de crecimiento son 24–27°C durante el día con 70–90 por ciento de humedad relativa. Una temperatura del sustrato de aproximadamente 21°C también es óptima para la producción. Las plantas detienen su crecimiento y producción a 10–13°C. Se recomienda tener una mayor concentración de potasio para favorecer mayores configuraciones y rendimientos de fruta [15].

En cuanto a los peces se describen a continuación (Tabla 3) algunas de las especies que pueden ser cultivadas según las condiciones ambientales del lugar.

Tabla 3 Diferentes especies de pez cultivadas en sistemas acuapónicos y sus condiciones óptimas de producción.

Especie	Temperatura (°C)		Nitrógeno amoniacal total (mg/litro)	Nitrito (mg/litro)	Oxígeno disuelto (mg/litro)	Proteína cruda en la comida (%)	Tasa de crecimiento (etapa de crecimiento)
	Vital	Optimo					
Carpa común Cyprinus carpio	4-34	25-30	< 1	< 1	> 4	30-38	600 gramos en 9-11 meses
Tilapia del Nilo Oreochromis niloticus	14-36	27-30	< 2	<1	> 4	28-32	600 gramos en 6-8 meses
Pez gato Ictalurus punctatus	5-34	24-30	< 1	< 1	> 3	25-36	400 gramos en 9-10 meses
Trucha arcoíris Oncorhynchus mykiss	10-18	14-16	< 0.5	< 0.3	> 6	42	1000 gramos en 14-16 meses
Mújol Mugil cephalus	8-32	20-27	< 1	< 1	> 4	30-34	750 gramos en 9-11 meses
Camarón gigante de Malasia	17-34	26-32	< 0.5	< 2	> 3	35	30 gramos 4-5 meses

Macrobrachium rosenbergii							
Barramundi Lates calcarifer	18-34	26-29	< 1	< 1	> 4	38-45	400 gramos en 9-10 meses

Intensidad de Cultivo (Cantidad de Peces, Plantas y Bacterias)

Se consideran muchas variables al equilibrar un sistema, pero una investigación exhaustiva ha simplificado el método de equilibrar una unidad a una relación única llamada relación de velocidad de alimentación (RATIO). La proporción de la tasa de alimentación es una suma de las tres variables más importantes, que son: la cantidad diaria de alimento para peces en gramos por día, el tipo de planta (vegetativa vs fructificación) y el espacio de crecimiento de la planta en metros cuadrados. Junto con la relación de velocidad de alimentación, existen otros dos métodos simples y complementarios para garantizar un sistema equilibrado: control de estado y pruebas de nitrógeno [15].

A continuación, se enlistan las principales variables para considerar al equilibrar una unidad acuapónica [15]:

- Capacidad de funcionamiento del sistema
- Método de producción acuapónica
- Tipo de peces (carnívoro vs. omnívoro, nivel de actividad)
- Tipo de comida para los peces (Nivel de proteína)
- Tipo de plantas (Hojas verdes, tubérculos, o frutas)
- Tipo de plantas de producción (única o multi especies)
- Condiciones ambientales y de calidad del agua
- Método de filtración

Las tasas diarias de alimento recomendada para peces son: para vegetales de hoja verde 40-50 gramos diarios de alimentos por metro cuadrado de espacio de crecimiento y para hortalizas fructíferas 50-80 gramos diarios de alimento por metro cuadrado de espacio de crecimiento. Este balance se puede complementar con la revisión continua de los estados de

salud de peces y plantas al igual que haciendo chequeos constantes de niveles de compuestos nitrogenados [15].

Según la superficie de siembra empleada, también se tienen ciertos rangos de tasa de alimentación (RATIO). Uno de los padres de la acuaponía moderna, James Rakocy, estableció unos valores para esta proporción de [17]:

De 15 a 25 gramos de alimento para peces, pueden mantener 1m² de cultivo de plantas empleando los métodos de cama de sustrato o de película nutritiva (NFT).

60-100 gramos de alimento para peces pueden mantener 1m² de cultivo de plantas empleando el método de raíz flotante (DWC).

De manera general para las camas de sustrato: 1m³ de volumen del tanque de peces por 2m³ de medios hidropónicos [14].

Con respecto a los peces de manera independiente, la densidad de población máxima recomendada es de 20kg de pez por 1000 litros de agua (pecera). Las unidades de pequeña escala tienen aproximadamente 1000 litros de agua y deben contener 10-20kg de pez. Las densidades de almacenamiento más altas requieren técnicas de aireación más sofisticadas para mantener los niveles de OD estables para los peces, así como un sistema de filtración más complejo para tratar los desechos sólidos. Se recomienda a los nuevos acuicultores que no excedan la densidad de población de 20kg por 1000 litros [15].

Por otro lado, y con respecto a las plantas de manera independiente, espaciar una alta densidad de siembra y/o una poda inadecuada aumenta la competencia por la luz, alentando las plagas de insectos. Esta competencia eventualmente hace que el tejido vegetal sea más succulento para que las plagas atraviesen o para que los patógenos penetren, y las condiciones estrechas ofrecen refugio a las plagas [15].

Caudal de Agua

El movimiento del agua es fundamental para mantener vivos a todos los organismos en acuaponía. El agua fluye desde los tanques de peces, pasa a través del separador mecánico y el biofiltro y finalmente llega a las plantas en sus camas de sustrato, tuberías o canales,

eliminando los nutrientes disueltos. Si se detiene el movimiento del agua, el efecto más inmediato será una reducción en el OD y la acumulación de desechos en la pecera; sin el filtro mecánico y el biofiltro, los peces pueden sufrir y morir en unas pocas horas. Sin flujo, el agua en camas de sustrato o unidades DWC se estancará y se volverá anóxica, y los sistemas NFT se secarán. Una directriz comúnmente citada para los sistemas de acuaponía densamente poblados es el ciclo del agua dos veces por hora. Por ejemplo, si una unidad de acuaponía tiene un volumen de agua total de 1000 litros, la velocidad del flujo de agua debe ser de 2000 litros/h, de modo que cada hora el agua se recicle dos veces. Sin embargo, a bajas densidades de cultivo, esta tasa de rotación es innecesaria, y el agua solo necesita un ciclo por hora. En la Figura 2, se aprecian los caudales requeridos por kg de pez, según sea la alimentación de los mismos y según sea el delta de oxígeno desde la entrada a la salida del sistema [15].

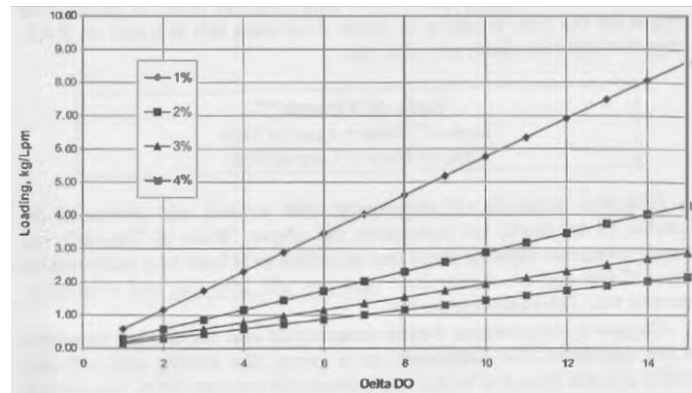


Figura 2 Caudales requeridos por kg de pez, según su tasa de alimentación y el delta de oxígeno entre la entrada y la salida del sistema [14].

Volumen de Aire u Oxígeno

Para las unidades de pequeña escala, con peceras de aproximadamente 1000 litros, se recomienda colocar al menos dos líneas de aire, también llamadas inyectoras, con piedras de aire en la pecera y un inyector en el contenedor del biofiltro. Para comprender el volumen de aire que ingresa al sistema, vale la pena medir el caudal. Para hacer esto, simplemente invierta un dispositivo de medición volumétrica (una botella de 2 litros, una taza de medir, un vaso graduado) en la pecera. Con la ayuda de un asistente, comience un cronómetro al mismo tiempo que se inserta la piedra de aire burbujeante en el dispositivo de medición. Pare el cronómetro cuando el contenedor esté lleno de aire. Luego, determine la velocidad de flujo en litros por minuto usando una relación. El objetivo para los sistemas en pequeña escala es de 4 a 8 litros/min para todas las piedras de aire combinadas. Siempre es mejor tener OD extra en lugar de no ser suficiente. Intente colocar piedras de aire para que no vuelvan a

suspender los sólidos sedimentados, evitando así su extracción a través del drenaje central [15].

Sistema Acoplado o Desacoplado

Los sistemas de sustrato pueden ser manejados por flujo continuo o por pulsos de inundación. Cuando son manejados por pulsos o inundación y drenaje, también conocido como flujo y reflujos, el sistema de plomería hace que las camas de sustrato se inunden con agua del tanque de peces y luego drenen nuevamente en el tanque de sumidero. Esto se logra mediante auto sifones o bombeo programado. Esta alternancia entre inundación y drenaje asegura que las plantas tengan nutrientes frescos y un flujo de aire adecuado en la zona de la raíz. Esto repone los niveles de oxígeno para plantas y bacterias. También asegura que haya suficiente humedad en la cama en todo momento para que las bacterias puedan prosperar en sus condiciones óptimas. Por lo general, estos sistemas pasan por el ciclo completo 1–2 veces cada hora, pero algunos sistemas exitosos solo realizan ciclos 3–4 veces por día [15, 16].

Medición de Variables de Interés

El agua es la sangre vital de un sistema acuapónico. Es el medio a través del cual se transportan todos los macro y micronutrientes esenciales a las plantas, y el medio a través del cual los peces reciben oxígeno. Cinco son los parámetros clave de la calidad del agua: oxígeno disuelto (OD), pH, temperatura, nitrógeno total y alcalinidad del agua. Cada parámetro tiene un impacto en los tres organismos de la unidad (peces, plantas y bacterias), y es crucial comprender los efectos de cada parámetro. Aunque algunos aspectos del conocimiento sobre la calidad del agua y la química del agua necesarios para la acuaponía parecen complicados, el manejo real es relativamente simple con la ayuda de kits de prueba simples. Los monitoreos son esenciales para mantener una buena calidad de agua en el sistema [14].

Tabla 4 y

Tabla 5 se muestran los métodos y frecuencia recomendados por la literatura para medir las variables de interés en sistemas acuapónicos y los rangos requeridos en los que se debe mantener cada variable para garantizar un buen funcionamiento de estos sistemas, respectivamente.

Tabla 4 . Métodos y frecuencia recomendados para medición de variables de interés [15].

Parámetro	Como medirlo	Frecuencia
-----------	--------------	------------

Temperatura	termómetro	Diario
Oxígeno disuelto	Medidor o kit de prueba	Diario
Amoníaco	Kit de prueba	Dos veces a la semana
Nitrito	Kit de prueba	Dos veces a la semana
PH	Medidor o kit de prueba	Dos veces a la semana
Alcalinidad	Kit de prueba	Semanal
Dureza	Kit de prueba	Semanal
Cloruro	Kit de prueba	Semanal

Tabla 5 Rangos óptimos de variables de interés en sistemas acuapónicos [15].

Variable	Rango óptimo
PH	6-7
Temperatura del agua	18-30 °C
OD	5-8 mg/litro
Amoniaco	0 mg/litro
Nitrito	0 mg/litro
Nitrato	5-150 mg/litro
KH	60-140 mg/litro

Alimentación de Peces

Una de las rutinas de alimentación de los peces, recomendada por algunos autores, es como la que se ilustra en la Tabla 6. Siguiendo esta rutina se garantiza un crecimiento óptimo de la tilapia [18]. Sin embargo, la rutina puede variar según la especie a cultivar.

Tabla 6 Rutina de alimentación para tilapia a 28°C [18].

Tamaño del pez (g)	% de biomasa por día	Numero de raciones por día

2 días a 1g	30 a 10	Al menos ocho
1-5	10 a 6	Al menos seis
5-20	6 a 4	Al menos cuatro
20-100	4 a 3	3-4
100-200	2 a 3	2
>200	1.5	1

Fertilización

El nitrógeno se suministra a las plantas acuapónicas principalmente en forma de nitrato, convertido a partir del amoníaco de los desechos de los peces a través de la nitrificación bacteriana. Algunos de los otros nutrientes se disuelven en el agua a partir de los desechos de pez, pero la mayoría permanece en un estado sólido que no está disponible para las plantas. Los desechos sólidos de los peces se descomponen por bacterias heterotróficas, lo cual libera los nutrientes esenciales en el agua. Sin embargo, con el tiempo, incluso un sistema de acuaponía perfectamente equilibrado puede volverse deficiente en ciertos nutrientes, con mayor frecuencia hierro, potasio o calcio. En general, el hierro se agrega regularmente como hierro quelatado en el sistema acuapónico para alcanzar concentraciones de aproximadamente 2mg/L. El calcio y el potasio se agregan al tamponar el agua al pH correcto, ya que la nitrificación es un proceso acidificante. Estos se agregan como hidróxido de calcio o hidróxido de potasio, o como carbonato de calcio y carbonato de potasio. Además, se puede preparar fertilizantes orgánicos para agregar al sistema y suplir las necesidades nutritivas [15].

Reposición de Pérdidas por Evaporación

Se debe verificar el nivel del agua y agregar agua adicional para compensar la evaporación, según sea necesario. Las plantas usan el agua a través de la evapotranspiración natural y la retienen dentro de los tejidos vegetales. Se pierde agua adicional por evaporación directa y salpicaduras. Como tal, la unidad deberá reponerse periódicamente. La fuente de agua utilizada tendrá un impacto en la química del agua de la unidad. Las nuevas fuentes de agua siempre deben analizarse para determinar el pH, la dureza, la salinidad, el cloro y cualquier contaminante para garantizar que el agua sea segura de usar [15].

Energía

El funcionamiento de las bombas eléctricas de la unidad, tanto de aire como de agua, requiere una fuente de energía, por lo cual los costos de funcionamiento se aumentan con respecto a otros sistemas de producción agro-acuícolas. Por otro lado, la combinación de peces y plantas se debe elegir para que coincida con la temperatura ambiente para la ubicación de los sistemas, dado que cambiar la temperatura del agua puede ser muy costoso y de gran consumo energético. Aunque la acuaponía no es el método de producción más barato debido a sus mayores costos de inversión, energía y gestión, puede aumentar considerablemente la productividad por unidad de tierra y es la tecnología de ahorro de agua más eficiente en la piscicultura. Además, estos sistemas pueden funcionar completamente con energía renovable [15].

Elementos

Estanques

Los estanques en los que se dispondrán los peces para que allí vivan, deben cumplir con ciertos requerimientos según las necesidades del sistema acuapónico.

Material: Se recomienda plástico fuerte e inerte o fibra de vidrio debido a su durabilidad y larga vida útil. El metal no es posible debido a la oxidación. El plástico y la fibra de vidrio son convenientes de instalar (también para plomería) y son bastante ligeros y maniobrables. Los abrevaderos para animales se usan comúnmente, ya que tienden a ser baratos. Si se usan recipientes de plástico, asegúrese de que sean resistentes a los rayos UV porque la luz solar directa puede destruir el plástico. En general, los tanques de polietileno de baja densidad (LDPE) son preferibles debido a su alta resistencia y características de grado alimenticio. De hecho, el LDPE es el material más utilizado para tanques de almacenamiento de agua para usos civiles. Otra opción es un estanque enterrado. Los estanques naturales son muy difíciles de manejar para la acuaponía porque los procesos biológicos naturales, que ya ocurren dentro del sustrato y el lodo en el fondo, pueden ser difíciles de manipular y los nutrientes ya son utilizados por las plantas acuáticas [15].

Profundidad: Este parámetro tiene una relación directa con el costo de construcción del estanque. Esto puede llevar al planificador a considerar estanques poco profundos. Sin embargo, estanques someros pueden tener efectos adversos sobre la producción. Los cambios en la temperatura diaria pueden ser mayores, así como los efectos en la evaporación, requiriendo por lo tanto mayor necesidad de recambio de agua. Los estanques muy profundos

por otra parte pueden generar estratificación y poco intercambio vertical en la columna de agua con el consiguiente deterioro de su calidad en las capas más profundas. Una profundidad de entre 1 y 1.5 metros (m) se considera la adecuada para minimizar la estratificación termal y disminuir el crecimiento de la maleza acuática en el fondo del estanque. Hay que considerar además que la profundidad estará asociada no solamente a la especie cultivada sino también al clima donde se ubica la granja, de manera que en sitios donde la temperatura es baja en invierno serán necesarios estanques más profundos, que además de ser más estables por su mayor volumen, las capas más profundas tendrán temperaturas más elevadas que las superficiales, brindando un ambiente más adecuado para los peces durante las épocas más frías [18].

Forma: Aunque cualquier forma de pecera funcionará, se recomiendan tanques redondos con fondo plano. La forma redonda permite que el agua circule uniformemente y transporta los desechos sólidos hacia el centro del tanque por la fuerza centrípeta. Los tanques cuadrados con fondo plano son perfectamente aceptables, pero requieren una eliminación más activa de los desechos sólidos. La forma del tanque afecta en gran medida la circulación del agua, y es bastante arriesgado tener un tanque con poca circulación. Los estanques con formas artísticas no geométricas, con muchas curvas, pueden crear puntos muertos en el agua sin circulación. Estas áreas pueden acumular desechos y crear condiciones anóxicas y peligrosas para los peces [18].


Color: Los tanques blancos reflejarán la luz solar y mantendrán el agua fresca. Alternativamente, el exterior de los tanques de color más oscuro se puede pintar de blanco. En áreas muy calientes o frías, puede ser necesario aislar térmicamente los tanques [15].

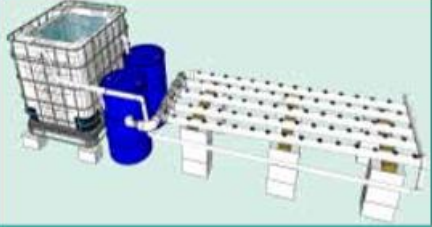
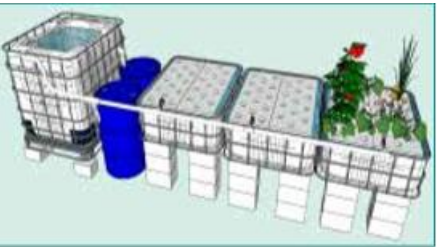
Protección: Todos los acuarios deben estar cubiertos. Las cubiertas de sombra evitan el crecimiento de algas. Además, las cubiertas evitan que los peces salten (a menudo ocurre con peces recién agregados o si la calidad del agua es subóptima), evitan que entren hojas y escombros y evitan que depredadores como gatos y pájaros ataquen a los peces. A menudo, se utilizan redes de sombra agrícolas que bloquean del 80 al 90 por ciento de la luz solar. La tela de sombra se puede unir a un marco de madera simple para proporcionar peso y hacer que la cubierta sea fácil de quitar [15].

Superficie de Siembra (Cama de sustrato, NFT o DWC)

Las superficies de siembra para sistemas acuapónicos existentes son: Película Nutritiva o NFT (Nutrient Film Technique), Raíz Flotante o DWC (Deep Water Culture) y Cama de Sustrato o Media Bed. Estos métodos se comparan en la Tabla 7 [15].

Tabla 7 Comparación entre las diferentes unidades de cultivo, con sus fortalezas y debilidades [15].

Tipo de sistema	Fortaleza	Debilidades
<p data-bbox="240 373 618 405">Unidades de cama de sustrato</p> 	<p data-bbox="706 373 894 405">Diseño simple</p> <p data-bbox="706 436 1024 506">Se pueden usar piezas alternativas/ reciclables</p> <p data-bbox="706 537 1024 606">Se puede cultivar verduras fructíferas altas</p> <p data-bbox="706 638 1024 707">Se pueden cultivar todo tipo de plantas</p> <p data-bbox="706 739 1024 808">Múltiples técnicas de irrigación</p> <p data-bbox="706 840 1024 947">Se pueden usar múltiples tipos de sustrato</p> <p data-bbox="706 978 1024 1047">Aireación alta cuando se usan campanas sifón</p> <p data-bbox="706 1079 1024 1148">Relativamente bajo consumo eléctrico</p> <p data-bbox="706 1180 1024 1249">El medio captura y mineraliza los sólidos</p>	<p data-bbox="1047 373 1382 443">Muy pesado, dependiendo de la elección del medio</p> <p data-bbox="1047 474 1382 506">Sustrato puede ser costoso</p> <p data-bbox="1047 537 1382 606">Los sustratos pueden no estar disponibles</p> <p data-bbox="1047 638 1300 669">Difícil a gran escala</p> <p data-bbox="1047 701 1382 770">Mayor evaporación que NFT y DWC</p> <p data-bbox="1047 802 1382 871">Construcción intensiva en mano de obra</p> <p data-bbox="1047 903 1382 1047">Los ciclos de inundación y drenaje requieren un cálculo cuidadoso del volumen de agua.</p> <p data-bbox="1047 1079 1382 1186">Los medios pueden obstruirse a alta densidad de almacenamiento</p> <p data-bbox="1047 1218 1382 1365">El trasplante de plantas requiere más mano de obra, ya que los medios necesitan ser trasladados</p> <p data-bbox="1047 1396 1382 1583">Si el suministro de agua no es uniforme, el rendimiento de la planta puede variar de una cama a otra</p>
<p data-bbox="240 1617 428 1648">Unidades NFT</p>	<p data-bbox="706 1617 1024 1724">Más rentable que las camas de medios a gran escala</p> <p data-bbox="706 1755 1024 1824">Ideal para hierbas y verduras de hoja verde.</p>	<p data-bbox="1047 1617 1382 1686">Método de filtración más complejo</p> <p data-bbox="1047 1717 1382 1824">La bomba de agua y la bomba de aire son obligatorias.</p>

	<p>Mínima pérdida de agua por evaporación.</p> <p>Sistema de peso ligero</p> <p>El mejor método para tejados</p> <p>Métodos de cosecha muy simples.</p> <p>El espacio entre tuberías se puede ajustar para adaptarse a diferentes plantas.</p> <p>Bien investigado por empresas comerciales hidropónicas</p> <p>Se requiere el menor volumen de agua</p> <p>Mano de obra mínima para plantar y cosechar</p>	<p>No se puede sembrar directamente</p> <p>El bajo volumen de agua aumenta los problemas de calidad del agua.</p> <p>Aumenta la variabilidad en la temperatura del agua con estrés en los peces.</p> <p>Las tuberías de entrada de agua pueden obstruirse fácilmente</p> <p>Vulnerable a cortes de energía</p>
<p>Unidades DWC</p> 	<p>Método más rentable que las camas de medios a gran escala</p> <p>El gran volumen de agua amortigua los cambios en la calidad del agua.</p> <p>Puede soportar breves interrupciones en la electricidad.</p> <p>Pérdida de agua mínima por evaporación</p> <p>Bien investigado por empresas comerciales hidropónicas</p> <p>Las balsas de poliestireno aíslan el agua de las pérdidas / ganancias de calor</p>	<p>Método de filtración más complejo</p> <p>Unidad muy pesada</p> <p>Se requiere un alto contenido de oxígeno disuelto en el canal, y se requiere una bomba de aire más sofisticada</p> <p>Los revestimientos de plástico deben ser de calidad alimentaria.</p> <p>Las láminas de poliestireno se rompen fácilmente.</p> <p>Las plantas altas son más difíciles de soportar.</p> <p>El gran volumen de agua aumenta la humedad y el</p>

	<p>manteniendo temperaturas constantes</p> <p>Las balsas cambiantes pueden facilitar la siembra y la cosecha.</p> <p>Las balsas proporcionan área de superficie de biofiltro</p> <p>Los canales DWC se pueden fijar con revestimientos de plástico utilizando casi cualquier tipo de pared (madera, marcos de acero, perfiles metálicos)</p> <p>Se puede utilizar en múltiples densidades de cultivo</p>	<p>riesgo de enfermedades fúngicas.</p>
--	--	---

Las unidades de cama de sustrato son el diseño más popular para acuaponía a pequeña escala. Este método es muy recomendable para la mayoría de las regiones en desarrollo. Estos diseños son eficientes con el espacio, tienen un costo inicial relativamente bajo y son adecuados para principiantes debido a su simplicidad. En estas unidades el sustrato se usa para soportar las raíces de las plantas y también funciona como filtro, tanto mecánico como biológico. Para construir una cama de sustrato se deben considerar algunos de los siguientes requerimientos, que se mencionan a continuación [15]:

Material: Las camas de sustrato pueden estar hechas de plástico, fibra de vidrio o un marco de madera con láminas de goma o polietileno a prueba de agua en la base y dentro de las paredes. Las camas multimedia más populares de "hágalo usted mismo" (DIY) están hechas de contenedores de plástico, IBC modificados o incluso bañeras viejas. Es posible usar todo lo anterior como camas y otros tipos de tanques siempre que cumplan con los siguientes requisitos [15]:

- Lo suficientemente fuerte como para retener agua y medios de cultivo sin romperse.
- Capaz de soportar condiciones climáticas difíciles.

- Hecho de material de calidad alimentaria que sea seguro para los peces, plantas y bacterias.
- Se puede conectar fácilmente a otros componentes de la unidad a través de piezas de plomería simples
- Se puede colocar cerca de los otros componentes de la unidad.

Profundidad: Este parámetro de la cama de sustrato es importante porque controla la cantidad de volumen de espacio de raíz en la unidad que determina los tipos de vegetales que se pueden cultivar. Si se cultivan hortalizas fructíferas grandes como tomates, quimbombó o repollo, la cama de sustrato debe tener una profundidad de 30cm, sin la cual las hortalizas más grandes no tendrían suficiente espacio de raíz, experimentarían esteras de raíces y deficiencias de nutrientes, y probablemente se volcarían. Las verduras de hoja verde pequeñas solo requieren 15–20 cm de profundidad de sustrato, lo que las convierte en una buena opción si el tamaño de la cama de sustrato es limitado. Aun así, algunos experimentos han demostrado que incluso los cultivos más grandes pueden cultivarse en camas poco profundos si las concentraciones de nutrientes son suficientes [15].

Sustrato: Todos los sustratos de cultivo aplicables tendrán varios criterios comunes y esenciales. El sustrato debe tener un área de superficie adecuada mientras sea permeable al agua y al aire, permitiendo que las bacterias crezcan, el agua fluya y las raíces de las plantas respiren. El sustrato debe ser inerte, no polvoriento y no tóxico, y debe tener un pH neutro para no afectar la calidad del agua. En la Tabla 8 se muestran algunas de las características y consideraciones importantes para tener en cuenta para elegir un sustrato de siembra adecuado [15].

Tabla 8 Características importantes de los sustratos de siembra para cultivo en camas [15].

Tipo de sustrato	Área de superficie (m ² /m ³)	PH	Costo	peso	Esperanza de vida	Retención de agua	Soporte para plantas	Facilidad de trabajo
Piedra volcánica (Toba)	300-400	Neutral	Medio	Medio	Largo	Medio-pobre	Excelente	Medio
Piedra volcánica (pómez)	200-300	Neutral	Medio-Alto	Ligero	Largo	Medio	Medio-pobre	Fácil

Piedra caliza	150-200	Básico	Bajo	Pesado	Largo	Pobre	Excelente	Difícil
Arcilla expandida (LEGA)	250-300	Neutral	Alto	Ligero	Largo	Medio-pobre	Medio	Fácil
Tapas de botella plástica	50-100	Inerte	Bajo	Ligero	Largo	Pobre	Pobre	Fácil
Fibra de coco	200-400 variable	Neutral	Bajo-medio	Ligero	Corto	Alto	Medio	Fácil

Sedimentador (Filtro Mecánico)

Para los SRA (Sistemas de Recirculación Acuícola), la filtración mecánica es posiblemente el aspecto más importante del diseño. La filtración mecánica es la separación y eliminación de desechos de peces sólidos y suspendidos de las peceras. Es esencial eliminar estos desechos para la salud del sistema, ya que las bacterias anaerobias liberan gases nocivos si los desechos sólidos se descomponen dentro de las peceras. La acuaponía a pequeña escala generalmente tiene densidades de almacenamiento más bajas que los métodos intensivos de SRA para los cuales se diseñaron originalmente estos filtros mecánicos, pero cierto nivel de filtración mecánica es esencial para tanques acuapónicos saludables, independientemente del tipo de método hidropónico utilizado [15].

Tipos de filtro: Existen varios tipos de filtro mecánico. El método más simple es una pantalla o filtro ubicado entre la pecera y el lecho de cultivo. Esta pantalla atrapa desechos sólidos y necesita enjuagarse con frecuencia. Del mismo modo, el agua que sale de la pecera puede pasar a través de un pequeño recipiente de material particulado, separado de la cama de sustrato; este recipiente es más fácil de enjuagar periódicamente. Estos métodos son válidos para algunas unidades de acuaponía a pequeña escala, pero son insuficientes en sistemas más grandes con más peces donde la cantidad de desechos sólidos es relevante. Existen muchos tipos de filtros mecánicos, que incluyen tanques de sedimentación, clarificadores de flujo radial, filtros de arena o perlas y filtros deflectores; cada uno de ellos se puede usar de acuerdo con la cantidad de desechos sólidos que deben eliminarse. Sin embargo, para sistemas a pequeña escala, los clarificadores o separadores mecánicos, son los filtros más apropiados. Los clarificadores, en general, pueden eliminar hasta el 60 por ciento del total de sólidos extraíbles [15]. En la Figura 3 se pueden observar algunos de los filtros mecánicos implementados en sistemas acuapónicos tanto a pequeña como mediana escala.

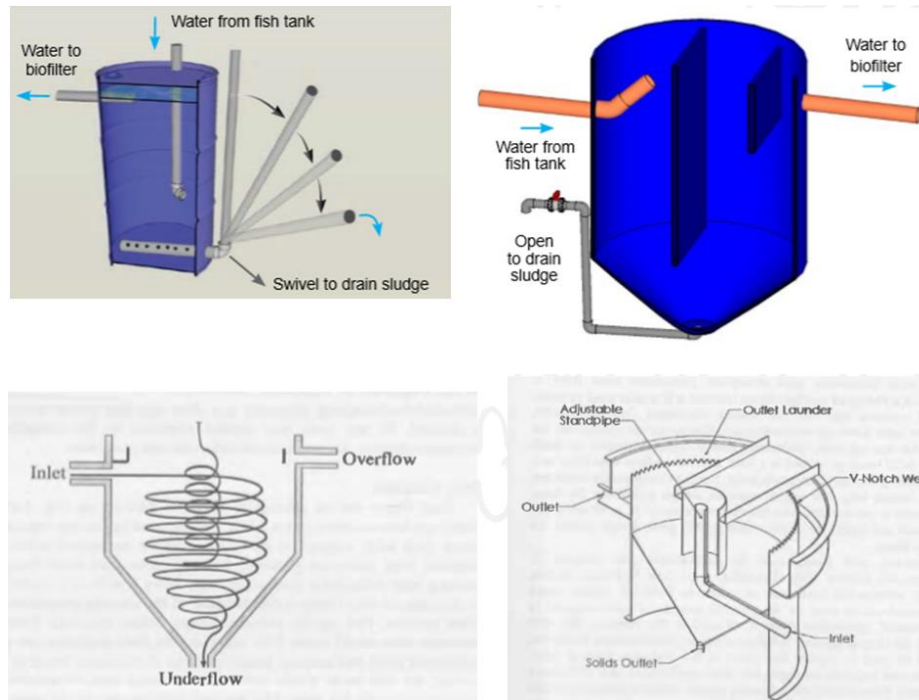


Figura 3 Algunos tipos de filtros mecánicos implementados en sistemas acuapónicos a pequeña y mediana escala [14, 15].

Filtro Biológico

La biofiltración es la conversión de amoníaco y nitrito en nitrato por bacterias vivas. La mayoría de los desechos de pez no se pueden filtrar con un filtro mecánico, porque los desechos se disuelven directamente en el agua y el tamaño de estas partículas es demasiado pequeño para eliminarlas mecánicamente. Por lo tanto, para procesar estos desechos microscópicos, un sistema acuapónico utiliza bacterias microscópicas. La biofiltración es esencial en acuaponía porque el amoníaco y el nitrito son tóxicos incluso a bajas concentraciones, mientras que las plantas necesitan los nitratos para crecer. Sin embargo, algunas grandes instalaciones de acuaponía que siguen el diseño del sistema desarrollado en la Universidad de las Islas Vírgenes no utilizan un biofiltro separado, ya que dependen principalmente de las superficies húmedas de las unidades, de las raíces de las plantas y de la absorción directa de las plantas para procesar el amoníaco. La biofiltración separada es innecesaria en la técnica de cama de sustrato porque las propias camas de cultivo son biofiltros perfectos. A continuación, se mencionan algunas de las consideraciones necesarias para construir un filtro biológico adecuado para un sistema acuapónico a pequeña escala [15].

Diseño: El biofiltro está diseñado para tener una gran superficie de suministro de agua oxigenada. El biofiltro se instala entre el filtro mecánico y los recipientes hidropónicos. El volumen mínimo de este contenedor de biofiltro debe ser un sexto del de la pecera [15].

Medio: Un medio de biofiltro comúnmente utilizado es Bioballs®, un producto patentado disponible en tiendas de suministros de acuicultura, aunque existen marcas genéricas similares. Están diseñados para ser un material de biofiltro ideal, ya que son artículos de plástico pequeños, especialmente formados, que tienen una superficie muy grande para su volumen (500–700 m²/m³). Se pueden utilizar otros medios, como grava volcánica, tapas de botellas de plástico, pufs de ducha de nylon, mallas, virutas de cloruro de polivinilo (PVC) y almohadillas de nylon. En la figura 4 se muestra el diseño posible de un biofiltro para sistemas acuapónicos [15].

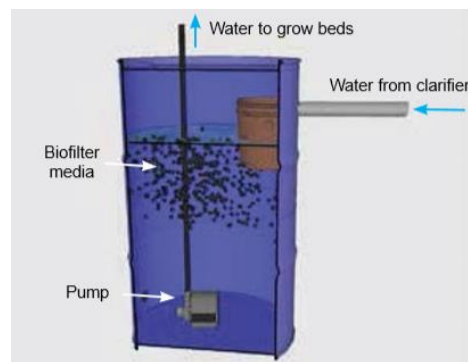


Figura 4 Diseño de biofiltro para sistemas acuapónicos [15].

Mineralizador

Hay otro grupo importante de bacterias, así como otros microorganismos, involucrados en acuaponía. Este grupo de bacterias generalmente se llama grupo heterotrófico. Estas bacterias utilizan carbono orgánico como fuente de alimento y están involucradas principalmente en la descomposición de desechos sólidos de los peces y desechos de plantas. La mayoría de los peces solo retienen del 30 al 40 por ciento de los alimentos que comen, lo que significa que el 60 al 70 por ciento de lo que comen se libera como desecho. De estos desechos, 50–70 por ciento son desechos disueltos liberados como amoníaco. Sin embargo, el residuo restante es una mezcla orgánica que contiene proteínas, carbohidratos, grasas, vitaminas y minerales. Las bacterias heterotróficas metabolizan estos desechos sólidos en un proceso llamado mineralización, que hace que los micronutrientes esenciales estén disponibles para las plantas en acuaponía [15].

La mineralización, en términos de acuaponía, se refiere a la forma en que las bacterias procesan y metabolizan los desechos sólidos en nutrientes para las plantas. Los desechos sólidos que quedan atrapados por el filtro mecánico contienen nutrientes; aunque el

procesamiento de estos desechos es diferente de la biofiltración y requiere una consideración por separado. Retener los sólidos dentro del sistema general agregará más nutrientes a las plantas. Cualquier residuo que quede en los filtros mecánicos, dentro de los biofiltros o en los lechos de cultivo está sujeto a cierta mineralización. Dejar los desechos en su lugar por más tiempo permite más mineralización; Un mayor tiempo de residencia de los desechos en los filtros conducirá a una mayor mineralización y a la retención de más nutrientes en el sistema. Sin embargo, estos mismos desechos sólidos, si no se manejan y mineralizan adecuadamente, bloquearán el flujo de agua, consumirán oxígeno y conducirán a condiciones anóxicas, que a su vez conducirán a la producción peligrosa de gas sulfuro de hidrógeno y a la desnitrificación [15].

Si se decide mineralizar deliberadamente estos sólidos, existen formas simples de facilitar la descomposición bacteriana en un recipiente separado, simplemente almacenando estos desechos en este recipiente separado, con oxigenación adecuada usando piedras de aire. Después de un período de tiempo indefinido, los desechos sólidos habrán sido consumidos, metabolizados y transformados por bacterias heterotróficas. En este punto, el agua se puede decantar y volver a agregar al sistema de acuaponía, y los desechos restantes, que han disminuido en volumen, se pueden agregar al suelo [15].

Sumidero (Tanque de Reserva)

El tanque de sumidero es un tanque de recolección de agua en el punto más bajo del sistema; el agua siempre corre cuesta abajo hacia el sumidero. Esta es a menudo la ubicación de la bomba sumergible. Los tanques de sumidero deben ser más pequeños que los tanques de peces y deben ser capaces de contener entre un cuarto y un tercio del volumen del tanque de peces. Un acrónimo de uso común describe los puntos clave de este diseño, que es: altura constante en la pecera - bomba en el tanque de sumidero (CHIFT - PIST). El uso de este método significa que las pérdidas de agua, incluidos los componentes de evaporación y fugas, solo se manifiestan dentro del tanque de sumidero y no afectan el volumen del tanque de peces. Luego es sencillo medir las pérdidas por evaporación normales y calcular con qué frecuencia el agua necesita reponerse, y se puede determinar de inmediato si hay una fuga [15].

Elementos de conexión hidráulica

Cada sistema requiere una selección de tuberías de PVC, conexiones y accesorios de PVC, mangueras y tubos. Estos proporcionan los canales para que el agua fluya hacia cada componente. También se necesitan válvulas de mamparo, sellador de silicona y cinta de teflón. Los componentes de PVC se conectan entre sí de forma permanente utilizando

cemento de PVC, aunque el sellador de silicona se puede usar temporalmente si la tubería no es permanente y las juntas no están bajo alta presión de agua [15].

Elementos eléctricos

Bomba de aire: Las bombas de aire inyectan aire en el agua a través de tuberías de aire y piedras de aire que se encuentran dentro de los tanques de agua, aumentando así los niveles de OD en el agua. El OD adicional es un componente vital de las unidades NFT y DWC. Las piedras de aire se encuentran al final de la línea de aire y sirven para difundir el aire en burbujas más pequeñas. Las burbujas pequeñas tienen más área de superficie y, por lo tanto, liberan oxígeno al agua mejor que las burbujas grandes; esto hace que el sistema de aireación sea más eficiente y contribuye a ahorrar costos. Se recomienda utilizar piedras de aire de calidad para obtener las burbujas de aire más pequeñas. Se producirá bioincrustación, y las piedras de aire deben limpiarse regularmente primero con una solución de cloro para eliminar los depósitos bacterianos y luego, si es necesario, con un ácido muy suave para eliminar la mineralización, o reemplazarse, cuando el flujo de burbujas es inconsistente. Las bombas de aire de calidad son un componente insustituible de los sistemas acuapónicos, y muchos sistemas se han salvado del colapso catastrófico debido a la abundancia de OD. Si es posible, es preferible utilizar una bomba de aire combinada de CA/CC en caso de falta de electricidad, porque cuando se desconecta de la alimentación de CA durante un corte de energía, las baterías de CC cargadas pueden continuar funcionando [15]. En la Figura 5 se observa un ejemplo de piedra de aire.



Figura 5 Piedra de aire para sistemas de aireación.

Bomba de agua: Con mayor frecuencia, se utiliza una bomba de agua sumergible de tipo impulsor como el corazón de una unidad de acuaponía y se recomienda este tipo de bomba. Se podrían usar bombas externas, pero requieren más plomería y son más apropiadas para diseños más grandes. Las bombas de agua de alta calidad deben usarse preferiblemente para garantizar una larga vida útil y eficiencia energética. Las bombas de alta calidad mantendrán su capacidad y eficiencia de bombeo durante al menos 1 a 2 años, con una vida útil general de 3 a 5 años, mientras que los productos inferiores perderán su potencia de bombeo en un

tiempo más corto, lo que reducirá significativamente los flujos de agua. Con respecto al caudal, las unidades de pequeña escala necesitan un caudal de 2000 litros/h a una altura de 1,5 metros; una bomba sumergible de esta capacidad consumiría entre 25 y 50 W/h. Una aproximación útil para calcular la eficiencia energética de las bombas sumergibles es que una bomba puede mover 40 litros de agua por hora por cada vatio por hora consumida, aunque algunos modelos afirman el doble de esta eficiencia. Al diseñar la tubería para la bomba, es importante darse cuenta de que la potencia de bombeo se reduce en cada conexión de tubería; se puede perder hasta el 5 por ciento del caudal total en cada conexión de tubería por la que se hace pasar el agua. Por lo tanto, use el número mínimo de conexiones entre la bomba y las peceras. También es importante tener en cuenta que cuanto menor es el diámetro de las tuberías, mayor es la pérdida de flujo de agua. Una tubería de 30mm tiene el doble de flujo que una tubería de 20mm, incluso si se sirve desde bombas con la misma capacidad. Además, una tubería más grande no requiere ningún mantenimiento para eliminar la acumulación de sólidos en su interior. En términos prácticos, esto resulta en ahorros significativos en electricidad y costos operativos. Al instalar una unidad de acuaponía, asegúrese de colocar la bomba sumergible en un lugar accesible porque es necesaria una limpieza periódica. De hecho, el filtro interno necesitará limpieza cada 2-3 semanas. Las bombas de agua sumergibles se romperán si funcionan sin agua; nunca se debe poner a funcionar una bomba en seco [15].

Elementos de medición

Se recomienda el acceso a pruebas de calidad de agua simples para cada unidad de acuaponía. Los kits de prueba de agua dulce codificados por colores están fácilmente disponibles y son fáciles de usar. Estos kits incluyen pruebas de pH, amoníaco, nitrito, nitrato, GH y KH. Cada prueba implica agregar 5–10 gotas de un reactivo en 5 mililitros de agua acuapónica; cada prueba no tarda más de cinco minutos en completarse. Otros métodos incluyen medidores digitales de pH o nitrato (relativamente caros y muy precisos) o tiras de prueba de agua (más baratas y moderadamente precisas) [15].

Automatización

La automatización de un proceso consiste en transferir tareas de producción, que normalmente se realiza por un operador humano a un conjunto de elementos tecnológicos. Bien sea para automatizar un proceso o para hacer registro de variables relevantes, se debe conocer en primera instancia los principios, físicos, químicos, biológicos y condiciones de trabajo del sistema, a partir de los cuales se realiza una clasificación por prioridad y se convierten en foco de trabajo [28].

Automatización en la agricultura

El complejo entorno agrícola combinado con una producción intensiva requiere el desarrollo de sistemas robustos con un tiempo de desarrollo corto a bajo costo. La naturaleza desestructurada del entorno externo aumenta las posibilidades de falla. Además, las máquinas suelen ser operadas por personal de baja tecnificación. Por lo tanto, la seguridad y confiabilidad inherentes es una característica importante. La productividad agrícola ha aumentado significativamente a lo largo de los años gracias a la intensificación, la mecanización y la automatización. Esto incluye equipos agrícolas automatizados para operaciones de campo, sistemas de animales y sistemas de cultivo (control de clima de invernadero, sistemas de riego).

La introducción de la automatización en la agricultura ha reducido los costos de producción, ha reducido la monotonía del trabajo manual, ha elevado la calidad de los productos frescos y ha mejorado el control ambiental. A diferencia de las aplicaciones industriales, que se ocupan de tareas simples, repetitivas, bien definidas y conocidas a priori, la automatización en la agricultura requiere tecnologías avanzadas para hacer frente al entorno complejo y altamente variable [29].

Automatización electromecánica

Muchos procesos y productos técnicos en el área de la ingeniería mecánica y eléctrica muestran una creciente integración de la mecánica con la electrónica digital y el procesamiento de la información. Esta integración se produce entre los componentes (hardware) y las funciones impulsadas por la información (software), lo que da como resultado sistemas integrados llamados sistemas mecatrónicos. Su desarrollo implica encontrar un equilibrio óptimo entre la estructura mecánica básica, la implementación de sensores y actuadores, y el procesamiento automático de información y el control general [29].

Componentes principales en la automatización

Sistema embebido o sistema de control

Los sistemas embebidos son sistemas informáticos de propósito especial que están totalmente embebidos y encerrados por los dispositivos que sirven o controlan, de ahí el término sistemas embebidos. El uso de computadoras de uso general, como las PC, sería demasiado costoso para la mayoría de los productos que incorporan alguna forma de tecnología de

sistema embebido [29]. Un ejemplo de estos son los microcontroladores, los cuales son computadoras de un solo chip. Micro sugiere que el dispositivo es pequeño y controlador sugiere que el dispositivo se puede usar en aplicaciones de control [30].

Todos los microcontroladores operan con un conjunto de instrucciones (o el programa de usuario) almacenadas en sus memorias de programa. Un microcontrolador obtiene estas instrucciones de su memoria de programa una por una, las decodifica y luego lleva a cabo las operaciones requeridas. Básicamente, un microcontrolador ejecuta un programa de usuario que está cargado en su memoria de programa. Bajo el control de este programa, los datos se reciben de dispositivos externos (entradas), se manipulan y luego se envían a dispositivos externos (salidas). Por ejemplo, en un sistema de control de nivel de fluido basado en microcontrolador, el objetivo es controlar el nivel del fluido en un punto dado. Aquí, el microordenador lee el nivel de líquido a través de un dispositivo sensor de nivel. El programa que se ejecuta dentro del microcontrolador activa la bomba y la válvula e intenta controlar el nivel de fluido al valor requerido. Si el nivel de líquido es bajo, la microcomputadora opera la bomba para extraer más líquido del depósito. En la práctica, la bomba se controla continuamente para mantener el fluido en el nivel requerido [30].

Actuadores

Los actuadores son los dispositivos a través de los cuales un controlador actúa en el sistema. Como en el caso de los sensores, el tipo específico de actuador depende mucho de la aplicación. Los movimientos mecánicos son introducidos por mecanismos de resorte, dispositivos hidráulicos y/o neumáticos, fuerzas magnéticas, válvulas o energía térmica. Los cambios de propiedades termodinámicas se introducen mediante calentamiento o enfriamiento o variaciones de presión, por ejemplo. Las propiedades eléctricas se modifican cargando o descargando condensadores o aplicando voltaje y corriente, solo por mencionar algunos [29].

Sensores

Los sensores se basan en la transferencia de una cantidad física de un dominio de energía a otro [31]. Para automatizar un dispositivo, se requieren sensores para inspeccionar el entorno y proporcionar información sobre la reacción posterior del dispositivo. Depende mucho de la tarea a realizar con el producto, el tipo de sensor a seleccionar [29]

METODOLOGÍA

En el desarrollo de este proyecto se integraron metodologías teórico-prácticas. En la Figura 6 se presenta el diagrama de flujo en el cual se muestran todas las actividades que se llevaron a cabo para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

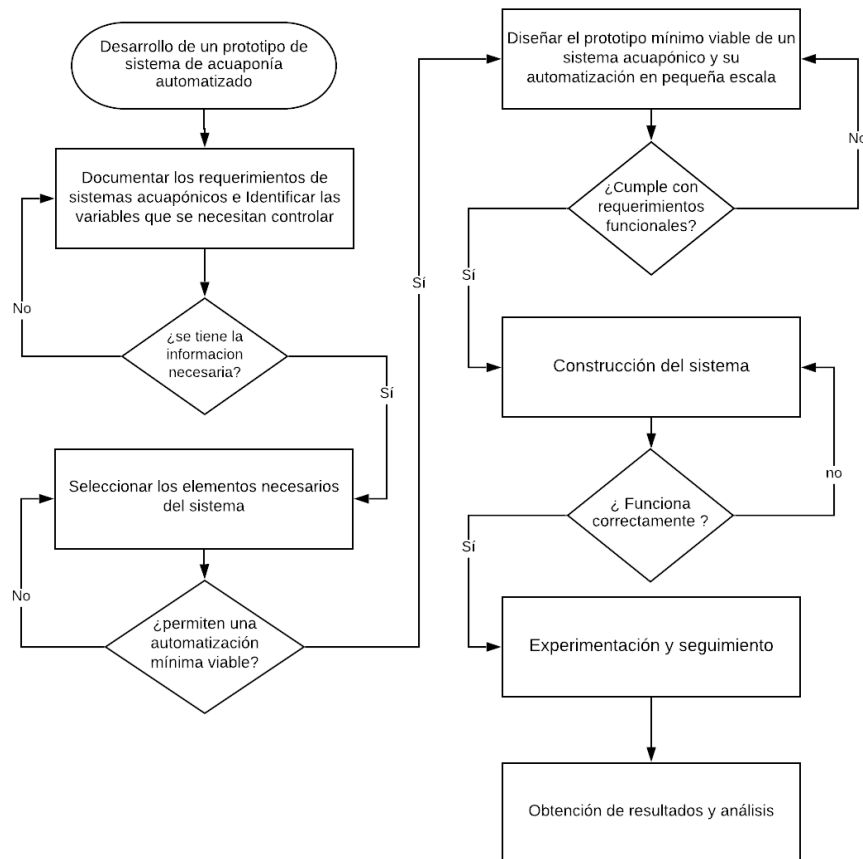


Figura 6 Diagrama de flujo actividades

Documentación de los requerimientos

Se partió de una amplia búsqueda bibliográfica con el fin de identificar las variables que son importante controlar en un sistema acuapónico, los elementos que lo componen, junto con sus características y especificaciones, esto debido a que a través de una adecuada planificación del sistema y sus características se podría evitar o prevenir muchos de los problemas que surgieran posteriormente.

Selección de los elementos

A partir de la información recogida en la documentación, se procedió a seleccionar cada uno de los elementos y variables, necesarios para la construcción y seguimiento del sistema a pequeña escala, junto con su automatización. Para ello se usó la metodología planteada por Nigel Cross en su libro métodos de diseño, en el cual se ofrece un enfoque estratégico para el diseño de productos, tales como una máquina. Para lograr esto en primera instancia, se planteó una clasificación de los objetivos, que también son llamados requerimientos y son una mezcla de fines abstractos y concretos que el diseño debe tratar de satisfacer o alcanzar; Luego se establecieron las funciones que debía satisfacer el prototipo y con esto en mente se fijaron los requerimientos del sistema, los cuales comprendían las especificaciones del rendimiento y limitaban la gama de soluciones aceptables [32].

Posteriormente, se realizó una determinación de las características usando el método del despliegue de la función de la calidad o casa de la calidad, en el cual luego de identificar los requerimientos del sistema, se nombraron en forma de atributos que un sistema de acuaponía a pequeña escala debe poseer. Estos atributos se relacionaron con características de ingeniería, las cuales iban a posibilitar el correcto funcionamiento del sistema. Estas características fueron el rendimiento, control del sistema, variables necesarias a medir, dimensiones del sistema y costos. Tanto atributos como características se relacionaron mediante una calificación ponderada de 1 a 9, dando esto a entender el grado de relación entre estas. Finalmente, las características que tenían poca o nula relación con algún atributo daban a entender poca importancia de ellas en el sistema. De igual manera las características que tiene mayor relación con los atributos entendieron como necesarias para el sistema [32].

Finalmente, para la etapa de selección se desarrolló la generación de alternativas, para la cual se identificaron algunas posibles soluciones a los requerimientos de funcionamiento del sistema, basado en la amplia búsqueda bibliográfica llevada a cabo anteriormente. Además, se mencionaron los elementos necesarios para la automatización del sistema, tanto para la medición de variables, como para ejercer acción de control sobre el mismo. En cuanto a la evaluación de alternativas, esta se llevó a cabo mediante la asignación de determinados parámetros que se consideraron importantes para evaluar las alternativas de cada una de las funciones. A cada uno de estos parámetros se le asignó un peso ponderado y se evaluaron para cada una de las alternativas. Estas funciones daban razón a puntos determinantes para el correcto funcionamiento de cada elemento del sistema. Para la determinación de los actuadores, se optó por elegir los que fueran necesarios para dar respuesta a las variables que se medirían por medio de algún sensor y según la relación de las variables basados en la literatura [32].

Diseño

Una vez se tuvo claro todos los elementos que debe poseer el sistema de acuaponía a pequeña escala, se pasó a la etapa de diseño y para ello se usó el software sketchUp 2020, con el cual se bosquejó una primera configuración, incluyendo cada uno de los elementos seleccionados en la etapa anterior y los materiales que se tuvieron al alcance para construir el sistema.

Construcción

Luego de tener claro el diseño se pasó a la etapa de construcción del sistema. Esta fue llevada a cabo en Santa fe de Antioquia, un municipio que está ubicado a 79 kilómetros de la ciudad de Medellín cuenta con una elevación de 550 metros por sobre el nivel del mar tiene una temperatura promedio de 27°C. Para la construcción se partió de un tanque IBC de 1000 litros, que se tenía fácilmente al alcance. Este fue cortado y usando un tercio de la parte superior se planteó construir la cama de siembra y el restante se usó para elaborar el tanque de los peces. Se usaron canecas plásticas, una de 55 galones y otras dos de 5 galones abiertas en ambos extremos y unidas formando un tubo, ambas en el interior de la primera caneca. Con estos elementos se elaboró el sedimentador radial. El biofiltro se construyó usando una caneca de aproximadamente 9 galones y se dispusieron en su interior tapas plásticas de botellas de bebida, como sustrato. Finalmente, para construir el reservorio del agua se usó una caneca de 55 galones la cual se enterró con el fin de mantener los niveles de agua adecuados y así lograr que el agua del sistema fluyera. El primer diseño elaborado, que ejemplifica la disposición de los elementos antes mencionados, incluye el sistema tipo sifón para el vaciado de la cama de siembra y las respectivas tuberías para todo el sistema. En este primer diseño no se plantearon los mineralizadores, sin embargo, estos fueron construidos usando canecas de pintura de 5 galones e incluidos en el diseño final junto con los sistemas de automatización del módulo de acuaponía.

Una vez se tenía el sistema construido se procedió a integrar los peces en el tanque y se decidió usar tilapia roja. Se añadieron 15 ejemplares de aproximadamente 7 cm de longitud y 40 g de peso. Una vez se consideró que el sistema tenía niveles de nutrientes aptos para las plantas, se procedió a su siembra en el sistema. En total se plantaron 10 plántulas, entre ellas albahaca, sandía, tomate perla, fresa, orégano, maracuyá, ají y cebollín.

En cuanto a la automatización del sistema, esta fue ejercida mediante el microcontrolador Arduino UNO. La comunicación con los actuadores fue mediada a través de relés electromecánicos con aislamiento optoacoplado, la interconexión y alimentación de los diferentes sensores y actuadores se realizó mediante una placa universal de baquelita y la base de datos para la recopilación y visualización de datos se realizó mediante el

microprocesador Omega Onion. Este sistema de control, junto con los actuadores y sensores seleccionados se muestran en la Figura 7.

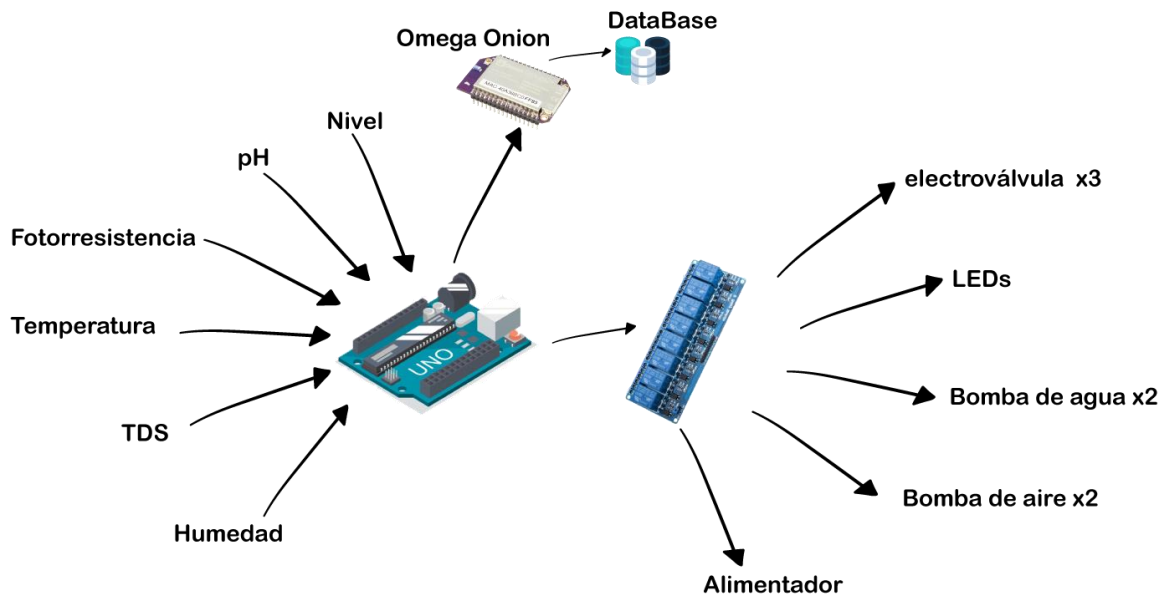


Figura 7 Sistema de automatización

Para la recirculación del sistema se planteó que fuera 8 veces al día durante 15 minutos y al mismo tiempo se encendiera la bomba de aire que oxigenaba el biofiltro, los peces y las plantas. Además, se programó el sistema de tal forma que mientras estaba recirculando o llenando la cama de las plantas, no se tomara en cuenta el nivel de agua, dado que esto afectaría el volumen que se tenga en el tanque de reserva. Se tomó la decisión de que las luces permanecieran encendidas solo dos horas más luego de que se llegara a un nivel de luminosidad bajo. A continuación, se hace una breve descripción de las funciones de cada uno de los elementos de la automatización:

Sensor de humedad: Se utilizó el sensor capacitivo SEN0193, el cual proporciona información acerca del momento en el cual la cama de siembra tiene niveles bajos de humedad y como respuesta se enciende la bomba de agua y habilita la electroválvula que deja pasar agua a dicha cama.

Sensor de pH: Se utilizó el sensor SEN0169, el cual permite medir la calidad del agua del sistema, siendo el pH uno de los parámetros más relevantes para este. Para su calibración se usaron soluciones buffer de pH conocido 4 y 10. Además, para garantizar medidas más

precisas su señal fue acondicionada teniendo en cuenta compensación por temperatura y su funcionamiento finalmente se corroboró usando pruebas colorimétricas. Este sensor fue instalado en el tanque de los peces, ya que los cambios drásticos en este parámetro afectan más directamente e incluso de forma peligrosa estos organismos.

Nivel del Agua: En el sistema se instalaron dos sensores de nivel ópticos FS-IR02 los cuales permitieron medir el nivel del agua. El primero se usó para determinar el nivel de agua del tanque de reposición, se ubicó en la parte superior de dicho tanque y en caso de que el nivel este bajo se enciende la electroválvula de reposición. El segundo se ubicó en la tubería de salida de la cama de siembra e indica al sistema cuando dicha cama comienza a vaciar por efecto sifón, generando que la bomba y la electroválvula que entregan agua a esta cama se apaguen.

Sensor de Temperatura: En el sistema se usó el sensor de temperatura DS18B20, el cual usa protocolo de comunicación One Wire. Este fue usado para determinar la temperatura en el estanque de los peces, cerca al sensor de pH. La información obtenida por este se usó para determinar el mejor momento en cual alimentar a los peces y realizar compensación por temperatura para la medición del pH

Sensor de TDS: El sensor usado en el sistema fue el SEN0244, el cual fue calibrado mediante una solución buffer de 707ppm. Esta variable da idea de la cantidad de nutrientes en forma de sales contenidas en el agua y aporta información sobre el correcto funcionamiento del sistema.

Fotorresistencia: Esta fue instalada en el techo del sistema e indica al mismo el momento en el cual llega la noche, generando que el sistema encienda las luces LED de color blanco y amarillo, las cuales son ideales para las plantas y proporcionando así dos horas más de luz con el fin de estimular el crecimiento de estas. Para su adecuación se usó un divisor de voltaje, permitiendo entregar voltajes ideales para el ADC del microcontrolador.

Electroválvulas: En el sistema se instalaron tres electroválvulas, las cuales son de tipo solenoide y funcionan como normalmente cerradas. La primera se usó para dejar pasar el agua al tanque de los peces y se habilita junto a la bomba del tanque de reserva. La segunda permite el paso a la cama de las plantas y la tercera posibilita la reposición de agua al sistema.

Alimentador de peces: Este se instaló en el sistema con el fin de proporcionar el alimento de los peces diariamente. El momento de alimentación depende de la temperatura y se hace

en el momento que los peces estén más activos. Este se construyó usando un motor paso a paso, el cual hace girar un tornillo sin fin con lo cual se consigue que el alimento llegue a los peces.

Bombas de agua: Al sistema se le instalaron dos bombas de agua. La primera se instaló en el tanque de reserva, supe agua al tanque de los peces y a la cama de siembra y su elección depende de las electroválvulas. La segunda su ubico en el mineralizador aerobio y ayudaba a retornar el agua al sistema luego de completar la mineralización.

Bombas de aire: En el sistema se instalaron dos bombas de aire. La primera supe el aire de los peces, las plantas y el biofiltro mientras la segunda se usó en el mineralizador aerobio.

Evaluación y Seguimiento

En cuanto a la etapa de experimentación y seguimiento del sistema, se planteó medir sus variables usando pruebas colorimétricas. Estas se llevaron a cabo durante todo el proceso, a partir del momento en cual se introdujeron los peces en el tanque, debido a que se requería garantizarles las mejores condiciones, junto con las plantas. Además, se llevó a cabo un seguimiento fotográfico del crecimiento y desarrollo de las plantas. En cuanto a la automatización se realizó un análisis del desempeño de sus elementos, en el cual se evaluó el funcionamiento de cada uno de ellos.

RESULTADOS Y ANALISIS

Selección de elementos necesarios para la construcción y automatización

Para realizar la selección de requerimientos de funcionamiento de un sistema acuapónico a pequeña escala se implementó el método llamado casa de la calidad que se muestra en la Tabla 9. Por medio de este método, se puede visualizar de manera clara y concreta la relación (en verde) y la prioridad (número) existente entre las características y los atributos que permiten un mejor funcionamiento de un sistema acuapónico a pequeña escala. Esta información permite obtener mayor claridad y es un buen referente a la hora de identificar los elementos con los cuales se construyó el sistema. Además, ayudó a identificar las variables que mayor atención debían tener, con lo cual se pudieron seleccionar los métodos medición adecuados para el sistema.

Tabla 9 Casa de la calidad

CASA DE LA CALIDAD	ATRIBUTO	CARACTERISTICAS INGENIERIA															
		Importancia Relativa	Rendimiento	Control	Alcalinidad	Temperatura	Oxigenación	PH	Compuestos nitrogenados	Sistema acoplado o desacoplado	Humedad relativa del sustrato	Intensidad lumínica	Nivel de agua	Total de solidos disueltos	Dureza	Dióxido de carbono	Dimensiones del sistema
Suministro de agua	7	3	6	9	3		3					9				6	3
Condiciones ambientales	8	9	3		9	6				3	9	3					6
Intensidad de cultivo	4	3	9	3	6	9	9	9	6				3			3	9
Caudal del agua	6	6			3	9	6	6					6			6	9
Volumen de air y/u oxígeno	7	3				6	6	6					3		3		6
Medición de variables	10	9	6	6	9	3	9	6	6	6	6	6	6			3	9
Alimentación peces	6	6	3		6		6	6					6				3

Fertilización	3	3		6		3						6	3			6
Perdidas por evaporación	4	3	6		3				6			9				3
Frecuencia de recirculación	7	6	6		3	9	9	6	6					3		3
Energía	10	3	9		6				9							9

En la Tabla 10 se muestran las alternativas seleccionadas (en azul) para la construcción del sistema acuapónico a pequeña escala. Esta tabla es el resultado de haber realizado la generación de alternativas y haber evaluado estas mismas por medio de una puntuación ponderada, la cual se definió a partir de lo encontrado en la literatura. En este caso se evaluaron los elementos de mayor importancia para un sistema acuapónico a pequeña escala y la selección es el resumen de la configuración que mejor desempeño permite para cada unidad del sistema. Para el caso de la superficie de siembra en la cual se evaluó: facilidad de instalación, dificultad de construcción, dificultad de mantenimiento, costo de adquisición y consumo de energía, se atribuyó un mayor peso ponderado a la dificultad de construcción y al consumo de energía obteniendo la cama de sustrato la más alta calificación en estos parámetros. En el caso de la geometría del tanque para el cultivo de peces, en la cual se evaluó: eficacia en la remoción de sólidos, dificultad de mantenimiento y homogeneidad en la calidad del agua, se atribuyó mayor peso ponderado a la eficacia en la remoción de sólidos, siendo el tanque de tipo circular el ideal para este tipo de aplicaciones. Esto debido a que esta geometría circular propicia la generación del movimiento de rotación primario en el agua, el cual causa que los sólidos se acumulen en el centro del tanque y sea mucho más fácil su extracción. En esta ocasión, aunque el tanque tipo circular fue el tipo de geometría elegido por su funcionalidad, se optó por usar un tanque tipo IBC de 1000L (de superficie cuadrada), por su facilidad de adquisición, precio, y el hecho de que se adapta más al volumen de agua requerido. Para el caso del tipo de sedimentador, en el cual se evaluó: costo de adquisición, eficiencia en sedimentación, dificultad de construcción y comodidad de mantenimiento, se eligió el sedimentador de tipo tabique debido a su bajo costo, comodidad de mantenimiento y eficiencia de sedimentación. Es muy importante aclarar que, aunque el sedimentador tipo radial es el que presenta mejor desempeño en sedimentación entre los evaluados, primó para esta aplicación en pequeña escala, el bajo costo y la comodidad de mantenimiento y sin embargo este sedimentador tipo tabique presenta un buen desempeño en la sedimentación de sólidos. Para el caso del sustrato del biofiltro, en el cual se evaluó: área de superficie, costo de adquisición y esperanza de vida útil, se eligieron los anillos cerámicos debido su gran área de superficie y costo moderado. Sin embargo, en medio del proceso de evaluación se evidenció que estos anillos se empezaron a obstruir rápidamente, lo cual impide el anclaje de las bacterias nitrificantes. Esto propició que, para continuar con el proceso, se optara por usar tapas de botella como sustrato del biofiltro debido a su fácil adquisición y buena flotabilidad. Además de ser bastante mencionadas en la literatura para sistemas acuapónicos a pequeña escala. Para el caso del sustrato de siembra, en el cual se evaluó: área de superficie, costo de adquisición, soporte de la planta, retención de agua y esperanza de vida útil, se eligió la piedra

volcánica debido a que brinda un muy buen soporte para las plantas, larga esperanza de vida útil y buena área de superficie. Sin embargo, en el proceso de construcción del sistema, se dificultó la adquisición de este tipo de piedra en el mercado, por lo cual se optó por conseguir piedra de río, la cual presenta cierta retención de agua y excelente soporte para las plantas.

Tabla 10 Alternativas seleccionadas para la construcción del sistema.

FUNCIONES	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4	ALTERNATIVA 5	ALTERNATIVA 6
SUPERFICIE DE SIEMBRA	CAMAS SUSTRATO	NFT	DWC			
TIPO DE TANQUE	CIRCULAR	RECTAGULAR	CUADRADO			
SEDIMENTADOR	DECANTACIÓN	TABIQUE	VÓRTICE	RADIAL		
SUSTRATO BIOFILTRO	BIOBALLS	ANILLOS CERAMICOS	TAPAS DE BOTELLAS DE PLÁSTICO			
SUSTRATO SIEMBRA	PIEDRA VOLCANICA (TOBA)	PIEDRA VOLCÁNICA (PÓMEZ)	PIEDRA CALIZA	ARCILLA EXPANDIDA (LEGA)	TAPAS DE BOTELLA PLÁSTICA	FIBRA DE COCO

En la Tabla 11 se observan los elementos seleccionados (azul y rojo) que permiten el correcto funcionamiento del sistema, entre ellos la medición de variables, el control, la automatización y la alimentación del sistema. Esta tabla es el resultado de una revisión bibliográfica detallada y de una evaluación por medio de puntuación ponderada en el caso de la medición de variables. Para la selección de las variables a medir en el sistema, se optó por elegir las más relevantes para un sistema acuapónico a pequeña escala, sin las cuales no se podría llevar un adecuado seguimiento del mismo, ni una automatización mínima viable. Se eligieron el pH, temperatura, luminosidad, humedad, TSD, nivel de agua y compuestos nitrogenados. Según la literatura, no es tan relevante medir el OD en un sistema a pequeña escala y es suficiente con hacer observaciones constantes del comportamiento de los peces [14, 15]. Además, medir este parámetro requiere de sensores de alto costo, lo cual imposibilita su adquisición para acoplarlo en el presente proyecto. Para el caso de la alcalinidad, se optó por no medirla para este sistema prototipo, dado que se estaría midiendo el pH constantemente, y que, según la literatura, el pH en este tipo de sistemas es bastante estable. En la tabla, las variables marcadas en azul son aquellas que se midieron por medio de sensores únicamente, a excepción del pH el cual se midió además con pruebas colorimétricas, para hacer una verificación más completa. Los compuestos nitrogenados (marcados en rojo), como la amonía, nitritos y nitratos, se midieron por medio de pruebas colorimétricas, dado que la existencia de sensores en el mercado para la medición de estos compuestos es casi nula. Únicamente poseen sensores para estas aplicaciones, empresas que se encargan de realizar sus propios desarrollos internos, dado que los sensores existentes para medir este tipo de

compuestos no poseen la resolución requerida para aplicaciones en acuaponía o acuicultura. Para el caso de los actuadores, se optó por elegir aquellos que permitían ejercer acción en respuesta a las variables medidas y procesos a automatizar en el sistema. El calentador de agua no se implementó, debido a que las condiciones ambientales del sitio de instalación del sistema (Santa Fe de Antioquia), propiciaban una temperatura adecuada en el agua de los peces. El sistema de control elegido fue el microcontrolador ARDUINO UNO, dado su excelente desempeño para este tipo de aplicaciones, posibilidad de interconexión con muchos dispositivos de entrada y de salida (GPIOs), capacidad de comunicación por medio de diferentes protocolos (I2C, SPI, ONE WIRE) y fácil acceso a documentación. El sistema de alimentación elegido fue por medio de adaptadores de voltaje, debido a su facilidad de adquisición en el mercado y bajo costo. Sin embargo, para este tipo de aplicaciones en las cuales se usan sensores analógicos, entre otros, es recomendable el uso de fuentes conmutadas, dada su alta estabilidad en la entrega de voltaje y corriente.

Tabla 11 Elementos seleccionados para el control y automatización del sistema

MEDICIÓN DE VARIABLES	PH	OD	TEMPERATURA	LUMINOSIDAD	HUMEDAD	ALCALINIDAD
	TSD	NIVEL	COMPUESTOS NITROGENADOS			
ACTUADORES	ELECTROVÁLVULAS	BOMBA DE AIRE	BOMBA DE AGUA	REGLETAS DE LEDS	CALENTADOR DE AGUA	DISPENSADOR DE ALIMENTOS
SISTEMA DE CONTROL Y PROCESAMIENTO	OMEGA	ARDUINO				
SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	ADAPTADORES	FUENTE CONMUTADA				

Diseño de prototipo mínimo viable con automatización, en pequeña escala

En las siguientes figuras se muestran dos etapas del diseño del sistema acuapónico en pequeña escala, además de imágenes reales que ayudan a evidenciar el proceso de construcción como resultado del diseño predefinido. En la Figura 8 se observa el primer diseño definido para construir el sistema acuapónico y la imagen real del sistema en construcción.



Figura 8 Primer diseño del sistema acuapónico y su construcción

En la Figura 9 se observan los planos superiores del diseño final del sistema acuapónico, en los cuales se observan los módulos principales que conforman la esencia del sistema (imagen superior) y los componentes integrados para la automatización del mismo (imagen inferior).

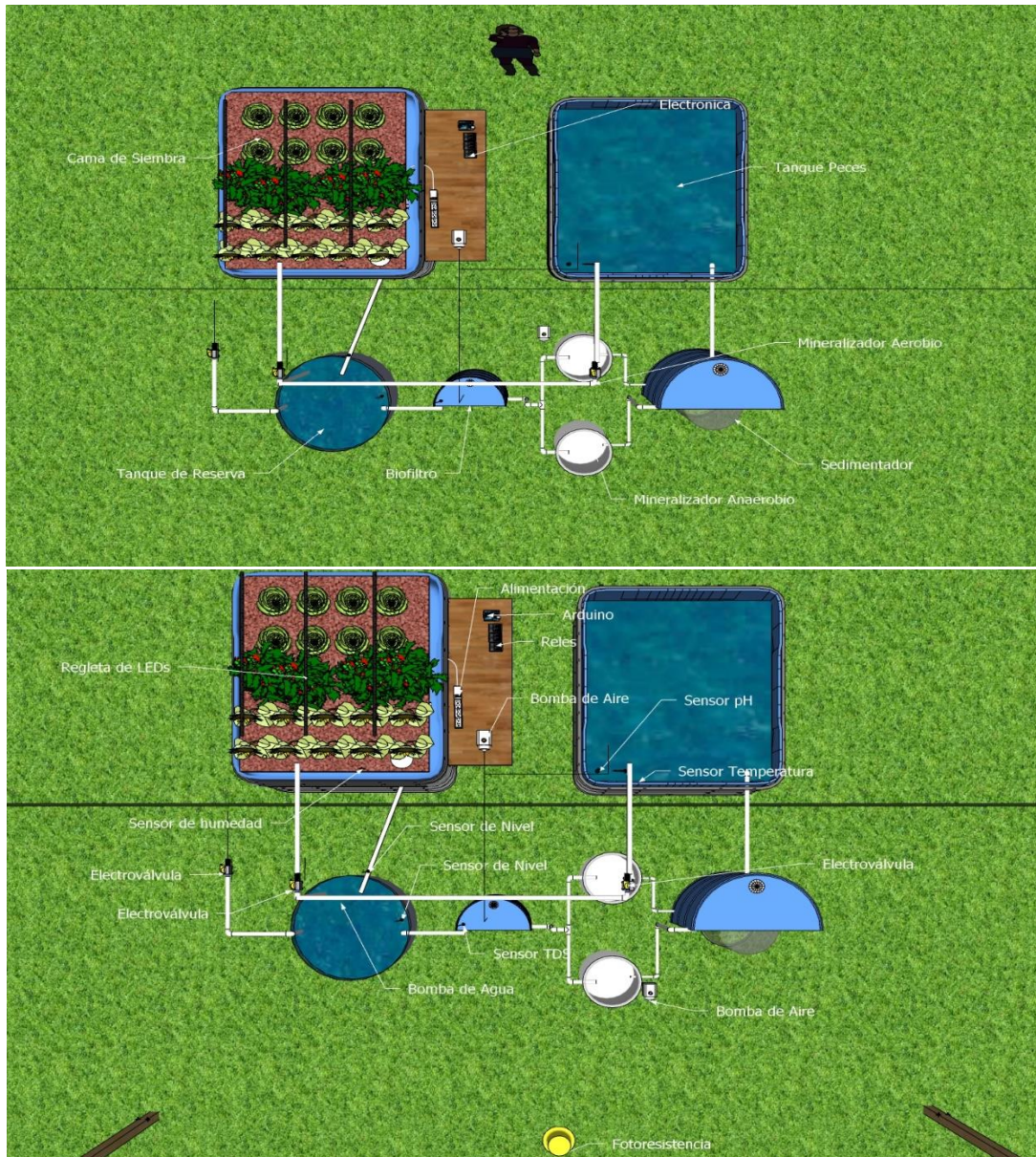


Figura 9 Módulos principales del sistema (superior) y componentes automatización (inferior).

En las imágenes que se observan a continuación (Figura 10 y Figura 11) se aprecia el diseño final del sistema. En estas se cuenta con una mejor perspectiva para apreciar los componentes que lo conforman. Además, se muestra la imagen real del sistema después de su construcción total.



Figura 10 Diseño final del sistema acuapónico



Figura 11 Construcción total del sistema acuapónico

En la Figura 12, se muestran cada uno de los módulos del sistema, después del proceso de construcción total.



Figura 12 Módulos del sistema. Cifón cama de siembra (A), mineralizador aeróbico (B), tanque peces (C), biofiltro (D), mineralizador anaeróbico (E), sedimentador (F), tanque reserva (G) y cama de siembra (H)

Evaluación del prototipo en funcionamiento

Durante la construcción, puesta en marcha, y evaluación del prototipo se dieron dos momentos principales. El primero (llamado etapa 1), es el concerniente al sistema básico como el que se muestra en la figura 8, en el cual están todos los módulos del sistema básico (tanque peces, sedimentador, biofiltro, tanque reserva, y cama de siembra). Sin embargo, a medida que se fue evaluando su desempeño, fue evidente la falta de algunos complementos para mejorar su funcionamiento. Uno de estos y el más importante fue el biofiltro, el cual no

tenía integrado un sustrato adecuado para el anclaje de bacterias nitrificantes, ni la cantidad de sustrato necesario que proporcionara un área de superficie adecuada para estas bacterias. Por otro lado, se añadieron los módulos de mineralización, a través de los cuales es posible aprovechar al máximo los desechos de los peces, que no se alcanzan a convertir en el biofiltro y convertirlos por medio de bacterias heterotróficas en nutrientes que complementan el espectro nutricional de las plantas. Al sistema resultante de hacer estas dos mejoras se le llama etapa 2.

Mediciones de compuestos nitrogenados y pH, por colorimetría

En la Figura 13 se observan las mediciones de compuestos nitrogenados realizadas al sistema durante la etapa 1. En este gráfico es posible entender cómo se fueron desempeñando las bacterias nitrificantes en el biofiltro y en la cama de siembra (en la cual también hay cierta nitrificación). Se evidencia como la amoníaco es el primer compuesto en hacer presencia en el sistema, dado que es proveniente de los desechos de los peces. Esta presenta sus mayores concentraciones, tóxicas para los peces, entre los días 15 y 30, comenzando a disminuir su concentración a partir del día 30. De ahí en adelante fluctúa un poco por problemas de recirculación causados por fallas en la automatización, las cuales se fueron mejorando y se mantuvo en valores aún elevados (1 – 2 mg/L) hasta culminar los primeros 5 meses de evaluación. Con respecto a los nitritos, se observa como estos conservaron valores bajos de concentración, que sin embargo no son los deseados (0mg/L). Esto ocurrió a partir del día 20 en adelante, en el cual aparecieron los nitritos por primera vez y comenzaron a disminuir un poco su concentración. Con respecto a los nitratos, se evidencia como estos fueron aumentando su concentración, alcanzando valores de hasta 10mg/L, incluso 20mg/L en una de las mediciones, esto a partir del día 50 en adelante. Sin embargo, estos valores no son los esperados para un sistema acuapónico (100mg/L) dado que no son suficientes para una nutrición completa que permita un desarrollo adecuado de las plantas. Este desempeño observado en el sistema, en el cual no se evidencia buen funcionamiento del biofiltro, es debido, a la falta de un sustrato adecuado, como se mencionó anteriormente. En primera instancia, el sustrato que se integró al sistema fueron los anillos cerámicos. Estos se saturaban rápidamente, por lo cual no permitían el anclaje de las bacterias nitrificantes y además la cantidad de sustrato no era la adecuada. Con respecto al comportamiento del pH, el cual se observa en la Figura 14, se evidencia como este fue bastante elevado durante los primeros 2 meses y demoró en estabilizarse alrededor de 2,5 meses a valores que aún no eran los esperados para sistemas acuapónicos (pH 6,5 - 7). Este comportamiento del pH se debe a que las bacterias nitrificantes no estaban en suficientes concentraciones, ni tenían el ambiente propicio para desempeñarse, como se mencionó anteriormente, por lo cual no se logró sacar el máximo provecho del proceso de nitrificación el cual acidifica el pH del agua y la mantiene en valores más estables.

Corrección sustrato del biofiltro

Como solución a la problemática mencionada sobre el biofiltro, se optó sustituir los anillos cerámicos por tapas de envases plásticos de bebida, las cuales propician buen anclaje para las bacterias nitrificantes, buena área de superficie y su adquisición es bastante fácil.

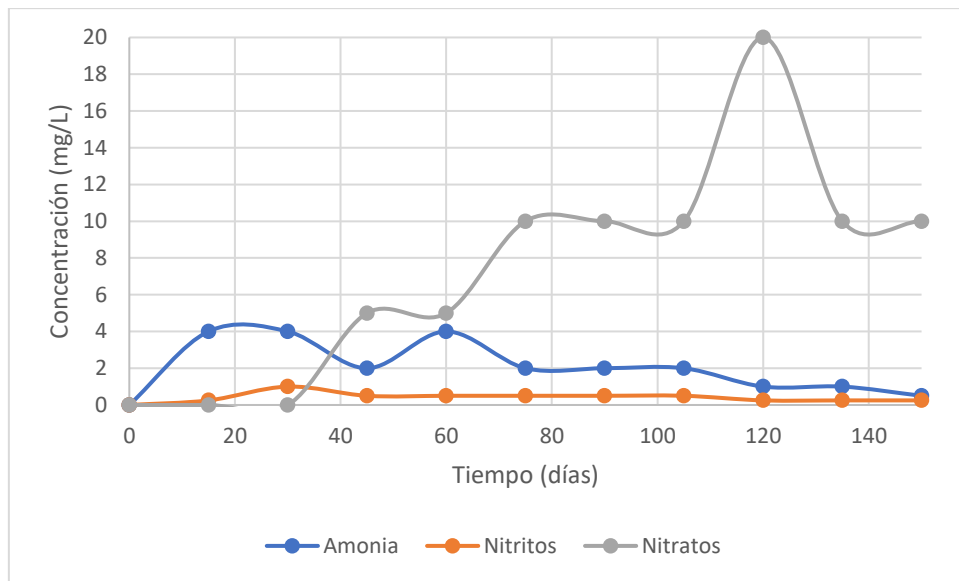


Figura 13 Mediciones de compuestos nitrogenados primera etapa.

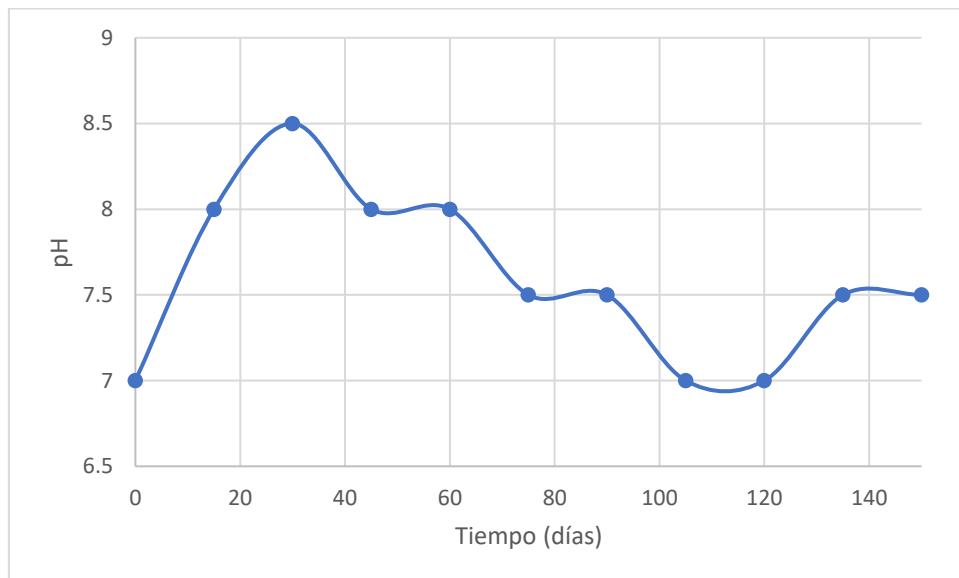


Figura 14 Mediciones de pH primera etapa.

En las Figura 15 y Figura 16 se observa cómo después de integrar un mejor sustrato al biofiltro (etapa 2), el desempeño de las bacterias nitrificantes mejoró, provocando esto que tanto amonia, como nitritos disminuyeran su concentración a valores muy cercanos a 0mg/L, lo cual evidencia que ambos compuestos estaban siendo transformados de manera correcta por dichas bacterias. Por otro lado, la concentración de nitratos aumento a valores de 40mg/L, lo cual fue más conveniente para el desarrollo de las plantas y corrobora el hecho que tanto amonia y nitritos se estaban transformando hasta convertirse en nitratos. Además, se observa como el pH se mantuvo en valores más estables y cercanos a los esperados para un sistema acuapónico, lo cual reafirma un mejor desempeño de las bacterias nitrificantes.

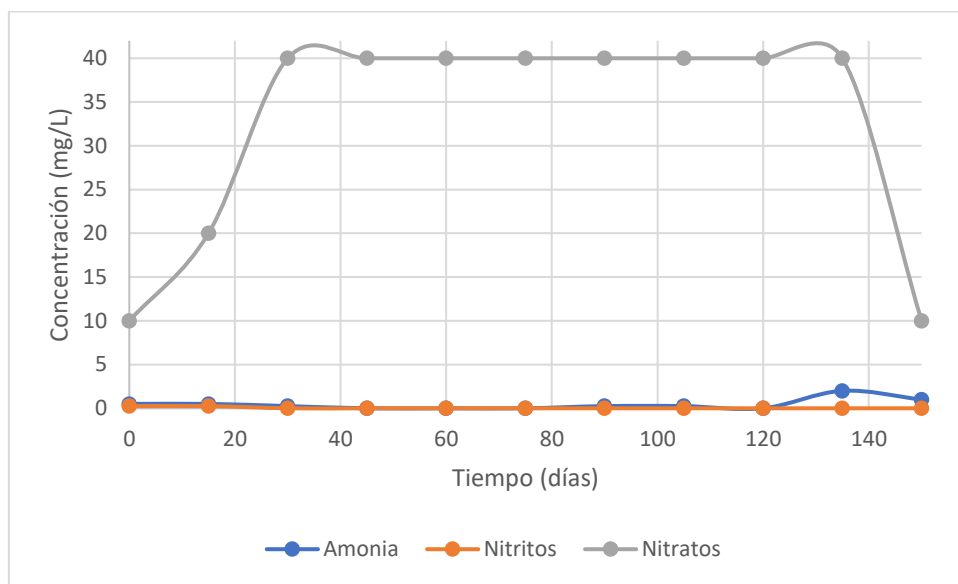


Figura 15 Mediciones de compuestos nitrogenados, segunda etapa.

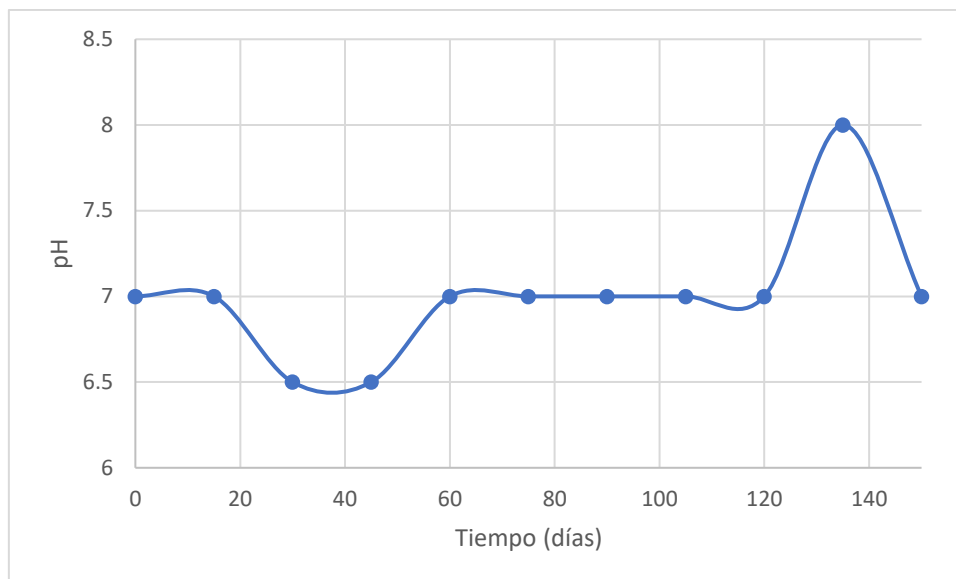


Figura 16 Mediciones de pH, segunda etapa.

Evaluación del desarrollo de plantas

En la Figura 17 se observa la cama de siembra con sus respectivas plantas sembradas, las cuales fueron: albahaca, sandía, tomate perla, fresa, orégano, maracuyá, ají y cebollín. Estas tuvieron un desarrollo relativamente lento, sin embargo, algunas de ellas dieron cosecha como el ají, el tomate perla, la albahaca y el cebollín. Su crecimiento hasta el momento de cosecha demoró alrededor de 4 meses, como es en el caso del tomate perla y el ají, las cuales dieron abundante fruto, sin embargo, fueron de las únicas plantas que dieron cosecha además del cebollín y la albahaca como se ilustra en la Figura 19. En la Figura 18 se observa una imagen que ilustra la cama de siembra y las plantas después de un periodo de crecimiento de 4 meses.



Figura 17 Siembra de plantas primera etapa.



Figura 18 Desarrollo de plantas 4 meses posteriores a la siembra, primera etapa.

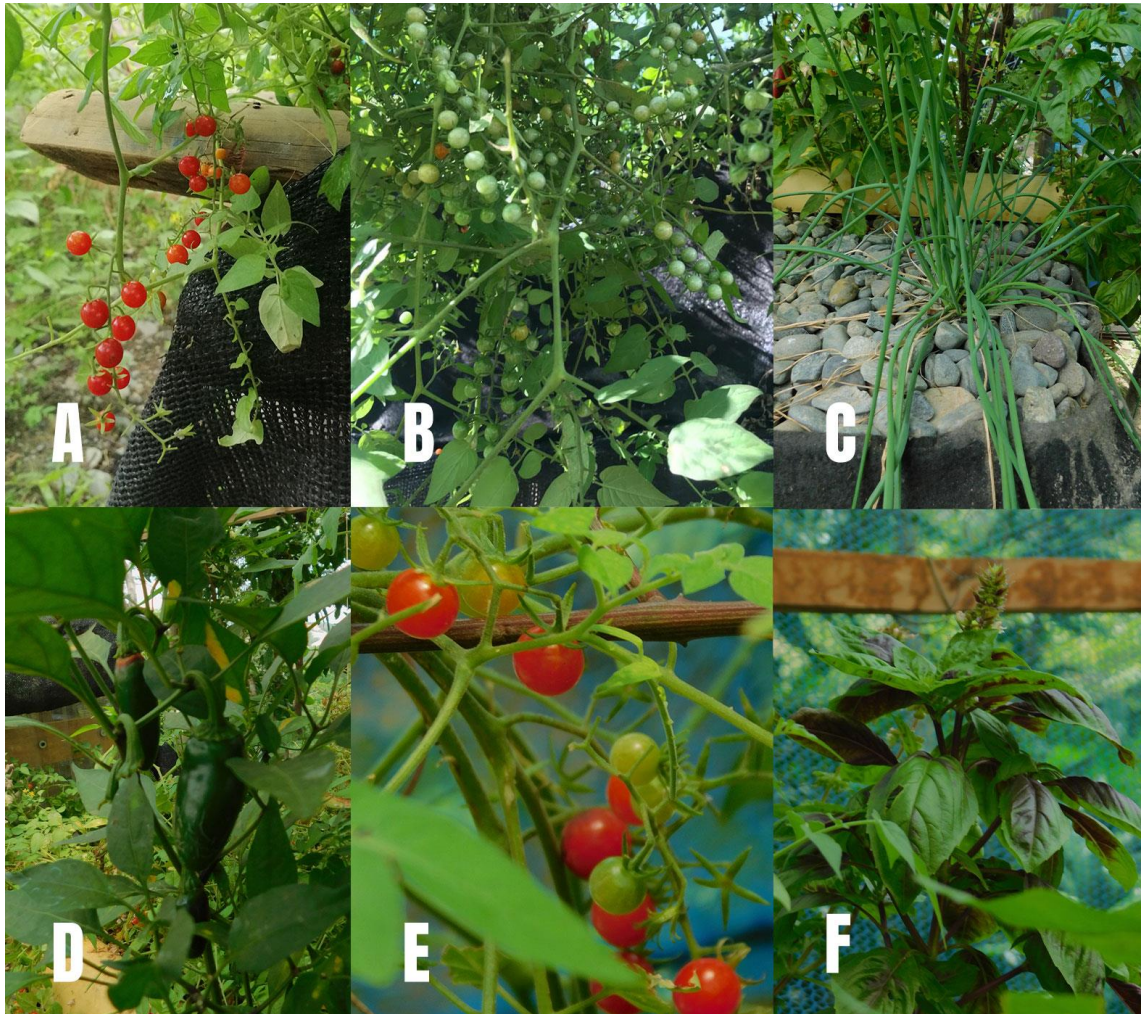


Figura 19 Frutos del sistema acuapónico primera etapa, tomate perla (A, B y E), cebollín (C), ají (D), albahaca (F).

Posterior a cosechar los frutos producidos por el sistema acuapónico que se muestran en la Figura 19 y una vez terminado el periodo de cosecha, se optó por implementar las mejoras que se explicaron anteriormente (etapa 2), en las cuales se mejoró el biofiltro y se instalaron 2 módulos de mineralización: aeróbica y anaeróbica, con los cuales es posible sacar provecho al máximo de los desechos de los peces y aumentar la cantidad y variedad de nutrientes, además de los minerales que se le brindan a las plantas. Terminadas estas mejoras, se optó por podar y extraer las plantas existentes en la cama de siembra para así poder sembrar nuevas plantas. Únicamente se dejó en la cama de siembra, la planta de maracuyá, el cebollín y la fresa; el resto de las plantas se extrajeron de raíz y se sembraron las siguientes plantas: papayo, tomate perla, fruta del dragón y pepino, como se observa en la Figura 20



Figura 20 Siembra de plantas, segunda etapa.

En la Figura 21(superior) se observan las plantas en la segunda etapa, después de un periodo de 20 días a partir de su siembra. En esta se observa, el desarrollo del papayo el cual está un poco más alto; el pepino con hojas y ramificaciones extensas; el cebollín, la fresa, la fruta del dragón, y el tomate perla, los cuales tienen un desarrollo lento; y el maracuyá la cual muestra mayor desarrollo desde que se implementó la mejora de la segunda etapa: esta no había tenido un desarrollo superior a 20cm, mientras en la imagen se observan ramificaciones extensas que incluso parten hacia la parte posterior del sistema. Pasado un mes y medio las plantas se veían como en la Figura 21(inferior), en la cual se observa como el papayo creció hasta tener un tallo de aproximadamente 5cm de diámetro y una altura de 1,2m; la maracuyá continuó su desarrollo hacia la parte posterior del sistema; el cebollín en constante producción; la fruta del dragón y el tomate perla en crecimiento; y el gran desarrollo del pepino, el cual tuvo un extenso crecimiento de ramificaciones y hoja, además de una abundante producción de fruto. Sin embargo, debido a un problema en el sistema de automatización que se explica posteriormente, el agua se estancó en la cama de siembra y provocó la muerte de varias plantas.



Figura 21 Plantas sembradas segunda etapa, 20 días después (superior): pepino (A), fresa (B), cebollín (C), fruta del dragón (D), tomate perla (E), papayo (F) y maracuyá (G) y 2 meses después (inferior).

Evaluación de la automatización

El sistema de automatización del prototipo acuapónico a pequeña escala fue evaluado mediante un seguimiento minucioso, en el cual se hicieron observaciones semanalmente, para así verificar su correcto funcionamiento o, por el contrario, hacer las correcciones pertinentes.

Sistema de control

El sistema de control es el ilustrado en la Figura 22. En esta se observa el microcontrolador Arduino UNO, los relés, el circuito de interconexión de sensores y actuadores y el microprocesador Omega Onion. Este sistema de control se desempeñó de manera correcta y únicamente fueron necesarias ciertas correcciones con respecto a estabilización de señales y correcciones en el programa de ejecución, las cuales se realizaron continuamente para garantizar cada vez un funcionamiento mejor del mismo. La comunicación con los actuadores se realizó sin problema alguno y su desempeño con respecto al hardware, fue el esperado en todo momento, es decir, las señales enviadas a cada actuador generaban la acción debida, sin ninguna interrupción. Además, la cantidad de pines digitales del microcontrolador Arduino UNO fue suficiente para ejercer control sobre cada uno de los actuadores. Se usaron algunos protocolos de comunicación del microcontrolador, cómo One Wire y UART, y ambos funcionaron sin problema alguno. La lectura de señales analógicas desde los diferentes sensores, mediante los puertos de conversión analógico-digitales (ADC), fue también exitosa en todo momento, es decir, se logró hacer mediciones sin interrupciones. Además, la comunicación serial con el entorno de programación para la visualización de variables y posteriormente con el microprocesador Omega Onion fue exitosa en todo momento, lo cual se evidencia en la Figura 19, en la cual se observa los datos recibidos en la base de datos por comunicación serial, entre el Arduino y el Omega. Todo esto entrega una excelente perspectiva del microcontrolador Arduino Uno para este tipo de aplicaciones, pues su funcionamiento permitió el control del sistema acuapónico en todo momento.

Sensores

Sensor de humedad

Esta variable fue inicialmente medida mediante un sensor conductivo, el cual únicamente mostró un correcto desempeño durante los primeros 5 días, al término de los cuales el sensor comenzó a oxidarse en sus terminales de medición, lo cual fue afectando la señal entregada, al punto de no presentar respuesta lógica alguna. Es posible que la causa de esta oxidación se deba a la conducción de corriente por las terminales de medición lo cual desencadenaría

una reacción química de oxidación del metal, pero es algo que falta ser estudiado con mayor profundidad.

Una vez identificado este problema con el sensor conductivo, se optó por implementar un sensor de humedad de tipo capacitivo, los cuales no presentan problemas de oxidación [33]. Este sensor fue el SEN0193 (Figura 23), el cual se instaló con una serie de recubrimientos que permitieran retener la humedad de forma semejante a las piedras de la cama de siembra y que por medio de estos recubrimientos el sensor tuviera presencia de humedad a lo largo de su superficie de medición. El material de estos recubrimientos fue variando a medida que el sensor fue mostrando variaciones un poco incorrectas en ciertos momentos, aclarando que el sensor sin recubrimientos funcionaba perfectamente en otro tipo de entornos como la tierra y el agua. Los materiales que se usaron inicialmente fueron espuma de poliuretano y diferentes tipos de tela de algodón, los cuales se usaron de forma independiente, sin éxito alguno. Cuando se recubrió con tela de algodón y se introdujo en un recipiente de PVC (al cual se le realizaron perforaciones), su desempeño mejoró y mostró mediciones correctas durante dos meses; aunque presentara cierta disminución en la velocidad de respuesta, cuando la cama de siembra permanecía llena de agua durante un largo tiempo, debido a pruebas que se estuvieran desarrollando en el sistema. Luego en intención de mejorar el problema anterior, se optó por recubrir el sensor con arena y el mismo recipiente de PVC perforado, de forma que el sensor quedara embebido entre la arena y el recipiente. Esta configuración permitió que el sensor no volviera a presentar retrasos en la respuesta y funcionó correctamente durante 1 mes, al término del cual falló por completo, generando una señal aleatoria, la cual produjo que el umbral de humedad programado se sobrepasara continuamente y se diera la orden al sistema de control de llenar la cama de siembra. Esta serie de sucesos provocó que el sistema no tuviera tiempo alguno de reponer agua en el tanque de reserva, y debido a la evaporación de esta, este tanque se secó por completo. Esto ocasionó, que el agua que en cierto momento quedó remanente en la cama de siembra, permaneciera estancada durante 7 días, pudriendo de esta forma las raíces de la mayoría de las plantas y ocasionando su muerte, como se mencionó anteriormente y se observa en la Figura 21. La falla de este sensor se atribuye a la posible intrusión de agua en su circuito electrónico, el cual se había recubierto manualmente con una resina, para evitar este problema.

Sensor de pH

El sensor de pH implementado es el ilustrado en la Figura 24 (SEN0169). Este sensor fue calibrado mediante soluciones buffer de pH 4 y 10, valores que en repetidas ocasiones el sensor indicaba cuando usaron dichas soluciones nuevamente. Su señal fue acondicionada y después procesada, teniendo en cuenta la compensación por temperatura pertinente para este caso. El sensor después de su calibración evidenció un comportamiento bastante estable, sus mediciones se fueron visualizando por medio de la base de datos creada en el microprocesador Omega Onion, y se compararon sus resultados con las mediciones hechas

por colorimetría. La Figura 25 ilustra la tabla donde se fueron registrando las variables medidas de todos los sensores y algunos indicadores necesarios.

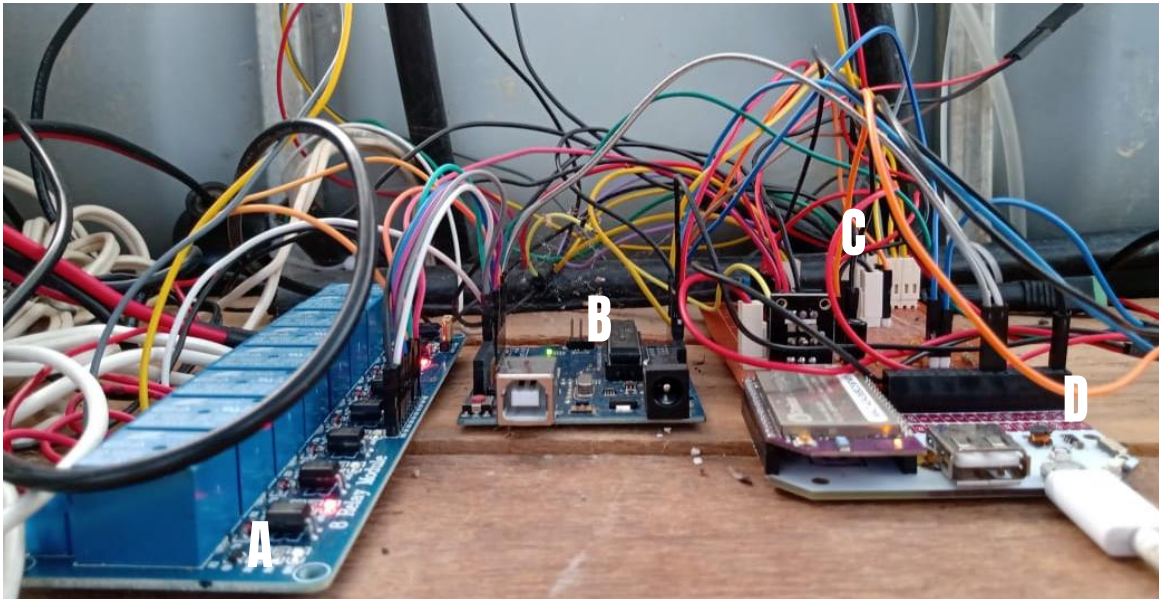


Figura 22 Sistema de control prototipo acuapónico y demás componentes de interconexión: Relés (A), Arduino UNO (B), circuito de interconexión(C), Omega Onion (D).



Figura 23 Sensor de humedad implementado en el sistema acuapónico (SEN0193).



Figura 24 Sensor de pH implementado (SEN0169).

16:15

192.168.3.1/adminer/?server=

variables LIMIT 50 OFFSET 100 (0.004 s) Bearbeiten

id	datetime	ph	temperatura	brillo	humedad	plantas	cifon	reserva
2388	2020-06-15 21:25:48	6.25	25.81	856	258	0	543	1023
2389	2020-06-15 21:25:57	6.61	25.75	850	259	0	543	1023
2390	2020-06-15 21:26:06	6.71	25.75	880	258	0	543	1023
2391	2020-06-15 21:26:15	6.18	25.75	838	258	0	543	1023
2392	2020-06-15 21:26:24	6.42	25.75	851	259	0	543	1023
2393	2020-06-15 21:26:33	6.68	25.75	845	258	0	543	1023
2394	2020-06-15 21:26:42	6.41	25.75	841	259	0	543	1023
2395	2020-06-15 21:26:51	6.11	25.75	843	258	0	543	1023
2396	2020-06-15 21:27:00	6.74	25.75	866	259	0	543	1023

Figura 25 Tabla de base de datos implementada en Omega Onion para la visualización de variables medidas.

Sensor de nivel

Para medir esta variable la cual se monitoreó en dos puntos del sistema y para dos propósitos diferentes, se utilizaron sensores ópticos de nivel tipo switch, los cuales detectan la presencia y la ausencia de líquido en el entorno en el cual se encuentran. Ambos sensores, el instalado en el tanque de reserva y el instalado en el conducto que baja del sifón de la cama siembra, se comportaron de manera bastante estable, indicando de manera instantánea y oportuna el momento exacto en el que estaban en presencia o ausencia de líquido, lo cual permitió ejercer un correcto control sobre la reposición del tanque de reserva y el vaciado de la cama de siembra, en la Figura 26 se muestra la instalación de estos sensores.



Figura 26 Sensor de nivel óptico implementado (FS-IR02), en la imagen derecha se muestra el lugar en el cual los sensores de nivel fueron instalados (Tanque de reserva (1) y salida de cama de siembra (2)).

Sensor de temperatura

El sensor de temperatura implementado fue el DS18B20, el cual se muestra en la Figura 27. La señal de este sensor fue adquirida mediante el protocolo One Wire, el cual permitió una transmisión exitosa durante todo el funcionamiento del sistema. Este sensor permitió estar monitoreando continuamente la temperatura del agua de los peces, lo cual permitió alimentarlos de manera oportuna, es decir cuando la temperatura fuera mayor a 25°C que es cuando estos peces están más activos. Además, la medición de esta variable permitió hacer la compensación por temperatura en el sensor de pH. Algunas de las mediciones de temperatura realizadas mediante este sensor, se observan en la Figura 25.



Figura 27 Sensor de temperatura implementado (DS18B20).

Sensor de TSD

El sensor de TSD implementado fue el SEN0244, el cual se muestra en la Figura 28. Este sensor fue calibrado mediante una solución buffer de 707ppm y mostró una medición muy estable de los TSD del sistema acuapónico medidos en el biofiltro, como se muestra en la figura. El TSD del sistema oscilo entre los 70 a 140ppm lo cual muestra una deficiencia de nutrientes, para un sistema que debería estar alrededor de los 200 a 400ppm. Esto es debido probablemente a la cantidad insuficiente de aire en el biofiltro, lo cual provoca que las bacterias nitrificantes no se desempeñen de manera correcta. Esto corrobora las mediciones colorimétricas de nitratos analizadas anteriormente, las cuales tampoco están en el nivel deseado para un sistema acuapónico (100ppm).



Figura 28 Sensor de TSD implementado (SEN0244).

Sensor de luminosidad (fotorresistencia)

Para medir la cantidad de luz en el ambiente de la cama de siembra, se implementó una fotorresistencia, la cual permitió que el sistema de control identificara el momento en el cual la luz del sol se reducía a niveles bajos (oscuridad) y así encender luz artificial durante 2 horas para las plantas. Este sensor se desempeñó de manera correcta y siempre entregó una señal oportuna para generar la respuesta pertinente.

Actuadores

Electroválvulas

Las electroválvulas instaladas en el sistema fueron de tipo solenoide y se ubicaron como se muestra en la Figura 29. Estas se desempeñaron correctamente los primeros 5 meses, permitiendo recircular el agua de los peces cada que el sistema de control lo indicaba según las horas programadas, permitiendo el paso de agua hacia la cama de siembra cada que el sensor de humedad lo indicaba y reponiendo agua al tanque de reserva cada que el sensor de nivel en este lo indicaba. Al termino de estos 5 meses, las electroválvulas que estaban ubicadas en los ductos conductores a la cama de las plantas y al tanque de los peces, comenzaron a fallar debido a una obstrucción que se formaba internamente por una especie de lama presente en el agua del sistema. Estas electroválvulas fallaron a tal punto, de restringir el paso del agua hasta que el caudal fuera casi un 10% del emitido por la bomba de agua.

Corrección a electroválvulas

Para solucionar el problema de las electroválvulas se optó por reemplazarlas por 2 bombas de agua independientes, cada una para cada unidad por separado, una para la cama de siembra y otra para el tanque de los peces. La electroválvula presente en el ducto conductor hacia el tanque de reserva no falló posiblemente debido a que la presión proveniente de la red de suministro de agua de la zona es mayor que la de la bomba del sistema y no permite que se formen este tipo de obstrucciones.



Figura 29 Electroválvulas instaladas en el sistema.

Alimentador de peces

Con el fin de proveer comida a los peces en el momento indicado, se decide instalar un alimentador automático, el cual usa un tornillo sin fin, que es movido por un motor paso a paso y permite mover la comida en el interior de un tubo de PVC, hacia el tanque de los peces. Este sistema se presenta en la Figura 30. El mecanismo no se logró poner en funcionamiento de forma adecuada, debido a que el motor requería una corriente alta (aprox. mayor a 3 amperios) en el momento de estar completamente cargado y el tornillo exigía una gran cantidad de trabajo. Además, las aspas del mismo generaban fricción y aumentaba el trabajo necesario del sistema, por lo que en términos de costo energético para la fuente de alimentación era imposible en ocasiones mover el sistema, haciendo que se parara y no alimentara adecuadamente los peces. Debido a esto se hizo inviable para el proyecto, dado que no se puede suspender la alimentación de los peces.

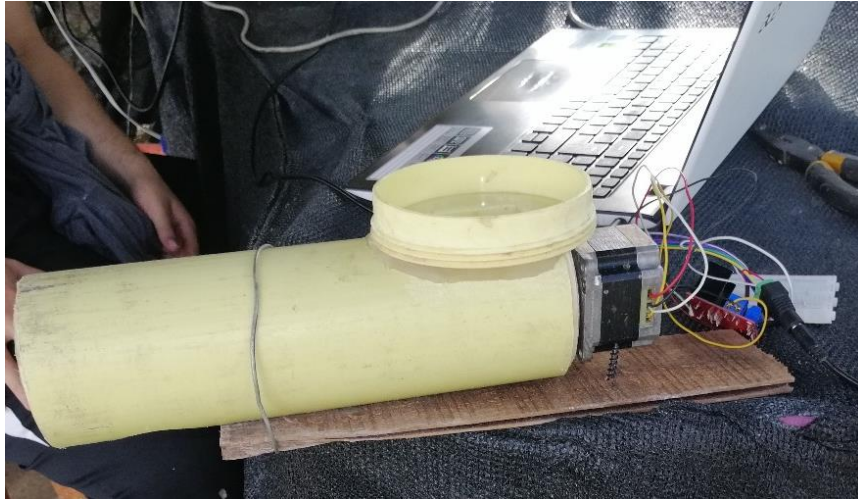


Figura 30 Alimentador de peces

Bombas de aire y agua

Estos dispositivos permitieron conducir el agua del sistema y llevar aire al tanque de peces y biofiltro. Su control mediante el sistema embebido se ejerció de manera correcta y su desempeño siempre fue el correcto.

Regleta de LEDs

Estos dispositivos permitieron iluminar la cama de las plantas mediante la señal generada por la fotorresistencia. Se desempeñaron de manera correcta, encendiendo diariamente durante 2 horas, a partir de las 6 pm aproximadamente, cuando se reducía la luz natural del día. En la Figura 31 se observan estas regletas en funcionamiento durante la noche.



Figura 31 Sistema iluminado por regleta de LEDs.

CONCLUSIONES

Gracias al desarrollo de este proyecto fue posible identificar los principales requerimientos de un sistema acuapónico a pequeña escala, listados a continuación: el caudal de agua; el aire u oxígeno; las condiciones mínimas para una adecuada biofiltración; las condiciones ambientales; la intensidad de cultivo; la selección de geometrías para la construcción, que ayuden al manejo de desechos; el monitoreo continuo de variables de interés, al igual que la constante observación; la energía y la selección de una adecuada técnica de siembra. Además, se identifican como las principales variables a medir en un sistema acuapónico a pequeña escala, que permiten un desempeño exitoso: el pH, los compuestos nitrogenados (amonía, nitritos, nitratos) y temperatura del agua, sin los cuales no es posible entender y evaluar el desempeño de estos sistemas.

Los elementos que permiten una automatización mínima viable de este sistema acuapónico a pequeña escala son: el microcontrolador Arduino UNO; relés electromecánicos; sensores de: pH, TDS, temperatura, luminosidad, nivel y humedad de suelo; actuadores como: bombas de agua, bombas de aire y regleta de LEDs y fuente de energía mediante adaptadores de voltaje, con su respectivo desacople. No se recomienda el uso de electroválvulas tipo solenoide como las aquí usadas, para aplicaciones en acuaponía, debido a que se obstruyen fácilmente e impiden una correcta automatización y desempeño de estos sistemas. Además, se sugiere ampliar la documentación sobre el sensor SEN0193, para entender cuáles son sus posibles causas de falla, si es factible adaptarlo para medir humedad en camas de sustrato en acuaponía o en su defecto, buscar otro tipo de sensor para este tipo de aplicaciones. Finalmente se recomienda que, para funciones altamente importantes en el sistema automatizado, se cuente con un sistema que opere como alternativa de seguridad e impida que ciertas dependencias puedan causar errores lamentables en el sistema. Además, se propone para futuros proyectos, acoplar un sistema de batería al microcontrolador Arduino UNO, dado que si se precisa de un control por hora para ciertos procesos como fue en el caso del presente proyecto, la hora del microcontrolador se descuadrará. Otra opción, es implementar un Reloj en tiempo real o RTC por sus siglas en inglés, el cual tenga su propia batería y actualice la hora del microcontrolador constantemente. En cuanto al alimentador de los peces se recomienda para futuros proyectos construir un tornillo sin fin prolijo el cual no genere alta resistencia y facilite el movimiento del mismo por el motor. Adicionalmente, se sugiere plantear un sistema con una alimentación de mayor potencia.

Es de suma importancia entender las condiciones mínimas de funcionamiento de un biofiltro, dado que es el módulo en el cual ocurren los procesos esenciales de un sistema acuapónico y sin este no se da un buen desarrollo de plantas, ni una adecuada calidad del agua para los peces y bacterias. Un biofiltro necesita primordialmente la cantidad de aire suficiente que permita el desarrollo de las bacterias nitrificantes, además de un sustrato que permita un área de superficie suficiente, un buen anclaje para bacterias y un práctico mantenimiento. Por otro

lado, es importante destacar el gran aporte nutricional ofrecido por los módulos de mineralización, cuando son implementados en un sistema acuapónico, dado que el desarrollo de las plantas es notoriamente mejor.

REFERENCIAS

- [1] “Recuadro 2: Coyuntura del sector agropecuario colombiano | Banco de la República (banco central de Colombia).” [En línea]. Disponible: <https://www.banrep.gov.co/es/recuadro-2-coyuntura-del-sector-agropecuario-colombiano>. [Accedido: 09-Abr-2020].
- [2] J. Pastor Mogollón, M. Carolina Vera, and A. Martínez, “Efecto de los plaguicidas sobre la calidad química y biológica del suelo en sistemas de producción de hortalizas del semiárido venezolano.,” Universidad de Buenos Aires, 2015.
- [3] “Deterioro del suelo en Colombia - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com.” [En línea]. Disponible: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15313755>. [Accedido: 09-Abr-2020].
- [4] “Rentabilidad, empleo e infraestructura, principales retos para el agro colombiano en 2020 - Valora Analitik.” [En línea]. Disponible: <https://www.valoraanalitik.com/2020/01/14/rentabilidad-empleo-e-infraestructura-principales-retos-para-el-agro-colombiano-en-2020/>. [Accedido: 09-Abr-2020].
- [5] C. A. Condiza, “república de colombia ministerio de agricultura programa nacional de transferencia de tecnología agropecuaria pronatta agricultura sostenible sena fundación integración campesina servicio nacional de aprendizaje ‘pinte c’ ‘s e n a.’”
- [6] “Cada gota cuenta | FAO Stories | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.” [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1113809/>. [Accedido: 09-Abr-2020].
- [7] D. C. Love, M. S. Uhl, and L. Genello, “Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States,” *Aquac. Eng.*, vol. 68, pp. 19–27, 2015.
- [8] M. Gómez and C. Mónica, “*ACUAPONÍA Herramienta de formación en tiempos de paz*”. Cundinamarca, 2019.
- [9] J. L. Elías, “La producción hidropónica de cultivos.” [En línea]. Disponible: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292018000200139. [Accedido: 09-Abr-2020].
- [10] “Acuicultura | FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.” [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/aquaculture/es/>. [Accedido: 09-Abr-2020].
- [11] V. V. Jorge Cuéllar-Anjel, “(PDF) Manual de Buenas Prácticas de Manejo para la Piscicultura en Agua Dulce.” [En línea]. Disponible:

https://www.researchgate.net/publication/322498075_Manual_de_Buenas_Practicas_de_Manejo_para_la_Piscicultura_en_Agua_Dulce. [Accedido: 09-Abr-2020].

- [12] I. R. Steven, R. Patiño, I. Jonnathan, and I. Reyes Suarez, “DISEÑO AUTOMATICO PARA SISTEMA SOSTENIBLE DE ACUAPONIA PROPONENTES.”
- [13] Rosario Martínez-Yáñez, “(PDF) Puntos críticos de control en sistemas acuapónicos,” Mar-2014. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/261064366_Puntos_criticos_de_control_en_sistemas_acuaponicos. [Accedido: 09-Apr-2020].
- [14] Timmons, M., Guerdat, T. and Vinci, B., n.d. “*Recirculating Aquaculture*”.
- [15] Somerville, C., 2015. “*Small-Scale Aquaponic Food Production*”. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [16] Candarle, P., n.d. *Técnicas De Acuaponia*. 1st ed. Centro Nacional de Desarrollo Acuícola (CENADAC), Dirección de acuicultura., p.47.
- [17] Lobillo Eguívar, P., Fernández Cabanás, V., Blanco Cabrera, J., Ponce Nieto, A., Quevedo Ruiz, J., Selma González, J., Luque López, C. and López Jaime, J., 2020. “*GUÍA ACUAPÓNICA: PASO A PASO*”. 1st ed. Sevilla: VERDES del SUR, p.42.
- [18] Vidal-Martínez, V.M., M.A. Olvera-Novoa, V. Morales, J. Cuéllar-Anjel, A. Riofrío, R. Morales, M.C. Chávez, O. García, L. Montoya y P. Barato. 2017. “*Manual de Buenas Prácticas de Manejo para la Piscicultura en Agua Dulce*”. OIRSAOSPESCA, C.A. pp. 145.
- [19] M.A. Colorado Gómez, M.O. Correa, 2019. “*La acuaponía como herramienta de formación en tiempos de paz*. Cundinamarca: SENA”. p.66.
- [20] Gonzales Ros, A., 2019. “*Manual Descriptivo De Sistemas Acuaponicos*. Chapingo: AGRONOMÍA EN HORTICULTURA PROTEGIDA”, p.28.
- [21] Lapuente Solórzano, V. (2015). “control y monitorización de un acuario en tiempo real mediante tecnología open source”. Retrieved 17 June 2020, from <https://zaguan.unizar.es/record/37185/files/TAZ-PFC-2015-154.pdf>.
- [22] Beltrano, J. and Gimenez, D., 2015. “*Cultivo En Hidroponía*”. La Plata: D - Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- [23] Shaxson, F., & Barber, R. (2005). “*Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal*”. Roma: FAO.
- [24] Zotarelli, L., Dukes, M., & Morgan, K. (2013). ”Interpretación del Contenido de la Humedad del Suelo para Determinar Capacidad de Campo y Evitar Riego Excesivo en Suelos Arenosos Utilizando Sensores de Humedad”. *Agricultural And Biological Engineering*. Retrieved from <https://edis.ifas.ufl.edu/pdf/AE/AE49600.pdf>.
- [25] D. Castro et al., “cultivos y producción de plantas aromáticas y medicinales,” Rionegro.
- [26] M.C. Antonio CANO P. and M.C. E. Edith VILLAVICENCIO G., “Producción de planta.”
- [27] J. J. Quintero, “CULTIVO DEL PEREJIL Y DE LA HIERBABUENA.”
- [28] C. Córdoba Nieto and E. Manufactura automatización, “Ingeniería e Investigación,” vol. 26, pp. 120–128, 2006.

- [29] Nof, S., 2009. "*Springer Handbook Of Automation*". Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [30] Dogan Ibrahim, Chapter 1 – "Microcomputer Systems", Editor(s): Dogan Ibrahim, PIC Microcontroller Projects in C (Second Edition), Newnes, 2014, Pages 1-7, ISBN 9780080999241, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099924-1.00001-0>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080999241000010>)
Keywords: Microcontrollers; microprocessors; microcontroller features; microcontroller applications
- [31] Th. Kwaaitaal, "The fundamentals of sensors", Sensors and Actuators A: Physical, Volume 39, Issue 2, 1993, Pages 103-110, ISSN 0924-4247, [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(93\)80205-U](https://doi.org/10.1016/0924-4247(93)80205-U). (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092442479380205U>)
- [32] Cross, N. (2013). "Métodos de diseño estrategias para el diseño de productos" (1.a ed.) [Libro electrónico]. LIMUSA. https://www.academia.edu/33266990/Cross2002Metodos_M%C3%A9todos_de_Dise%C3%B1o_Estrategias_para_el_Dise%C3%B1o_de_Productos
- [33] DF Robot, "Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193-DFRobot," *Dfrobot.com*, 2015.